



HAL
open science

Energie, Matière, Architecture

Raphael Ménard

► **To cite this version:**

Raphael Ménard. Energie, Matière, Architecture. Architecture, aménagement de l'espace. Université Paris-Est, 2018. Français. NNT: . tel-03475897

HAL Id: tel-03475897

<https://hal.science/tel-03475897>

Submitted on 14 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Energie, Matière, Architecture
Raphaël Ménard

Diplôme de docteur de l'Université Paris-Est
Spécialité : Architecture

Thèse soutenue le vendredi 16 novembre 2018 devant le jury:

Jean-Pierre Levy, enseignant-chercheur, directeur de recherche, CNRS, président du jury
Marjorie Musy, directrice de recherche, Cerema, Nantes, rapporteur
Mindjid Maïzia, enseignant-chercheur, université de Tours, rapporteur
François Fleury, enseignant-chercheur, ENSA de Rouen, rapporteur
Caroline Gallez, directrice de l'EDVTT, IFSTTAR, membre permanent de l'UPE
Marcel Pariat, référent VAE
Robert Le Roy, enseignant-chercheur, ENSA Paris Malaquais, directeur de thèse

Energie Matière Architecture

Raphaël Ménard

Doctorat par VAE
Encadrant, Robert Le Roy
Accompagnateur, Marcel Pariat

Résumé

Cette thèse explore les relations entre l'architecture, l'énergie et la matière. Elle analyse l'influence de la disponibilité des matières et des énergies sur les métamorphoses de l'architecture au cours des âges. Elle présente les fondements d'une architecture renouvelable et d'un urbanisme soutenable, capables de s'affranchir des énergies fossiles et des matières non renouvelables. À cette fin, ce travail crée un pont entre deux approches : d'un côté celle issue d'une culture technique, auscultant la durabilité par des métriques de soutenabilité, de l'autre, par des réponses fruits de l'art de concevoir, de la culture du projet, d'une approche humaine et qualitative des enjeux environnementaux. Ce mémoire comporte 29 chapitres répartis en trois parties, chacun d'une vingtaine de pages, rédigés de telle sorte à permettre une lecture autonome.

La première partie « *Une histoire en sept temps* » consiste en une brève histoire de l'architecture, narrée selon sept séquences (du temps I au temps VII), dont le postulat est le suivant : la disponibilité et l'usage des énergies et des matières, leur caractère renouvelable ou non, sont les déterminants essentiels de l'art de bâtir et d'aménager. Selon cette dissection chronologique, en comparant les flux d'énergies et de matières, cette partie analyse sur un même plan plusieurs références à travers les âges. Plus tard, et depuis la Modernité, cette partie se positionne sur les impasses de théories ou de références considérées comme durables, qui porteraient tantôt - parfois excessivement - leur regard sur l'énergie (le temps V), ou au contraire sur la matière (le temps VI). Toujours selon ce référentiel énergie-matière, cette section ausculte des architectures singulières, les énergies renouvelables, ferments du temps VII, le terme de cette fresque.

La deuxième partie « *Éléments d'architectures renouvelables* » propose des chapitres plus techniques, permettant d'aller plus loin sur les aspects quantitatifs du temps VII, ce nouveau paradigme de soutenabilité, intégrant également les contingences de l'urgence climatique. Pour cela, cette section fournit des outils pour dimensionner et proportionner un art de « concevoir renouvelable », à l'aune de quelques invariants terrestres. Cette partie interpelle les enjeux temporels et décrit la métrique des temps de retour écologiques ; elle propose quelques clés pour des aménagements soutenable, gouvernés d'abord par les densités de population. De façon plus personnelle, cette partie s'aventure dans le champ politique avec quelques propositions pour engager les transformations nécessaires : elles reflètent plus globalement les prises de position, parfois radicales de l'auteur, sur l'ensemble de ce document.

Toutefois, sans pouvoir « donner forme » à ce temps VII, la troisième partie « *Projets illustrés* » décortique des expériences personnelles, réinterrogées selon les résultats des deux parties précédentes. Ce choix de projets, au cours de vingt années de pratique, illustre un large spectre d'expérimentations, de la petite jusqu'à la grande échelle, avec un regard rétrospectif volontiers critique. Avec quelques résultats nouveaux pour le temps VII, quelques chapitres proposent des développements théoriques afin de tester la dépendance des impacts énergie-matière à la dimension des artefacts analysés.

*

Mots-clés

Carbone, énergies renouvelables, réchauffement climatique, raréfaction matière, architecture bioclimatique, énergies solaires, éoliennes, inventions, expérimentations, analyse de cycle de vie, prospective, géographie, densité, transition, thermodynamique, obsolescence, réemploi, biosourcé, chronologie, adaptation, climats, confort, post-carbone, fossile, métabolisme, anthropocène, déplétion, temps de retour écologique, bilan énergie-matière, utopies.

Biographie de l'auteur

Architecte DPLG et ingénieur de l'École Polytechnique, diplômé de l'École des Ponts et Chaussées. Enseignant à l'École d'Architecture de Marne-la-Vallée et professeur invité à l'EPFL. Ses recherches, son enseignement et sa pratique – à travers Elioth et 169-architecture puis chez AREP depuis fin 2018 - portent sur l'énergie, l'architecture, l'urbanisme, les structures et le climat. De façon plus spécifique, sur l'architecture bas carbone et l'urbanisme des énergies renouvelables avec quelques réalisations comme la Porte Marguerite de Navarre à Châtelet-les-Halles ou le projet de La Renaissance des Fabriques à Lille, lauréat du concours EDF Bas Carbone. A développé plusieurs inventions comme les Montagnes Solaires et Wind-it ou des innovations dans le design, comme la Table Climatique.

*

Version février 2019

Sommaire

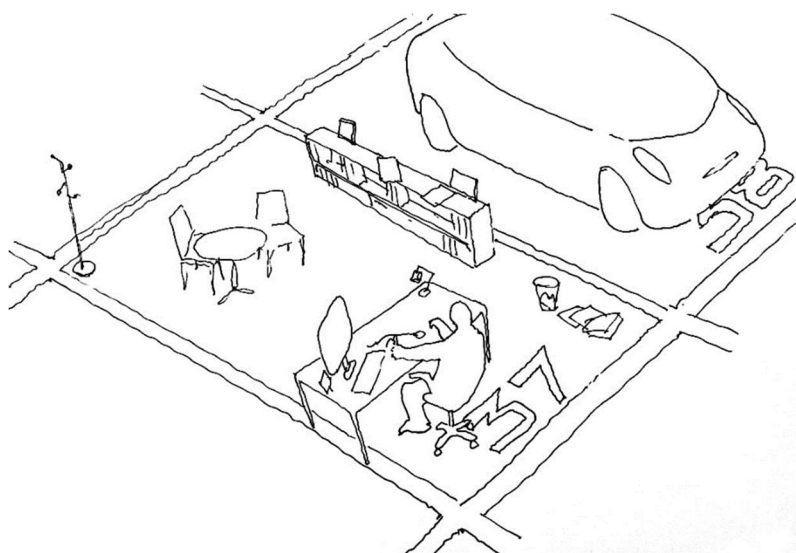
	2
Résumé	3
Sommaire	5
Préambule	11
#1 43 révolutions	13
<hr/>	
Introduction	21
#2 Point de départ	23
<hr/>	
Définir l'architecture renouvelable	23
L'architecture des cinq chocs	31
#3 Thermodynamique	43
<hr/>	
Système ouvert, système fermé	43
Trois principes	51
#4 Mode d'emploi	63
<hr/>	
Organisation	63
Pour bien se comprendre	66
#5 Les chronogrammes	71
<hr/>	
Vitruve et le cycle de vie	71
Dynamique d'énergie et de matière	74
Temps et bilans	80
Partie 1. Une histoire en sept temps	85
#6 Temps zéro d'un duo	87
<hr/>	
Un hors d'échelle temporel	87
Une synthèse chronologique	90
Le Big Bang, la Terre avant Sapiens (épisode 0)	93
#7 Préhistoire de l'architecture (temps I et II)	101
<hr/>	
Avant le feu (temps I)	101
Après le feu (temps II)	108

#8	Chasser les courants	123
	Courants solaires	123
	Courants d'air	128
	Courants d'eau	143
#9	L'âge d'or de l'architecture renouvelable (temps III)	153
	L'inflation du savoir et des connaissances	154
	Deux chronogrammes fictifs	158
	Des révolutions qui s'annoncent	163
#10	Récolter les flux	171
	Une arborescence de l'énergie	171
	Offre et demande d'énergie	174
	Le flux géothermique	178
#11	Le solaire sous toutes ses formes (1/3)	185
	Les différentes natures du flux solaire	185
	Photosynthèse et biomasse	189
	Les solaires thermiques	194
#12	L'architecture des fossiles (temps IV.1)	203
	L'émergence des fossiles	204
	Chronogramme d'un appartement du 19 ^{ème} siècle	210
#13	Le solaire sous toutes ses formes (2/3)	219
	Le solaire à concentration	219
	Le solaire photovoltaïque	227
#14	L'architecture des fossiles (temps IV.2 .3 .4)	243
	Le règne des fossiles (temps IV.2)	243
	Des rebroussements en gestation (temps IV.3)	251
	La démesure qui dure (temps IV.4)	255
#15	Le solaire passif et l'urbanisme solaire (3/3)	265
	La fenêtre, un capteur solaire	265
	Le rendement en question	270
#16	L'architecture-énergie (temps V)	285
	L'architecture qui renonce aux énergies fossiles	286
	Les rêves de l'autonomie énergétique	291
	Les dilemmes de l'architecture-énergie	306

#17	L'architecture-matière (temps VI)	315
	Fin de la matière : fin de l'architecture ?	316
	Moins de matière (option 1)	327
	De la matière pour longtemps (option 2)	335
	Faire tourner la matière (option 3)	342
	La matière renouvelable (option 4)	347
#18	L'architecture renouvelable (temps VII)	357
	Une nouvelle synthèse énergie-matière	357
	L'architecture carbone	361
	L'architecture résiliente	366
	L'architecture de survie	372
Partie 2.	Éléments d'architectures renouvelables.	379
#19	Les constantes de l'architecture	381
	$g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ (ou la matière)	382
	$\Phi = 169 \text{ W par m}^2$ (ou l'énergie)	385
	$\theta = 15^\circ\text{C}$ (ou le carbone)	389
	100 000 à 100 lux, du ciel à l'œil. L'architecture	394
#20	L'approche globale	401
	Les bilans énergie-matière d'une construction	401
	Les temps de retour	406
	Une traduction économique	411
#21	Programmes du temps VII	423
	Aménagement du territoire	423
	Fiscalité et économie	426
	Architecture et urbanisme	428
	Culture et enseignement	431
	Post-scriptum	432
#22	Les densités critiques de l'autonomie et de la neutralité	437
	Densité de la demande énergétique	443
	Densité de production renouvelable	447
	Autonomie, les territoires à 1 watt	450
	Densité et neutralité carbone	464
	Conclusion	468

Partie 3. Projets illustrés	477
#23 Une passerelle en verre et une verrière photovoltaïque	481
Description	481
Energie et matière	482
#24 La passerelle Simone de Beauvoir	487
Description	487
Energie et matière	492
#25 Les Montagnes Solaires	501
Le récit d'un échec	501
Synthèse énergie-matière	508
#26 Wind-it	517
Histoire	517
Architecture	526
Synthèse énergie-matière	527
#27 Le sol à albédo variable	539
À l'origine	539
Les essais à Lyon Part-Dieu	540
#28 La Table Climatique	549
À l'origine	549
Le programme ZEF	550
Synthèse énergie-matière	552
#29 Édicule de la place Marguerite	557
Description	557
Annexes	565
Notations et abréviations	566
Glossaire	567
Bibliographie	574
Synthèse publications personnelles	585

Fig. 1. Dessin extrait de l'article
« Don Draper, la voiture et le climat ».
Un jeu de l'oie des âges de la vie, dans
un espace digne de Dogville, film de
Lars von Trier (2003).



Préambule

#1 43 révolutions

Un bilan énergie-matière à demi-vie. Chercher, construire, transmettre : pénitence des désordres induits de l'existence ?

- 1974 Naissance parmi 4 milliards d'humains. 330 ppm de CO₂ dans l'atmosphère
- 1981 Première visite au Centre Pompidou¹ à Paris (Rogers et Piano, architectes)
- 1990 Première lecture de *La Partie et le Tout* du physicien Werner Heisenberg
- 1994 Entrée à l'École Polytechnique à Palaiseau
- 1997 Stage scientifique à la Northeastern University à Boston
- 1997 Entrée à l'École des Ponts ParisTech
- 1997 Entrée à l'École d'Architecture de Paris-Belleville
- 1998 Stages chez AREP. Conception sur les gares de Valence et de Marseille
- 1999 Stage chez Henri Gaudin, architecte. Concours de la salle de concert à Lorient
- 1999 Débuts chez RFR, ingénieurs, à Paris
- 2002 Analyse dynamique de la passerelle Simone de Beauvoir à Paris
- 2003 Diplôme d'architecte (une bibliothèque pour le campus de Jussieu)
- 2004 Création d'Elloth au sein du groupe OTH
- 2005 Concept de la Montagne Solaire (chapitre #25)
- 2006 Concept de Wind-it (chapitre #26)
- 2011 Publication de "Dense Cities in 2050: the energy option?"
- 2011 Début du projet Réforme pour le programme Ignis Mutat Res
- 2012 Début du Mobilier Climatique avec J.S. Lagrange
- 2012 Première promotion du DPEA Architecture post-carbone
- 2014 Prototype de la table ZEF, Mobilier Climatique (#28)
- 2014 Création de la société Wind-it
- 2014 Premier prototype à échelle 1 de Wind-it à Vitré
- 2015 Création de 169-architecture
- 2015 Professeur invité à l'EPFL en master d'architecture
- 2016 Lauréat du Concours EDF Bas Carbone avec 169 et Elloth
- 2017 Livraison de l'édicule de Place Marguerite de Navarre à Paris (#29)
- 2017 Lauréat de Faire pour le réemploi des verres de Beaubourg
- 2018 Parmi presque 8 milliards d'humain et 410ppm de CO₂
- 2018 Transmission d'Elloth et prise de fonction chez AREP

Energie & Matière

Environ 6000 GJ d'énergie consommée depuis 43 ans²

Environ 3000 tonnes de matières utilisées depuis 43 ans³

¹ Date estimée

² Estimation de besoins annuels de l'ordre de 140GJ par an en énergie primaire, soit un flux moyen équivalent de 4000 watts.

³ Sur la base d'un ratio moyen annuel de l'ordre de 80 tonnes par an, #17.

Power of Ten

L'astronomie est fascinante. Zoomer, dézoomer dans l'espace et dans le temps. Un *Autocad*, un *Rhinoceros*, un *Google Earth* cosmique. Il y a une vingtaine d'années, vers les années 2000, je découvrais *Power of Ten* (Fig. 2), le court documentaire réalisé par le couple de designers Ray et Charles Eames en 1977¹ [1]. Ces neuf minutes ont changé mon rapport au monde. Régulièrement je réajuste ma place dans le monde, je refais le point sur mon échelle physique, à mi-distance entre le cosmos (10^{24} m) et les gluons (10^{-16} m). L'espace s'étendrait sur quarante ordres de grandeurs, nous sommes presque au milieu (10^0 m).

Pendant quelques secondes, me voilà plongé dans un planétarium virtuel et je relativise mes dimensions physiques à celle du grand vide intersidéral. D'un point de vue pratique, c'est fort utile pour prendre du recul avec ses tracasseries de terrien, recette populaire pour apaiser les stress récurrents de l'existence. Vers mes vingt ans², j'ai failli embrasser la carrière de chercheur en physique, à scruter, à interroger l'univers entre 10^{-16} et 10^{-10} m. J'ai finalement opté pour une profession opérant dans une gamme usuelle, comprise entre les 10^{-3} m, le millimètre, dimension de l'épaisseur d'un vitrage³, et à l'autre extrémité, les 10^7 m, soit dix mille kilomètres, échelle des enjeux écologiques globaux. Dix ordres de grandeur, le quart du gâteau universel, un beau morceau déjà.

L'heure des choix

Il y a presque trente ans, la lecture de *La Partie et le Tout* de Werner Heisenberg [2] berçait mon désir d'engagement dans les sciences (Fig. 5). Exploration mathématique, romantique et philosophique, la mécanique quantique était une remise en cause radicale de la représentation de la réalité. Dans son ouvrage, Heisenberg rendait également compte de l'engagement politique du chercheur et de sa responsabilité d'hyper-sachant. Au terme de mes études à l'École Polytechnique, pour mon orientation professionnelle, telle une particule quantique, j'étais aussi en « état de superposition » : opter soit pour la recherche fondamentale, le royaume de la physique théorique, ou poursuivre une discipline davantage ancrée dans le quotidien, mariant arts et sciences, comme l'architecture.

En 1997, après un stage scientifique à Boston dans un laboratoire de physique⁴, en constatant que la science contemporaine s'était muée en industrie, bien loin de l'épopée idéaliste du début 20^{ème}, de ces discussions au coin du feu entre Niels Bohr et Werner Heisenberg sur une île du Danemark, je m'engageais vers l'architecture. Elle apparaissait comme la discipline capable de fédérer mes aspirations.

¹ Une commande pour le compte d'IBM.

² Plusieurs lectures ont été déterminantes et particulièrement une, *La partie et le tout* de Heisenberg ou *Le Temps des physiciens* de Olivier Costa de Beauregard ou *La matière espace-temps* de Gilles Cohen-Tannoudji et Michel Spiro, *La logique des particules élémentaires*, 1986 ou encore Stephen Hawking, *Une brève histoire du temps*.

³ Ou de la connexion d'une pale d'éolienne.

⁴ A la *Northeastern University* pendant trois mois sur le chaos quantique dans le laboratoire du professeur Srinivas Sridhar.

Fig. 2. En haut, story-board des échelles du *Power of Ten* des Eames : le jeu de l'oie de mes questionnements de 10^{24} m à 10^{-16} m. En bas, le cadrage de référence, l'échelle de l'homme, 10^0 m

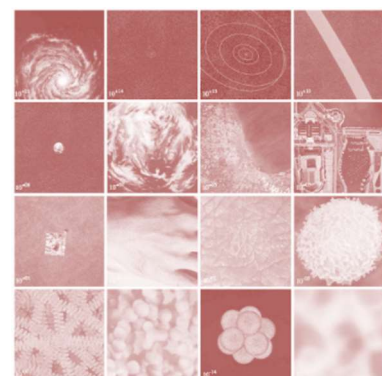


Fig. 3. Une simulation des lieux et de leurs usages à travers les âges de la vie et en proportion de temps de présence [3]

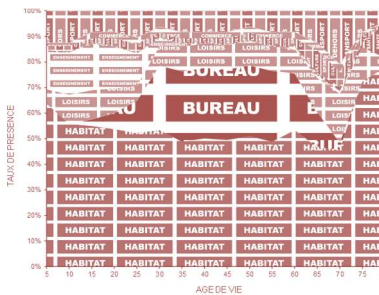
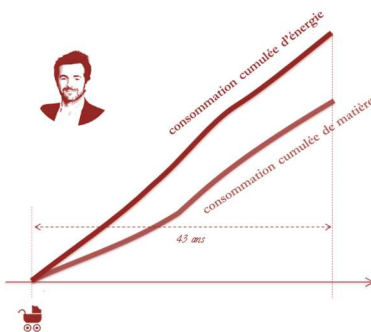


Fig. 4. Chronogramme de vie ou la consommation cumulée d'énergie (6000GJ) et de matières (3000 tonnes) depuis 43 révolutions.



Intégrales de chemin¹

Cette thèse me donne l'occasion d'un bilan, d'un état des lieux de mes engagements et de ma relation au monde. De fait, depuis ma naissance, j'ai réalisé plus de quarante-trois révolutions autour du soleil. J'ai connu plus de quinze mille rotations terrestres. Je suis terrien depuis près de trois cent quatre-vingt mille heures. Un demi-milliard de fois, j'ai inspiré puis expiré de l'air ; de façon répétée j'ai bu de l'eau et toutes sortes de liquides, et, à peine plus tard m'en séparer sous d'autres formes ; idem pour tout ce que j'ai pu mâcher² et avaler.

Je me suis vêtu de centaines de vêtements que j'ai usés. Je me suis équipé et séparé d'une cohorte d'objets – perdus, cassés, volés, réemployés, vendus, jetés-. J'ai habité des quantités d'espaces, dont certains m'étaient personnels comme mes chambres à coucher par exemple. Il y a mon logement que j'ai mutualisé, souvent en famille - sauf entre mes vingtièmes et trentièmes révolutions - et puis il y a une myriade d'espaces partagés avec d'autres : les écoles où j'ai appris avec mes pairs, les stations de métro que j'ai empruntées parmi la foule, les musées que j'ai visités, des hôpitaux où je me suis rendu (Fig. 3). J'ai emprunté différents transports, dont certains que j'ai possédés pendant quelques temps, des vélos, des skate-boards ou des voitures, dont une magnifique Twingo, de première génération, jaune moutarde, qui disposait d'un généreux toit ouvrant en toile³.

Combien pèse ma demi-vie ?

Voilà un bref résumé de mon tourbillon de matière, bilan à mi-vie (Fig. 4). Tous ces effets mobiliers, ces usufruits immobiliers : je les ai utilisés, usés et donc amortis au sens comptable. En quarante-trois révolutions, telle une cellule puisant et rejetant des flux de matière à son environnement, quelle quantité de choses m'a traversé ? Quel volume de matières organisées ai-je ainsi incidemment transformé, désordonné, voire totalement dégradé ? Comme ai-je participé à éparpiller la matière⁴ ? En d'autres termes, puisque la vie (et ma vie en particulier) pompe de l'entropie à son environnement extérieur, que cela représente-t-il en termes de valeur et d'échelle ?

¹ Un clin d'œil à l'invention mathématique de Richard Feynman et à sa reformulation de la mécanique quantique avec cet outil analytique.

² Évaluation de la quantité d'air en volume et en masse. Idem pour les aliments et les boissons.

³ Renault, inspiré à cette époque, réinventait la 4L avant de plonger plus tard comme tous, vers l'hypertrophie, l'obésité automobile et les SUV, voir #21

⁴ Comme par exemple l'oxyde de titane contenu dans les deux portions de mon dentifrice quotidien.

Enfant de Dallas

Autre consommation, autre dégradation : l'énergie, sœur siamoise de la matière. Mes repas convertis en énergie : sans doute pas loin de trente millions de kilocalories ingurgités en quarante-trois années. Toutes ces ampoules qui m'ont éclairé, ces ordinateurs qui ont traité de l'information selon mes instructions. Ces litres d'essence, de diesel, de mazout et de kérosène de mes petits et grands déplacements. Vertige du torrent d'énergie consommée depuis ma naissance. 1974, à peine un an après le premier choc pétrolier. Né à l'apothéose du roi pétrole, dans un monde du fossile-tout-puissant, celui du feuilleton *Dallas*¹, voilà une partie de ma dette de vie : la somme des émissions de gaz à effet de serre liée à mes consommations d'énergie et à mon alimentation.

C'est cela le bilan de ma quarantaine, celui de mon cumul énergie-matière - et autres externalités -, une dette écologique existentielle. Et quand j'y pense, je n'existerai sans doute pas sans les énergies fossiles. Je suis un fruit comme tant d'autres de l'hypercroissance démographique, d'une reproduction humaine au galop depuis plus d'un siècle, nourrie au shoot de puissance des hydrocarbures.

Entropie contre information

Ce passif énergie-matière, cette dette entropique, il s'agit d'en offrir une petite contrepartie, de tenter une indulgence : partager de l'information. Voilà quarante-trois ans que j'avale du savoir, que je m'atèle à cette joyeuse discipline d'être curieux du monde et des autres (au moins en tant que principe de vie). À cette fin, malgré moi, j'aspire, je pompe de l'ordre, de la matière et de l'énergie à mon environnement. Aussi, depuis une quinzaine d'années, j'exerce professionnellement comme architecte et ingénieur, ce sont les applications professionnelles choisies après mes académies (Fig. 5).

J'enseigne, je cherche, je conçois, je dessine, je calcule, et j'écris. Donner et transmettre, le plus utilement, créer, transformer du savoir pour apprendre à faire différemment. Ce mémoire s'aventurera sur des champs limitrophes à l'architecture comme le design, ou à très grande échelle, la conception des infrastructures, en particulier celles dédiées à la production énergétique en abordant la question de l'échelle et de la proportion, comme des paramètres déterminants de la soutenabilité et de la permanence.

*

¹ Et on pourra lire *l'Or Noir* de Mathieu Auzanneau [4].

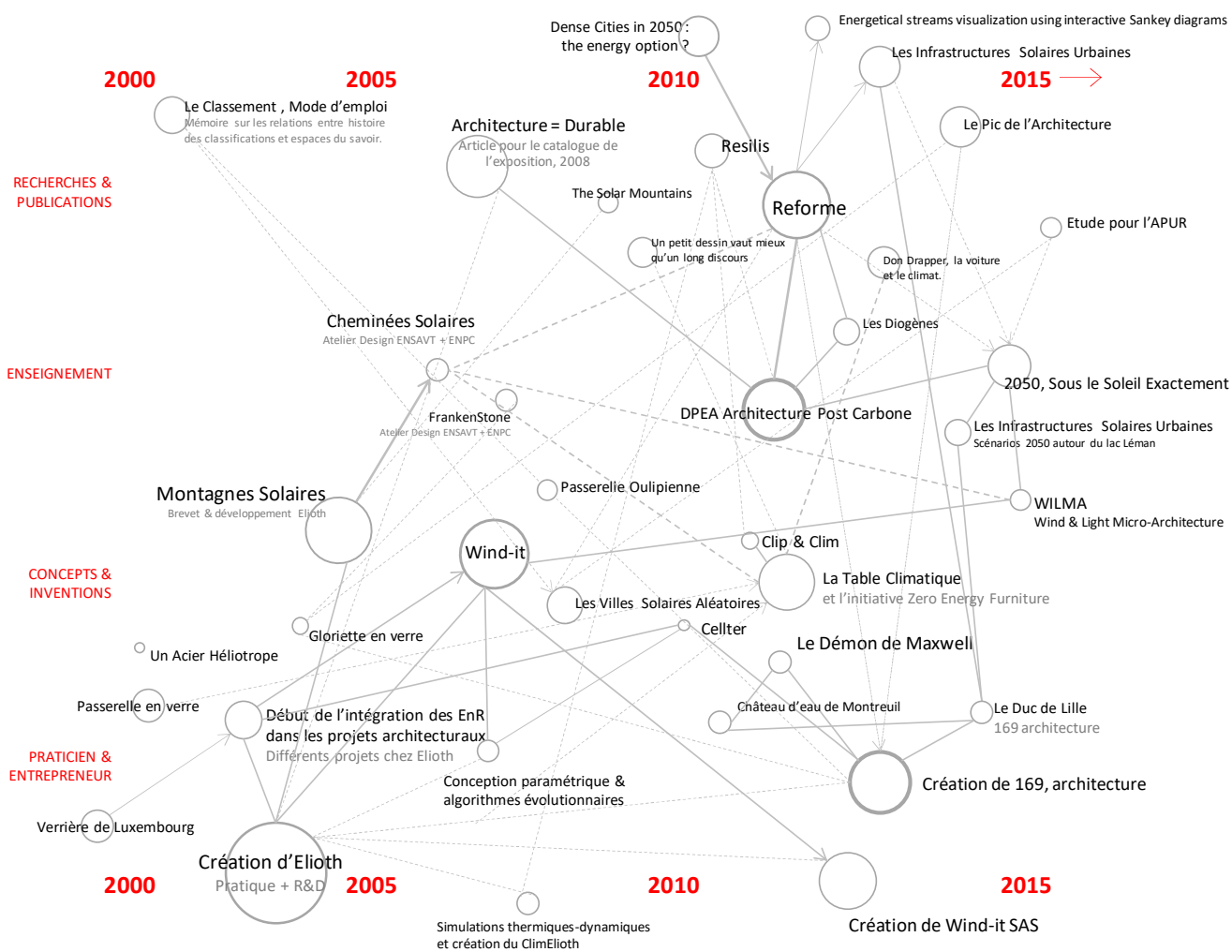
Bibliographie introductive

1. EAMES, Charles, Ray, *Powers of Ten*, 9 minutes, 1977
2. HEISENBERG, Werner, *La Partie et le Tout*, 1969
3. MENARD Raphaël, *Work in Process, nouveaux bureaux, nouveaux usages*. Exposition au Pavillon de l'Arsenal. Article « Don Drapper, la voiture et le climat », p237 à p265, 2012
4. AUZANNEAU, Mathieu, *L'or noir, la grande histoire du pétrole*, La Découverte, 2015

Autres sources

- COHEN-TANNOUDJI, Gilles, SPIRO, Michel, *La matière espace-temps, La logique des particules élémentaires*, 1986
- COSTA DE BEAUREGARD, Olivier, *Le Temps des physiciens*, ed. Aubin, 1996
- HAWKING Stephen, *Une brève histoire du temps*, titre original *A brief history of time*, Bantam Books, 1988

Fig. 5. Tentative de mise en relation entre mes thématiques d'intérêt depuis vingt ans.



Introduction

Trois chapitres pour préciser la structure
du mémoire.

Une définition large de l'architecture,
intégrant les infrastructures et
l'aménagement du territoire.

L'architecture contemporaine et ses
conséquences énergie, matière et climat.

La nécessité d'une refondation et les
apports de la thermodynamique.

Une introduction aux bilans d'énergie et
de matière.

Le mode d'emploi du mémoire.

#2 Point de départ

La problématique générale et l'hypothèse de ce mémoire. Définir l'architecture renouvelable. L'architecture des cinq chocs. Le rôle déterminant du concepteur, grand prescripteur de matières et d'énergie. Le diagramme énergie-matière, quadrant récurrent du mémoire.

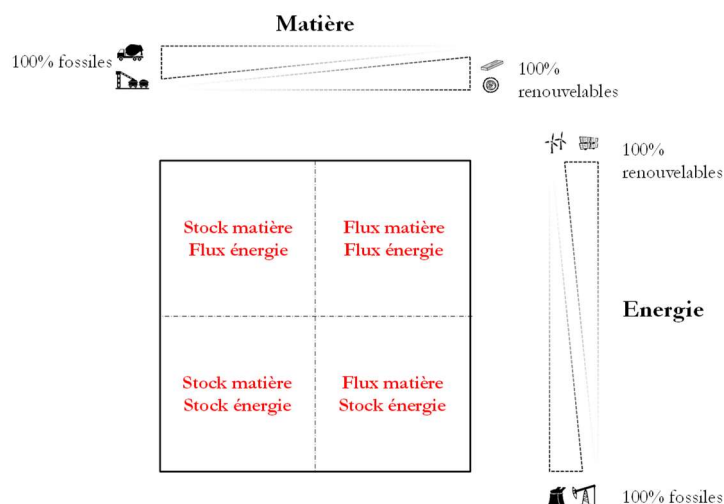
Définir l'architecture renouvelable

L'insoutenable légèreté

Les conditions aux limites de l'architecture

Ce mémoire est la réaction à une déception. Celle d'un sentiment de mollesse, d'indolence de l'architecture contemporaine face à l'urgence écologique. Sa mauvaise foi aussi parfois, elle qui se retranche souvent en appliquant sagement normes et référentiels de performances environnementales, sans en comprendre les fondements, ni les limites (chapitre #19). Après vingt années de pratique, je suis impatient qu'une large communauté prenne sérieusement conscience des impacts énergie, matière et carbone de l'architecture et dans une définition large de cette dernière [1]. Ce mémoire essaiera de construire une méthode simplifiée pour concevoir l'architecture renouvelable (chapitre #18 et plus particulièrement la Partie 2), ambition essentielle de ce travail (Fig. 6).

Fig. 6. La matrice énergie-matière qui distingue les quatre situations possibles, selon l'emploi de matières renouvelables (ou non), et la même chose pour ce qui concerne l'énergie. Nous analyserons le parcours historique de l'architecture au sein de ce diagramme, le cycle énergie-matière de l'architecture.



L'architecture : un pic d'ordre de la matière

L'histoire de l'architecture n'est pas celle d'une production totale qui serait à la fois culturelle, artistique, technique, environnementale, sociale et politique. Elle n'est pas non plus le récit chronologique d'un patrimoine construit ou imaginé, d'un stock latent dont nous soupçonnerions par instant l'illusion d'éternité. Dans ce qui suit, je ferai l'hypothèse de tester la réduction de cette épopée humaine à une histoire « d'un débit de la matière », à un *story-board* multiséculaire d'un flux colossal de matériaux qui, lorsque bâtis, ont été pendant un temps organisé, et selon un état intermédiaire compris entre le *berceau de la mine* et la *tombe du déblai* (#5). Un pic d'ordre, comme la vie.

L'énergie nécessaire

Nous parcourrons cette frise chronologique en scrutant une histoire jumelle, celle de l'énergie, le récit des formes différentes de cette quantité bien souvent immatérielle. C'est uniquement par l'énergie que le *torrent de choses* a pu être animé (Fig. 7). L'architecture est une sous-famille de ce chaos. Transformer, déplacer, lier la matière pour la construction d'édifices et rendre ces derniers ensuite vivables, idéalement confortables et plaisants, en les chauffant, en les éclairant. En fin de vie, l'énergie opère encore, permet la destruction¹ de l'architecture, parfois par le travail des forces naturelles², d'autres fois par la volonté des hommes et les moyens énergétiques qu'ils décident de mettre en œuvre³.

L'architecture, cultures, savoirs et informations

Nous observerons comment l'évolution des savoirs et des techniques ont tenté, depuis la nuit des temps, de canaliser ces deux flots essentiels à la vie et à certaines périodes de l'histoire, ont préféré ne pas voir les débordements irréversibles qui étaient à l'œuvre et ont parfois concouru à amplifier les débits de matière et d'énergie (chapitre #14). Alors, plutôt que d'aborder l'histoire de l'architecture comme une quête de la permanence⁴, d'une durabilité ontologique (et de l'illusion de sa résistance à la flèche du temps), j'aborderai au contraire dans les pages qui suivent sa fragilité, son caractère éphémère, puisqu'intrinsèque à l'édification de tout ordre et de toute complexité. Il faut se résigner au règne de l'entropie et prendre conscience de la suprématie de la grande faux du désordre. C'est une discipline, une ascèse qui permet d'apprécier et de défendre le miracle du vivant, ce grumeau de néguentropie, fugace oasis d'ordre de notre biosphère.

Fig. 7. *Un scraper dans une mine : une machine hors d'échelle, dévorant des tombereaux d'énergie, pour gratter et récupérer des quantités phénoménales de matières non renouvelables. La pelleuse Bagger 293, le plus gros engin de chantier au monde. Un poids de 14 877 tonnes, une longueur de 225m pour une largeur de 46m et une hauteur de 96m. La capacité d'un godet est de 15m³ et son rendement journalier d'excavation est 240 000 m³.*



¹ Cela rappelle la mise à jour de la préface par John R. Mac Neill pour la dernière édition de son ouvrage, *Du nouveau sous le soleil*

² Songeons aux énergies ayant participées à la lente décomposition de l'ordre des édifices composant le Parthénon.

³ Dont les violences destructrices des guerres.

⁴ C'est d'ailleurs de cette façon qu'elle m'a été enseignée à l'école d'architecture. Un séminaire de quatrième année s'intitulait d'ailleurs la « permanence de l'architecture » et ne s'interrogeait que sur les questions formelles de l'écriture de l'architecte moderne.

Fig. 8. Les « briques de matière » dans un paquet de céréales : et si l'architecture faisait aussi état de ses composants fondamentaux ?

Nutrition Facts	
Serving Size 1.25 Cup (286g)	
Servings Per Container 5	
Amount Per Serving	
Calories 310	Calories from Fat 110
%Daily Value*	
Total Fat 12g	18%
Saturated Fat 4g	20%
Trans Fat 0g	
Polyunsaturated Fat 1g	
Monounsaturated Fat 5g	
Cholesterol 20mg	7%
Sodium 290mg	12%
Potassium 780mg	22%
Total Carbohydrate 36g	12%
Dietary Fiber 12g	48%
Sugars 6g	
Protein 17g	
Vitamin A 20%	Vitamin C 80%
Calcium 20%	Iron 20%
Vitamin E 8%	Vitamin K 110%
Thiamin 25%	Riboflavin 20%

Fig. 9. Un aperçu de la collection de labels de vertus environnementales.



Autopsie de la matérialité

Voilà le parti pris de ce qui suit : omettre une grande partie des histoires traditionnelles de l'architecture, de l'urbanisme et du paysage pour mieux dépecer ces constructions humaines (théoriques ou construites) au crible de leur constitution matérielle, à la façon de la lecture des ingrédients mentionnés sur le paquet de céréales du petit-déjeuner (Fig. 8), et de leur emprise énergétique sur la totalité de leur durée de vie¹.

Peut-on se fier à la norme du durable ?

Comment noter la vertu ?

L'architecture contemporaine peine généralement à répondre aux urgences de nos crises globales. Pour tenter de prouver une partie de leurs vertus de durabilité, les constructions de ces dernières années se soumettent souvent à une batterie d'indicateurs, à des cribles de labels et de normes (Fig. 9), qui heurtent parfois une partie de la communauté des concepteurs. Ces métriques de la durabilité s'apparentent à des *check-lists* dignes de celles d'un pilote de ligne avant décollage. Mais l'exercice de certification ou de labellisation ressemble aussi trop souvent à un exercice de *scoring* sans lien parfois avec la cohérence et l'intégrité du projet architectural. Est-ce la bonne voie pour faire émerger urgemment l'architecture digne de nos urgences planétaires ?

Constatons que les architectes ont délaissé cette « science de la durabilité » et que les ingénieurs, bureaux d'études et consultants, sont devenus les calculettes et les rapporteurs de ces nombreux indicateurs, au risque souvent d'y perdre le bon sens. La durabilité ne doit pas être l'apanage d'experts. Elle ne peut se permettre d'offrir le flanc à la vindicte populiste d'un Rudy Ricciotti, dénonçant « *les renards du temple* » pour contrecarrer la HQE [1] et s'autoriser toutes ses inconséquences constructives.

Préférer la myopie à l'aveuglement²

L'architecture doit être bien proportionnée en toute chose. Les « nombres flous » sont ceux qui permettent d'estimer la bonne échelle, ceux qui dessinent la juste proportion, et surtout ceux qui statuent sur le domaine des possibles. Ils ne réclament ni trois chiffres après la virgule, ni calculs savants sous tableur, encore moins une simulation dédiée. Les nombres flous ont l'épaisseur du crayon gras, du feutre épais. Ils apparaissent au détour d'une règle de trois et dessinent la silhouette d'un modèle : esquisser les apports solaires entrant dans un édifice, estimer les contraintes dans un élément de structure : tout cela est du même acabit que l'imprécision percutante de maquettes en *roofmate* (Fig. 10). Il faut appréhender les phénomènes avec la même liberté que pour représenter l'espace. L'histoire de l'architecture est ponctuée de préceptes des bonnes mesures d'espace, des divines proportions, des ergonomies idéales.

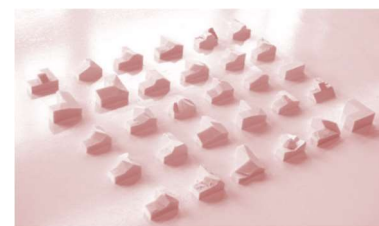
¹ Réelle ou fictive pour les modèles théoriques.

² Ou bien : « *Au royaume des aveugles les borgnes sont rois.* »

Il nous manque notre « modulateur de la soutenabilité » pour réinventer l'architecture au prisme des mutations, des crises simultanées de ce siècle : démographie, matière, énergie et climat. Ce mémoire synthétise cette passion de l'ordre de grandeur, de la mantisse, de l'échelle des possibles, de la proportion adaptée : estimer une dimension avec une certaine incertitude, mais « taper dans la cible ». Comme dans *Power of ten* [3], savoir où on est.

« [...] Nous dresserons ici quelques constats et rassemblerons des idées disparates sous le sceau des trois empreintes évoquées précédemment pour, finalement, parvenir à cette interrogation : la durabilité n'est-elle pas conditionnée par l'abandon de l'ordonnement classique et arborescent des choses au profit d'une mise en relation de toutes les interdépendances ? Ne doit-on pas voir dans le texte de Christopher Alexander *A City is not a Tree* (1965) les prémices d'une pensée transversale qui ferait écho à la poétique proposition du sociologue et philosophe Bruno Latour de transformer la Haute Chambre en Parlement des Choses ? » [4]

Fig. 10. *Maquettes d'étude*



L'architecte, grand prescripteur de matière et d'énergie

La puissance de feu des concepteurs

Redonner les rênes, faire comprendre simplement ce qui gouverne la soutenabilité, ne pas se perdre dans les détails des canevas analytiques qui éloignent de la réalité constructive et de la confrontation au réel. Faire prendre conscience du rôle immense du concepteur, de son pouvoir gigantesque sur la matière et l'énergie, sans rapport et hors de proportion avec son propre impact en tant qu'humain¹.

L'architecte est un grand prescripteur de matières et d'énergie : lorsqu'il lève son stylo pour esquisser une intention, lorsqu'il rédige des lignes de ses cahiers prescription, c'est comme l'armée américaine qui part en campagne, ce qu'écrit Auzanneau dans son *Or noir* [7] : il commande sans le savoir un flot considérable de matières à construire², un torrent d'énergie qui seront nécessaires pour aller du berceau des matières au tombeau provisoire de l'architecture édifiée (Fig. 11).

« Au cours de ses cinquante années de projets, l'architecte aura eu un pouvoir sur la réduction potentielle de la consommation d'environ 300 000 barils de brut. Par an, l'architecte manipule un flux de 4 millions de kWh pendant les 1 000 heures consacrées aux projets. Il est le machiniste d'une centrale virtuelle, consommant 400 litres de carburant à l'heure et dont il détient les clés pour optimiser le rendement. [...] L'architecte est une machine énergétique hallucinante : il contrôle 40 000 fois ses propres besoins ! » [6]

¹ Sur l'énergie et le CO₂, j'avais estimé une amplification d'au moins 100.

² Dans un mode classique d'intervention, en supposant que l'architecte consacre la moitié de son temps à concevoir, soit l'équivalent de 1000 heures, si l'on considère qu'il donne vie en moyenne à un millier de m² par an pro capita, soit environ un millier de tonnes par an, alors chaque heure de conception correspond à près d'une tonne.

Fig. 11. Un tableau rappelant les flux contrôlés par l'architecte selon quatre scénarios distincts d'exercice de la profession [6]

		Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Activité par architecte (production propre)	€/an	40 000 €	60 000 €	90 000 €	140 000 €
Taux honoraires moyen	€/m ² construit	4 %	5 %	4 %	8 %
Part de l'activité conduisant à la construction effective	ratio	80 %	70 %	75 %	85 %
Temps de travail moyen de l'architecture	heures par an	2 200	2 500	2 750	2 000
Part du temps de travail consacré au projet	ratio	40 %	30 %	55 %	60 %
Coût moyen construction	€/m ² livrés	1 200 €	1 400 €	1 200 €	2 200 €
Poids surfacique des m ² livrés	kg/m ²	1 000	850	850	1 400
Énergie incorporée construction	kWh/m ² construit	1 300	1 200	1 600	2 500
Consommation énergétique totale en usage	kWh/m ² par an	120	200	120	200
Durée de vie prévisionnelle avant réhab/démolition	années	40	40	50	20
→ Coût de l'architecture à la livraison	honoraires/m ² livrés →	50 €	70 €	50 €	170 €
→ Coût de l'architecture sur durée de vie	€/m ² .an →	1 €	2 €	1 €	9 €
→ Flux construction livrée par an	k€ de travaux livrés par an →	800	800	1 700	1 500
→ Flux de surface livrée par an	m ² livrés par an →	650	600	1 400	700
→ Débit de surface livrée (par heure consacrée au projet)	m ² livrés par heure →	0,8	0,8	0,9	0,6
→ Débit massique (par heure consacrée au projet)	kg livrés par heure →	800	700	800	800
→ Consommation contrôlée (lorsque l'architecte se consacre au projet)	litres pétrole par heure →	500	800	750	400

Nota : la flèche → mentionne un résultat de calcul

Fig. 12. Affiche du 3^{ème} cycle « Architecture post carbone »



Engagement personnel

Cette responsabilité est au cœur de mon engagement pédagogique, en particulier depuis bientôt cinq ans dans le cadre de la formation de troisième cycle à l'EAV&T, le DPEA Architecture post carbone (Fig. 12), ou encore de l'expérience pédagogique pendant les deux semestres à l'EPFL [8] (Fig. 13). Mais aussi le ressort didactique dans les échanges avec les architectes ou les clients, maîtres d'ouvrage en tant qu'architecte et/ou ingénieur (voir en partie 3). À cette fin, et dans le cadre d'une publication rédigée avec des collègues d'Elioth et d'Egis en 2011, j'écrivais en introduction [9] :

« Pour nos activités de conception en bâtiment, si nous résumons nos interventions à l'échelle de chaque concepteur, nous interviendrons individuellement sur environ un millier de mètre-carré livrés chaque année. Nous avons un impact sur environ 500TEP par an : cela constitue une responsabilité gigantesque ! Prendre conscience et mesurer ce rôle constitue un levier formidable et installe un chantier pédagogique unique pour refonder les stratégies de conception. C'est aussi la preuve que l'investissement dans un peu de matière grise permet sans doute d'économiser beaucoup de kWh... »

La prolongation opérationnelle d'un territoire de recherche

Pour poursuivre cette ambition dans un cadre opérationnel, nous décidons de fonder en 2015, une agence d'architecture connexe à Elioth, intitulée « 169-architecture » (chapitres #22 et #29). Voilà une ébauche de la méthode de travail que j'écrivais au moment de la création de cette structure :

- ① L'architecte fabrique les rapports entre le projet et le soleil, les liens entre le projet et la planète.
- ② Il met en relation le projet avec le soleil et comprend la relation avec la modulation¹ des $169\text{W}/\text{m}^2$. Il analyse les capacités d'usage de la biomasse pour l'édification et de la recyclabilité des composants.
- ③ Il met en relation le projet avec les ressources terrestres : choix de sa matérialité et de leur vie dans le temps.
- ④ Il conçoit la façon dont le projet vivra avec les ressources permanentes d'énergie.
- ⑤ Il anticipe aussi comme le projet sait se protéger d'un trop-plein d'énergie.
- ⑥ Il évalue les impacts sur l'environnement du projet tout au long de sa durée de vie.
- ⑦ Il mesure ce que la planète peut donner au projet et ce que le projet peut proposer en retour.

Stratège ou tacticien ?

Traiter la totalité des enjeux écologiques à l'échelle du projet d'architecture n'est pas chose aisée. La diversité des sujets est considérable ; chacun réclame une expertise, une science pour dessiner, concevoir et proportionner une réponse pertinente. D'autant que les interdépendances sont multiples. Comme pour une partie d'échecs, il faut savoir être à la fois stratège et tacticien. Nous sommes incapables d'envisager tous les coups possibles, de distinguer tous les entrelacs. Les démarches et labels environnementaux tentent de proposer à la fois une *check-list* globale et encouragent aussi à cibler certaines thématiques pour aller chercher des « points » ou des « crédits ». Pour être clair, mes points à moi sont ceux qui seront édictés plus avant, ce seront ceux de l'architecture des cinq chocs. Dans la hiérarchie des urgences, ils sont mes priorités.

¹ En fonction de la situation géographique.

Fig. 13. Poster de présentation des deux semestres de l'atelier intitulé « 2050, sous le soleil exactement », professeur invité à l'EPFL

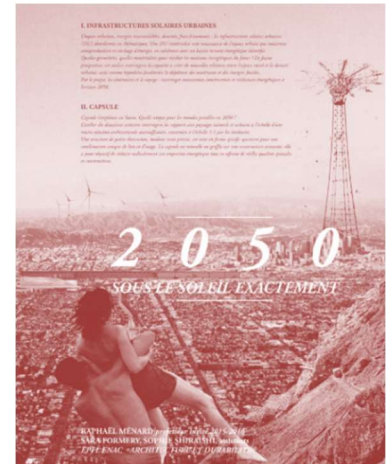


Fig. 14. *La couverture du Water Atlas de Pietro Laureano [10]*

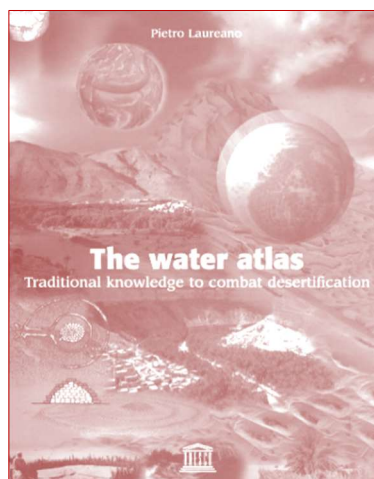


Fig. 15. *Les ingrédients de l'édicule Marguerite de Navarre (chapitre #29)*

Ingrédients matière & valeurs carbone	
pour ce projet par 169–architecture	
Teneur matière	% en Volume
Acier 6000 kg	2 %
Bois 29,5 m ³	91 %
Verre 260 m ²	6 %
Teneur carbone	
Emissions CO ₂	16 800 kg eq. CO ₂
Stockage CO ₂	-26 550 kg eq. CO ₂

Une matière particulière, l'eau

Aussi, il serait tout à fait légitime de me reprocher de nombreuses impasses et beaucoup de sujets passés sous silence dans ce texte. En tout premier lieu, une matière bien singulière, l'eau, évidemment indispensable à la vie, aux activités humaines et tout simplement aux espaces de l'architecture. En 2035, les projections statuent sur une humanité qui vit aux trois quarts à moins de cent kilomètres des rivages¹, et rappelons que les villes se sont établies de façon préférentielle à proximité des cours d'eau. L'eau est un enjeu géostratégique majeur, tout comme l'accès aux énergies fossiles ou les matières premières. Pour explorer plus avant ce magnifique sujet, je vous recommande la lecture du *Water Atlas* de Pietro Laureano [10], conseil de lecture de l'architecte Pierre Frey pendant son intervention lors de mon atelier à l'EPFL (Fig. 14).

L'eau est au cœur des trois piliers de ce mémoire : l'eau et la matière, ou comment cette molécule intervient dans la plupart des processus de transformation de la matière ; l'eau et l'énergie : elle est une source froide importante pour nos sociétés thermo-industrielles, pour le refroidissement de nos centrales thermiques ou thermo-nucléaires ; elle est aussi un gisement énergétique (nous le verrons plus loin dans le chapitre qui y est consacré dans le #8) ; enfin l'eau et le climat dont les vertus sont déterminantes pour atténuer et créer des ambiances hygrothermiques favorables à l'architecture (chapitres #18 et #27 notamment), pour profiter notamment de ces capacités de stockage thermique sensible et latent.

Les ingrédients du plat architectural

Dans la jungle de l'écologie, surgit le félin s'adressant à l'architecte : quels matériaux as-tu choisis pour penser ton projet ? As-tu scruté la diversité des impacts de tes choix ? Comme lorsque nous décidons de renoncer à des produits contenant de l'huile de palme parce que la production de cette dernière concourt à la déforestation, peut-on attendre et espérer des comportements analogues de la part des concepteurs ? Évidemment oui, et dans ce cadre, les analyses de cycle de vie² seraient *l'alpha et l'oméga* pour composer nos « mets architecturaux ».

Nous verrons plus loin comment les utiliser ou plutôt comment hiérarchiser les critères. À ce stade, énonçons une première règle : il y a urgence à relocaliser les composants de l'architecture. Il en sera particulièrement question au temps VI, époque de l'architecture-matière (#17) ou par l'exemple dans le projet des Montagnes Solaires (#25) ou celui de l'édicule de la place Marguerite de Navarre à Paris (#29) (Fig. 15).

¹ Simon K. Haslett, *Coastal Systems*, Routledge, 2009.

² Les ACV ou analyses de cycle de vie.

L'intensité carbone de l'économie de l'architecture

Autre difficulté pour opérer la mutation vers une urgente construction à très bas carbone, il est important de rappeler le faible effet de levier économique du bâtiment. Le CSTB¹ rappelle qu'en France, le bâtiment ne pèse que 6% du PIB alors qu'il est responsable de près de 40% des émissions nationales de CO₂. Évidemment ces émissions intègrent un PIB compté ailleurs : les 40% contiennent en particulier les émissions de gaz à effet de serre liées à la combustion du gaz et du fioul de nos chaudières et de la consommation électrique en usage du bâtiment².

Ces dépenses-là sont des produits pour les énergéticiens et ne sont pas comptabilisés dans le PIB du bâtiment. Nous reposerons la centralité des questions économiques dans plusieurs chapitres (chapitres #15, #16, #20 et #21). Dans la pratique et mes expériences constructives, elles ont été maintes fois déterminantes notamment pour faire émerger (ou non) certaines inventions comme Wind-it (chapitre #26), les Montagnes Solaires (#25) ou encore la Table Climatique (#29).

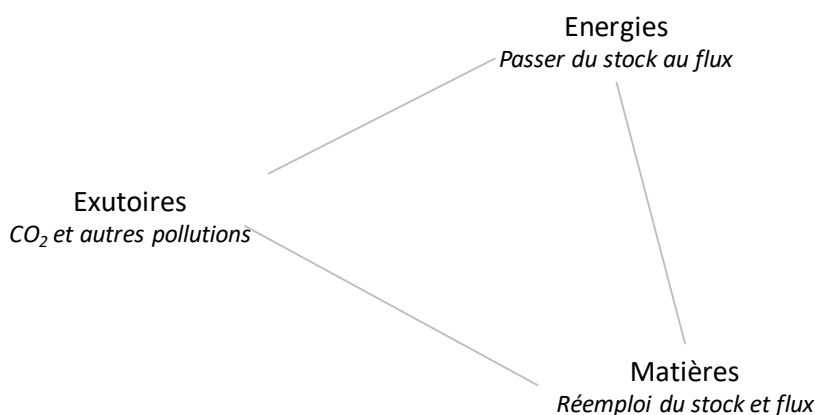


Fig. 16. *Les trois relations*

¹ Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment.

² Même si l'électricité française est faiblement carbonée.

L'architecture des cinq chocs

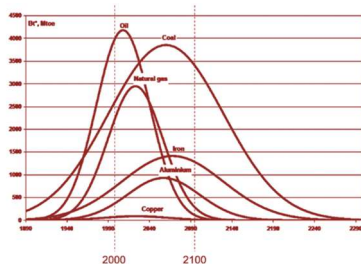
Energie, matière et climat : coïncidence de trois crises

La fin de l'architecture abondante

Fig. 17. Une image tirée de la conférence donnée à l'école de Paris-Belleville en 2007 et intitulée les « 30 pétroleuses ». Extrait de *Koyaanisqatsi* [5]



Fig. 18. Courbes des pics potentiels, d'hydrocarbures comme de certains métaux. Un « Peak of everything » pour ce siècle ?



Point d'orgue dans cette quête : les stocks de matières primaires encore facilement accessibles dans les couches supérieures de la croûte terrestre. Enfant des Trente Glorieuses¹ (Fig. 17), je me suis préparé et résolu aux reliefs escarpés des pénuries à venir. Angoisse symptomatique de l'écologiste ? Notre siècle des pics, qui commencera sans doute par le *peak oil*² enchaînera sur les pics des autres énergies fossiles³ en traversant les dépletions de certaines matières comme le sable [11].

Peak of everything

L'auteur de *L'Âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable*, Philippe Bihoux parle du *peak of everything* [12] (Fig. 18). Crises de l'énergie et tensions sur les matières, l'architecture sera le point focal de ces profondes mutations. Sera-t-elle le robuste abri des chocs à venir ? Il est certain que théories et pratiques architecturales seront profondément modifiées par ses évolutions irréversibles⁴.

Dans la droite lignée des modélisations systémiques du *World 3* de l'équipe Meadows, les parents du fameux rapport *Limits to Growth* de 1972 [13], les collapsologues⁵ Servigné et Stevens élaborent des scénarios probables de krachs démographiques qui pourraient être violemment soudains et très proches dans le temps⁶ [14].

Les trois crises

Appréhender ces trois crises systémiques simultanées : toutes trois se situent à des points de non-retour pour différentes natures de stocks. Les temps V (#16), VI (#17) et VII (#18) sont en relation avec chacun des thèmes de ces crises et ne correspondent pas à des périodes séquentielles mais davantage à des chevauchements, à des intrications se déroulant sur une centaine d'années.

¹ Jean Fourastié a mis fin aux Trente Glorieuses en 1973 au moment de la première crise pétrolière.

² Le pic de la production pétrolière sur lequel nous nous trouvons peut-être déjà.

³ Comme le gaz et un jour, le charbon.

⁴ En parallèle, et selon un scénario tendanciel, la population mondiale devrait aussi se stabiliser au cours de ce siècle.

⁵ Voir leur site dédié à ce sujet : <http://www.collapsologie.fr/>

⁶ Yves Cochet dans un texte paru dans *Libération* en 2017 pronostiquait un effondrement global et systémique pendant les années 2020-2030. Voir son interview : <http://bit.ly/2q1m0xd>

Temps V : l'architecture-énergie (chapitre #16)

La première crise est relative aux réserves énergétiques, et plus particulièrement aux hydrocarbures, qui assurent encore plus des quatre-cinquièmes de nos besoins énergétiques. Or, bientôt ces stocks fossiles ne seront plus [15, 7, 13, 24]. Ce sera le temps V (#16), époque non achevée de l'exploration d'architectures, d'aménagements paysagers, de modèles urbains qui seraient autonomes pour leurs besoins énergétiques, et affranchis des énergies fossiles.

Temps VI : l'architecture-matière (chapitre #17)

La deuxième crise a trait à la finitude de nos matières constructives et à la dispersion de leur qualité. D'ores et déjà, les stocks de matières primaires facilement accessibles appartiennent au passé [12]. Ce sera le thème principal du temps VI (chapitre #17) de l'architecture-matière testant les modèles de constructions renouvelables, faites de réemploi, anticipant leur ruine et leur propre disparition.

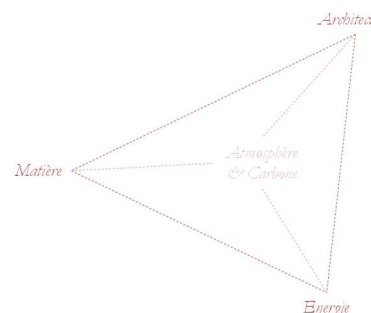
Temps VII : l'architecture-climat (chapitre #18)

Et enfin, la dernière crise concerne non pas un manque mais un trop-plein, celui de la pollution de notre atmosphère par le dioxyde de carbone. Pour la première fois depuis 2015, la concentration en CO₂ dans l'atmosphère a dépassé le seuil des 400 parties par million (ppm). Or, ce gaz, même très dilué, modifie le bilan énergétique global de la surface d'une Terre prise en étau entre une source chaude (le Soleil) et une source froide (le reste du cosmos) avec pour conséquence un réchauffement global de l'atmosphère et des océans (la température moyenne terrestre comme l'une des pseudo-constantes de l'architecture, chapitre #19). Nous aborderons les conséquences du changement climatique, ce sera le point d'orgue du temps VII (#18), l'architecture neutre en carbone et préparée aux chocs à venir.

Simultanéité des chocs

Cette triple mutation est fortuite, ces crises auraient ne pas être simultanées. Mais cette trinité questionne avec une gravité renforcée l'urgente redéfinition des modes de vie à presque huit milliards d'individus, *a fortiori* au sein des sociétés qui ont une responsabilité historique dans ces transformations culturelles et écologiques [16]. Dans cette fresque historique compacte, le passé nous éclairera peut-être : au cours des épisodes précédents, le temps II (#7) et le temps III (#9) notamment, les tensions énergie-matière ont régulièrement eu cours en particulier autour de la matière bois valorisable comme matière constructive ou comme combustible. Au cours du 17^{ème} et 18^{ème} siècle, ce fut largement le cas en Europe, en France et en Angleterre. La trilogie *énergie-matière-architecture* mettra en évidence le maillage entre ces trois crises, leur caractère systémique et global (ce qui n'était pas le cas des crises antérieures, qui restaient régionales). Elle placera au centre de nos préoccupations la question atmosphérique, climatique et celle du carbone (Fig. 19).

Fig. 19. Le tétraèdre des relations entre l'architecture, la matière, l'énergie et l'atmosphère.



Les conditions aux limites de l'architecture du temps VII

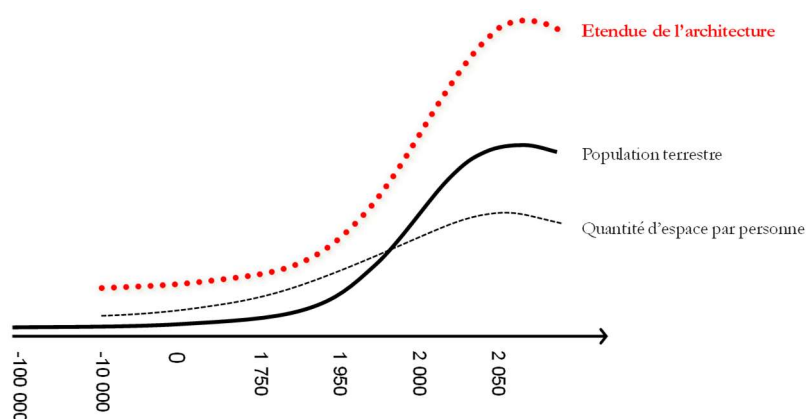
Ainsi s'élabore notre programme : proposer une somme d'éclairages afin d'esquisser la perspective d'une autre modernité. Une modernité qui aurait pris conscience suffisamment à temps des *conditions aux limites* de notre usage collectif du monde, et plus particulièrement de ses ressources finies. Après la certitude de l'impasse, il s'agit de faire rapidement machine arrière, dézoomer pour mieux prendre conscience et alors repartir en marchant sur le fil, selon un usage informé, proportionné et mesuré des sciences et des techniques.

D'un point de vue théorique, et à l'aune de ces trois enjeux - finitude des stocks d'énergie (i), pénurie de matières (ii) et pollution atmosphérique générée par les gaz à effet de serre (iii) -, reconnaissons que l'architecture n'a que peu embrassé ces questions et sans l'élan suffisant, une vitesse de libération qui aurait permis un changement de paradigme à la fois conceptuel et théorique (Fig. 19). Méthodes, procédés constructifs, façons d'enseigner et de transmettre l'architecture : nous aurions pu rêver de transformations profondes. À son échelle, de façon modeste, ce mémoire posera quelques questions et exemples dans ce sens.

Des essais par l'exemple : une mise en abîme personnelle

Ce mémoire citera abondamment des expériences architecturales et des références tentant de « montrer quelque chose », de proposer des pistes de solutions en écho aux limites écologiques planétaires. Ces expériences concrètes ou théoriques resteront cependant des réponses spécifiques et des solutions locales¹. Elles seront résumées dans la troisième partie, à travers les « Projets illustrés » ou dans les « parties rosées », faisant directement référence à des expériences personnelles (Partie 3. Projets illustrés, à partir du chapitre #23).

Fig. 20. Le « pic de l'architecture » est-il atteint ? La somme des surfaces bâties dans le monde sera tôt ou tard atteinte, et sans doute pendant ce siècle. [6]



¹ Mais il est important de rappeler l'histoire de la contre-culture américaine des années 1960-1970 et celle de l'architecture et de l'urbanisme solaire, #15.

Démographie et numérique

L'extension finie de l'architecture

Quoiqu'il en soit, la fin de la croissance démographique conduira inéluctablement à une stabilisation, voire à une décroissance de la somme du clos et couvert mondial. Nous traverserons prochainement le maximum des surfaces bâties. L'humanité atteindra tôt ou tard le point culminant du stock vivant d'architecture¹ [6]. L'architecture, art conquérant, d'une humanité bâtisseuse, discipline amoureuse de la croissance et de la reconstruction, devra malgré elle, apprendre à devenir un art de la décroissance. Après le pic, le futur de l'architecture sera davantage structuré par les enjeux de transformations et de renouvellements que ceux de l'édification neuve (Fig. 20). L'architecture deviendra l'art de la déconstruction, de la « remise en ordre de la matière », comme un film visionné à l'envers [17].

Échelle et proportion

Lors d'une conférence², Pascale Jouffroy rappelait la citation de Yona Friedman dans *L'architecture de survie* [18] qui soulignait l'importance du rationnement (Fig. 21).

« Mon intention n'est pas d'idéaliser le bidonville, ni le pauvre, ni le peuple. Ce que j'espère, par contre, c'est relancer l'idée de rationnement, donc l'idée d'un stock limité, et l'idée d'un rationnement juste, donc l'idée que le rationnement doit être décidé par ceux qui en supporteront les conséquences. »

Nous verrons aussi comment la question de la « bonne échelle » et de la « bonne proportion » des choses conditionne inévitablement la permanence de l'architecture et de la vie sur Terre [19] : tels sont les sous-jacents fondamentaux des enjeux écologiques (chapitres #19, #20 et #22). Je viens aussi que cette question métrique est au cœur de ma culture scientifique et de ce plaisir de la mesure et de la quantification.

Le cinquième choc du savoir

Notre époque est chahutée par un ultime bouleversement : le numérique, notre relation à la mémoire, au savoir et à l'information. En 2015, dans le texte accompagnant notre *Fabrique de la Renaissance* pour le concours EDF Bas Carbone, ce récit prospectif pour 2050 questionnait la béatitude pour la *data*, les pamoisons pour le *smart* [22] :

« En 2012, le philosophe Michel Serres écrivait avec la finesse de son humanité bienveillante et éclairée un très beau texte intitulé « Petite Poucette ». Cet écrit, plein d'optimisme, mettait en confiance le lecteur sur les mutations qui étaient à l'œuvre avec une « pensée 2.0 ». Il avait sans doute raison mais on comprit aussi que la « pensée de la main », l'artisanat, le jardinage et de façon générale le lien au réel était aussi porteur du lien citoyen, de la conscience écologique et du réveil démocratique. »

Fig. 21. Yona Friedman



¹ Comprenant dans ce lot une très grande quantité d'abris informels.

² *Le paradoxe du poêle. Petites leçons du bidonville.* Leçons du mardi post-carbone, EAV&T, 15 novembre 2016.

Un Modulor écologique

Depuis lors, je m'emploie à cette synthèse entre les évangiles de la Modernité tels qu'ils m'ont été enseignés à Paris-Belleville ; et de l'autre, par mes acquis sur le tas, autour des questions d'énergie, de matière et de climat. Déterminer la bonne échelle d'une structure (#24, #25 et #26), parvenir à la juste dimension d'une baie (#15) : les enjeux écologiques proportionnent l'architecture avec les constantes caractéristiques de l'habitat terrestre. Le chapitre de la deuxième partie, consacré aux constantes de l'architecture, précisera cette question (#19).

Comme tout premier exemple, concernant le changement climatique, deux grandeurs sont aujourd'hui essentielles. Un terrien émet en moyenne annuellement plus de six tonnes de CO₂ (un Européen deux fois plus) [20]. Pour les émissions négatives, et à défaut d'une découverte technologique qui se fait attendre, une forêt durablement exploitée permet de séquestrer un peu plus de trois tonnes de CO₂ par an et par hectare [23]. Ces deux nombres sont les fondations de notre comptabilité carbone, pour une urgente mise à l'échelle et la nécessité d'arriver rapidement à un monde neutre en émissions, voire négatif vers la fin de ce siècle (#22). En 2006, la lecture du *Plein s'il vous plaît* de Jancovici et Grandjean [24] a renforcé ma conviction que la soutenabilité de nos modes de vie résidait dans les ordres de grandeur et dans la bonne évaluation d'un phénomène ou d'un comportement.

Panthéon des géomètres

Sur les échelles physiques, la lecture de d'Arcy Thomson a été déterminante [25], tout comme le visionnage à maintes reprises du *Power of Ten* par les Eames [3]. De façon plus poussée, les recherches de formes optimales, les invariances d'échelle sont des thématiques d'exploration tout à fait fascinantes, elles rejoignent les enseignements passionnants reçus à l'École Polytechnique en physique statistique. Ces notions sont d'ailleurs très bien introduites par la géographe Denise Pumain [26] :

« Pourtant, des physiciens et des biologistes nous alertent quant à la non-linéarité de certaines lois d'invariance d'échelle. Il se produit parfois des variations systématiques du rapport entre la taille d'un élément et celle d'autres éléments ou de l'ensemble du système, telles que ces quantités n'évoluent plus dans un simple rapport de proportionnalité, mais selon des lois de puissance. C'est ainsi que depuis d'Arcy Thompson, la notion de croissance allométrique est bien connue en biologie, et les objets fractals ont fait irruption avec pertinence dans maintes disciplines. Présentons ces modèles connus sous l'appellation de « scaling laws » ou lois d'invariance d'échelle, qui décrivent la forme que prend la relation statistique entre deux variables mesurées sur des objets à des échelles différentes (West, 1988). »

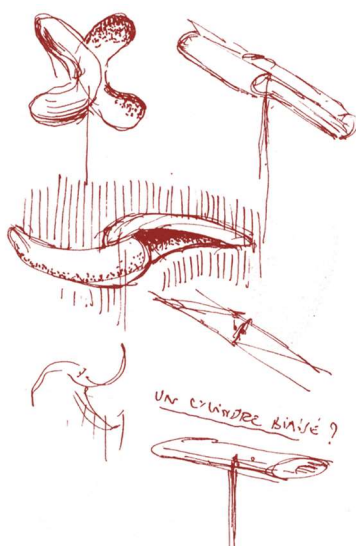
Dans ce mémoire, en plus des échelles et des proportions de l'espace, la question du temps sera cruciale. Paramètres fondamentaux de la soutenabilité, les questions de durée de vie et d'obsolescence seront abordées (chapitres #5 et #20).

La bonne proportion en question

Sur les questions d'échelles (d'espace et de temps), je me focaliserai particulièrement sur les énergies renouvelables, objets d'investigations personnelles tant théoriques (chapitres #8, #10, #11, #13 et #15) que pratiques (#23, #25 et #26). Pour accélérer la transformation d'un « monde fossile » à un « monde renouvelable », il faut être scrupuleux sur les coûts matière et carbone de ces nouvelles infrastructures de production d'énergie et de matière.

Cela fera l'objet de plusieurs discussions en étudiant le « rapport poids-puissance » des objets, en analysant le « temps de retour carbone » (une notion développée en chapitre #20) ou encore en interrogeant les « dimensions optimales » d'une éolienne par exemple, point d'étude semble-t-il peu abordé (chapitre #26).

Fig. 24. Des recherches autour de petites éoliennes



Quelle est la bonne échelle ?

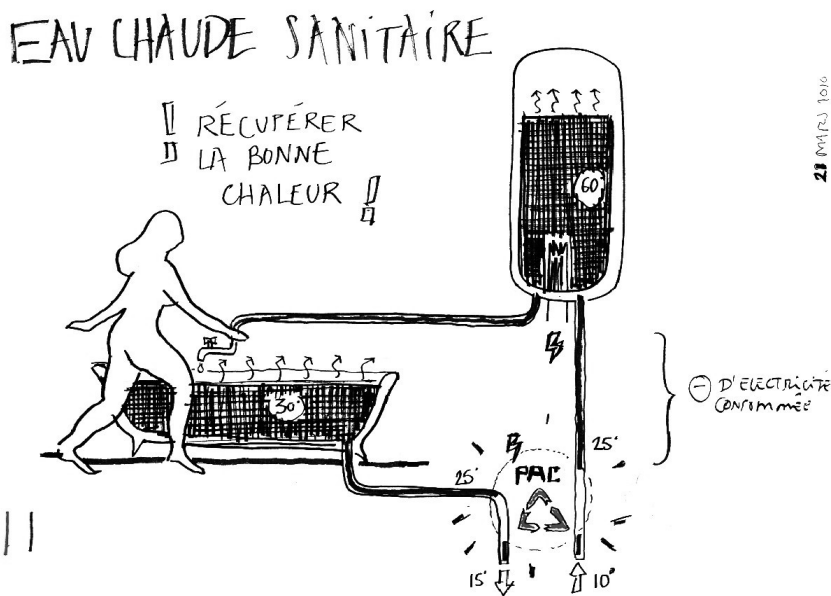
Enfin, depuis une quinzaine d'années, je m'interroge comme tout le monde sur la hiérarchie de mes priorités. J'ai une certaine propension à la dispersion et il est souvent nécessaire que je mette à jour les thématiques sur lesquelles me concentrer. Je ne suis jamais parvenu à arbitrer sur la bonne échelle. *Penser global, agir local*, mais à quelle échelle, à quelle *Power of Ten* ? Dans un article pour *l'Architecture d'aujourd'hui* en 2011 [27], j'interpellais sur une transposition des réflexions d'efficacité énergétique à l'échelle du mobilier et des équipements :

« Mon analyse de la valeur ou vers l'éco-rénovation pour les Nuls. Le « *Changer d'ère* » du bon docteur Ademe nous présente ses méthodes de vaccination énergétique. Au-delà de certaines rénovations longues, coûteuses et parfois aux résultats incertains, n'y a-t-il pas un gisement de micro-rénovations, d'écolo-bricolages qui nous permettraient de faire la chasse au gaspi avec une efficacité d'investissement redoutable ? Condition nécessaire : un (très) bon diagnostic ou comment faire une simulation thermique dynamique pour tout le monde. La version web du *Clim'Elioth* est en cours : son interface et sa sortie graphique permettront un jour les arbitrages de tous les foyers (et/ou comment une bonne paire de doubles rideaux présente une très bonne efficacité d'investissement !). »

Cette hypothèse s'est traduite ensuite par un travail commun avec Jean-Sébastien Lagrange, un designer avec qui j'avais d'abord travaillé autour de la maquette fonctionnelle de la Montagne Solaire en 2008 (chapitre #25). Au cours d'un déjeuner, je proposais à Jean-Sébastien de réfléchir ensemble à du mobilier efficient, devenu ensuite l'initiative ZEF pour *Zero Energy Furniture* et notamment la Table Climatique (#28). L'idée sous-jacente était la suivante : miser petit (plutôt que gros) au « poker du carbone » (Fig. 25).

« L'architecture est un jeu [...] » disait Corbu, elle serait davantage un pari. En se bâtissant, elle émet une dette écologique qu'elle doit tacher de rembourser le plus tôt possible, en générant le maximum d'usages, de vies, de plaisirs et plus prosaïquement d'énergie, voire de matières et d'émissions négatives carbone, si tant est que cela soit physiquement possible. L'architecture est un risque en puissance, avec l'espérance de gains globaux bien supérieures à la mise initiale. Le « poker du carbone », c'est la même chose, selon un paramètre, une « monnaie » particulière et nous avons intérêt à faire les meilleurs paris, vu l'urgence climatique (chapitre #18).

Fig. 25. Une proposition générique pour la petite échelle : la récupération de chaleur sur l'eau extraite de la baignoire.

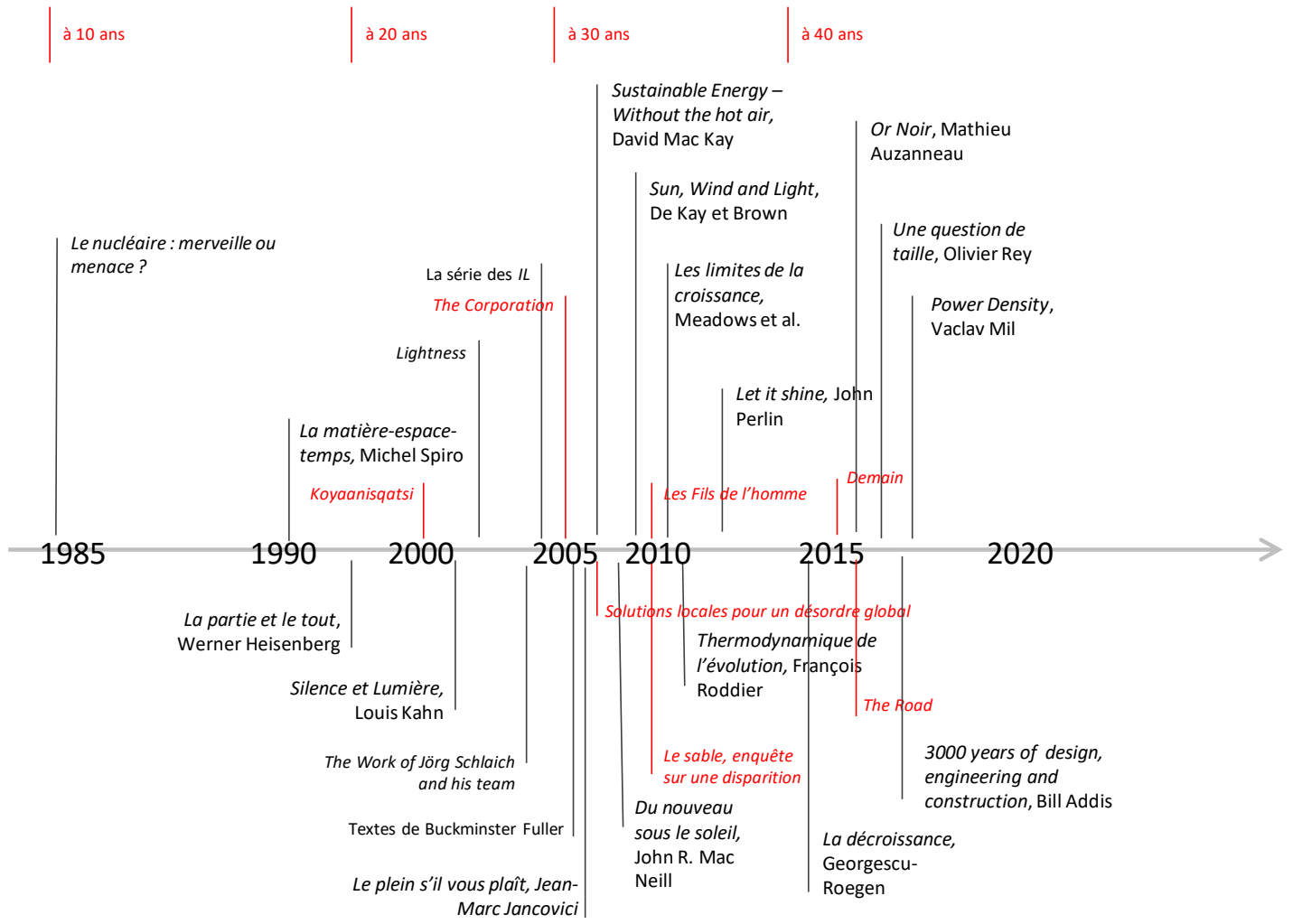


Bibliographie

1. ALONZO Eric, *L'architecture de la voie. Histoire et théories*, Éditions Parenthèses, 2017
2. RICCIOTTI, Rudy, *HQE, les renards du temple*, Edition Al Dante / Clash, 2009
3. EAMES, Charles, Ray, *Powers of Ten*, 9 minutes, 1977
4. MENARD Raphaël, « Mutations des programmes » (p27 à 31), dans *Architecture = durable*, Catalogue de l'exposition du Pavillon de l'Arsenal, 2008
5. REGGIO Godfrey, *Koyaanisqatsi*, 1983
6. MENARD Raphaël, « Le pic de l'architecture », pp161-168, *Matière Grise*, Direction de l'ouvrage Encore Heureux, architectes, Edition et distribution exclusive, Pavillon de l'Arsenal, 2014
7. AUZANNEAU Mathieu, *L'or noir, la grande histoire du pétrole*, La Découverte, 2015
8. MENARD Raphaël et al., *Les infrastructures solaires urbaines, 2050, sous le soleil exactement*. Cours donnés dans le cadre de l'atelier de master. Synthèse des quatre projets rendus par les équipes d'étudiants et dix fascicules des cours associés à l'atelier autour des questions de futurs, de formes et d'énergie. EPFL, 2015.
9. MENARD Raphaël et al., *Petit manuel pratique de transition énergétique pour le bâtiment et la ville, Convictions et solutions d'ingénieurs-concepteurs*, Egis, 96 p, 2013
10. LAUREANO, Pietro, *Water Atlas*, Bollati Boringhieri, 2001
11. DELESTRAC Denis, *Le sable, enquête sur une disparition*, 2013
12. BIHOUIX Philippe, *L'âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable* Seuil, Anthropocène, 2014
13. MEADOWS Donella H., RANDERS Jorgen, MEADOWS, Dennis. *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*, Rue de l'échiquier, 2012
14. SERVIGNE Pablo, STEVENS Raphaël, *Comment tout peut s'effondrer. Petit manuel de collapsologie à l'usage des générations*, Seuil, Anthropocène, 2015
15. COCHET Yves, *Pétrole Apocalypse*, Fayard, 2005
16. MALM Andreas, *L'anthropocène contre l'histoire. Le réchauffement climatique à l'ère du capital*, La Fabriques éditions, 2017
17. ROTOR, *Déconstruction et réemploi. Comment faire circuler les éléments de construction*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2018
18. FRIEDMAN, Yona, *L'architecture de survie*, Ed. Casterman, 1978
19. REY Olivier, *Une question de taille*, Stock, 2014
20. IPCC, *Climate Change 2014 Synthesis Report, Fifth Assessment Report (AR5)*, 2014
21. GHYKA Matila C., *Le Nombre d'or. Rites et rythmes pythagoriciens dans le développement de la civilisation occidentale*, Gallimard, 1976 (1931)
22. MENARD Raphaël, *La Renaissance des Fabriques. Un monde possible en 2050*, 2015
23. MENARD Raphaël, DOSSIER Julien et al., *Paris, change d'ère. Stratégie de neutralité carbone de Paris en 2050*, Elioth, 2016

-
24. GRANDJEAN Alain, JANCOVICI, Jean-Marc, *Le plein s'il vous plait*, Seuil, 2006
 25. THOMPSON D'Arcy, *On Growth and Form* (en français *Forme et Croissance*), 1917
 26. PUMAIN Denise, *Lois d'échelle et mesure des inégalités en géographie*, 2007. <https://ress.revues.org/193>
 27. MENARD Raphaël, « Un Petit Dessin vaut mieux qu'un long discours » (p64 à 71), Perspectives Durables, *L'Architecture d'aujourd'hui*, 2011

Fig. 26. Frise de lectures et de visionnages marquant. Une représentation de la bibliographie présentée à la fin. Une histoire de mes lectures (en noir) et des films ou documentaires (en rouge)



#3 Thermodynamique

La Terre, système thermodynamique à la fois ouvert et fermé. Une introduction aux principes de la thermodynamique et un début d'application à l'architecture. L'architecture, un « code construit ». Une formulation des transitions nécessaires de l'architecture pour coller aux évolutions énergie-matière-climat de la Terre. Le cycle de l'architecture dans le diagramme énergie-matière et selon les sept temps.

Système ouvert, système fermé

Fig. 27. *Un bocal fermé, écosystème ouvert pour l'énergie (la lumière y pénètre) mais en vase clos du point de vue de la matière*



La thermodynamique en quelques mots

La thermodynamique est une branche de la physique qui étudie le comportement thermique des corps et les mouvements de chaleur. Cette discipline est fille des révolutions industrielles (#12) et a connu son plus grand essor au cours du 19^{ème} siècle : elle devenait l'outil conceptuel pour concevoir et développer la forte croissance du bestiaire des machines thermiques. De façon générale, la thermodynamique s'intéresse à l'étude de l'énergie et de ses transformations. Elle étudie les transformations des systèmes : ouverts ou fermés (selon qu'ils échangent ou non de la matière avec l'extérieur) (Fig. 27) ; isolés ou non (selon qu'ils échangent ou non de l'énergie avec l'extérieur).

Les équations d'état sont une partie du formalisme mathématique utilisé pour analyser ces systèmes, représentés par des variables d'état (intensives ou extensives). La température est une valeur intensive essentielle à la discipline. Volume, masse, énergie ou entropie sont d'autres exemples de grandeurs thermodynamiques dites « extensives ». Dans le rapport final de *Reforme* en 2014, nous testions d'ailleurs une transposition des variables d'état à l'échelle d'un système territorial [1].

L'architecture, art systémique

Les conditions aux limites de l'architecture

Après *Reforme* [1], ce mémoire tente à nouveau de soumettre l'architecture au crible analytique de la thermodynamique ; examiner si ce canevas dégage des conclusions commodes, permettant ainsi à tout concepteur de former des stratégies plus évidentes. Pour les sciences économiques, dans les années 1970, Nicholas Georgescu-Roegen avait ébranlé l'édifice de l'économie dite classique, en y adjoignant les contraintes environnementales, les limites du système terrestre [1]. Ainsi était née la thermo-économie :

« La thermodynamique et la biologie sont les flambeaux indispensables pour éclairer le processus économique [...] la thermodynamique parce qu'elle nous démontre que les ressources naturelles s'épuisent irrévocablement, la biologie parce qu'elle nous révèle la vraie nature du processus économique »¹

A la même période, dans la filiation de Jay Wright Forrester, le père de la dynamique des systèmes, le prospectiviste Joël de Rosnay échafaudait sa vision systémique dans *Le Macrocosome* (1975) [3]. Le paradigme mécaniciste commençait à se fissurer, comme la croyance dans le positivisme, celui d'un progrès continu, d'un destin prométhéen d'une humanité qui se libérerait par la science et la technique (#12 et #14).

Architecture et thermodynamique

Il est essentiel que l'architecture incorpore les notions fondamentales de la thermodynamique. L'origine de ce texte doit d'ailleurs beaucoup à une lecture importante, celle de François Roddier et sa *Thermodynamique de l'évolution* [4], ouvrage que me conseilla Yves Cochet lors de nos échanges autour des prémices des travaux de notre équipe *Reforme* (2011) [1]. Ce mémoire tachera d'en donner des illustrations simples en décomposant le mouvement selon une trentaine de chapitres numérotés (selon la notation suivante, #N).

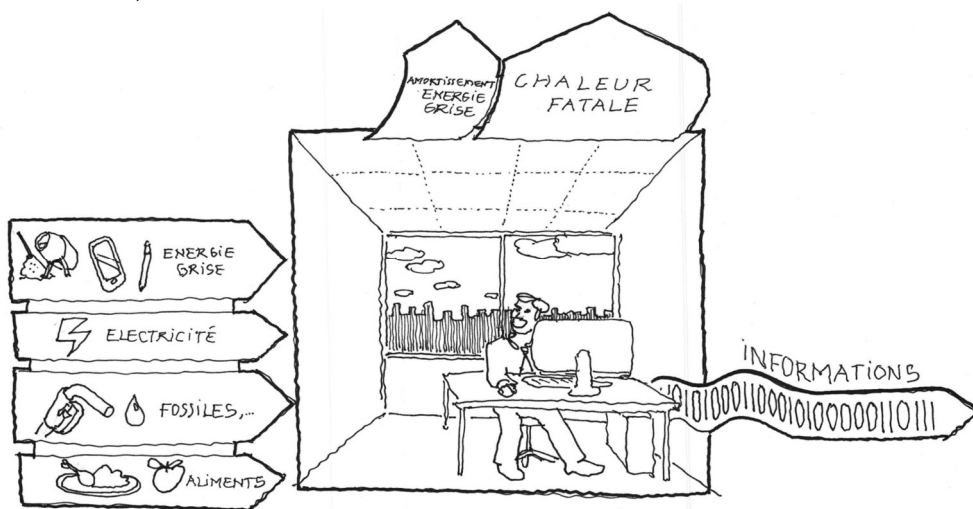


Fig. 28. Un bureau, une cellule de l'espace tertiaire comme un système thermodynamique. Dessin illustrant l'article « Don Draper, la voiture et le climat » [5].

¹ Nicholas Georgescu-Roegen, *The Entropy law and the Economic Process*

Energie : la Terre est un système ouvert

Sous un feu à plus 5500 degrés

La thermodynamique distingue deux types de système. Ceux qui sont fermés et qui n'échangent rien avec l'extérieur (ni matière, ni énergie, ni information). Ceux qui à l'inverse, sont ouverts et autorisent des échanges avec l'extérieur du système étudié (Fig. 28). Selon cette distinction, la Terre possède des propriétés particulières, rappelées par François Roddier [4] :

« Clairement, la vie ne serait pas possible si la Terre était un système fermé. Elle ne l'est pas. Elle reçoit en permanence un flux d'énergie du Soleil sous la forme d'un rayonnement lumineux, pour la majeure partie visible, et remarquablement constant. Elle réémet cette énergie dans tout l'espace sous la forme de rayonnement infrarouge. Autrement dit, elle est traversée par un flux permanent d'énergie. [...] »¹

Le bain d'exergie extra-terrestre

Dans son ouvrage de 1979 [1], le mathématicien et économiste Nicholas Georgescu-Roegen rappelle que d'un point de vue énergétique, la Terre est un système ouvert. Notre planète est constamment arrosée du flot de puissance issu du soleil. Située à une distance d'environ huit minutes-lumières, la Terre reçoit un riche rayonnement électromagnétique, dont l'essentiel du contenu énergétique est situé dans le rayonnement visible et l'infrarouge² (#19). La température équivalente de ce rayonnement est proche de 5500 degrés Celsius. D'un point de vue thermodynamique, cette haute température permet de bénéficier d'un flux de haute qualité (cette notion sera précisée en #10).

Pile à la bonne place, entre une source chaude et une source froide

La Terre ne reçoit qu'une infime proportion du feu solaire. Cependant ce flot permanent de puissance permet d'assurer une température moyenne environ 285 degrés³ plus élevés que le « grand froid intersidéral ». Il règne sur notre planète une température de l'ordre de +15°C, alors que le froid cosmique est à -270°C. Première mise à l'échelle, proportion énergétique liminaire, cette « douche de puissance » arrosant continuellement notre disque terrestre correspond à plus de dix mille fois aux besoins humains au début de ce troisième millénaire⁴. La consommation totale d'énergie primaire du monde ne correspond qu'à 0,03% du flux solaire reçu à la surface du globe.

Fig. 29. Extrait du film *The Road*.



¹ *Thermodynamique de l'évolution*, p28

² Et aussi marginalement dans l'ultra-violet.

³ Il règne sur Terre une température moyenne d'environ 15°C (rappelons que cette grandeur est croissante par le réchauffement climatique), soit 288K à comparer aux 3K du vide intersidéral.

⁴ Environ 15 TW en 2016 comparés au 175 000 TW de flux primaire (avant la traversée atmosphérique).

Et si le robinet énergétique était fermé ?

Quand le soleil n'est plus ou si ce flux ne parvient plus à traverser le ciel, le tragique scénario d'anticipation décrit dans *The Road* s'amorce [6]. C'est le récit de l'espérance de vie très limitée des derniers humains lorsqu'ils ne peuvent plus se nourrir que des dernières miettes de stock, d'une canette de soda délaissée dans un distributeur à l'abandon (Fig. 29). Absence de flux solaire, fin de la photosynthèse, arrêt de la chaîne alimentaire et de la cascade énergétique des métabolismes du vivant. Sans flux d'énergie, le moteur de la vie s'arrête. A plus modeste échelle, et pour faire comprendre cette brutale causalité, François Roddier prend l'exemple de l'arrêt des boucles convectives (Fig. 30) dans une casserole d'eau bouillante lorsque le feu est éteint [4].

Un système heureusement ouvert

Comme nous le verrons plus tard, alors que l'architecture contemporaine concentre une grande partie de ses efforts sur l'efficacité énergétique (chapitre #16), il est aisé de capter le flux permanent sans pomper sur les stocks, sans puiser dans les réserves d'hydrocarbures, sans extirper de l'énergie de ses batteries souterraine, *back-up* idéal. Malheureusement en deux siècles à peine, ces piles de secours, cadeau du vivant passé, auront été dilapidées pour des croissances très transitoires et fortement hétérogènes sur le global (#14) (Fig. 31). Heureusement, des architectures dont les besoins seraient couverts exclusivement par les énergies renouvelables sont à portée de main, en cette période où elles n'ont jamais été aussi mures et rentables.

Fig. 30. Boucles convectives dans l'eau très chaude au-dessus d'un feu de cuisson.

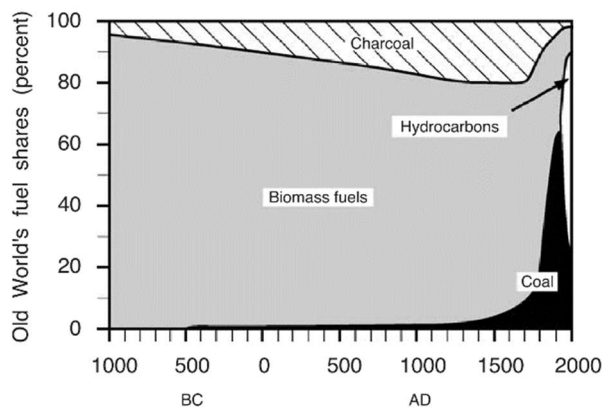
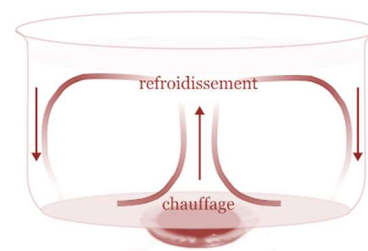


Fig. 31. Diagramme d'évolution des mix énergétiques par Vaclav Smil avec l'expression des bosses successives des transitions.

Repasser d'un monde d'épuisement des stocks à celui de la récolte des flux

Nous nous trouvons au crépuscule du temps V, de cette triade énergie-matière-architecture développée dans ce texte (chapitre #16). Nous abordons une transition mondiale des fossiles vers un mix global d'énergies renouvelables. En ce début de siècle, la révolution solaire frémit enfin. Les articles consacrés à l'énergie éolienne (chapitre #8) et ceux sur le solaire (chapitres #10, #11, #13 et #15) détailleront cet essor. Espérons que cette mutation soit la plus rapide possible.

Souhaitons que l'élaboration de ces nouvelles infrastructures énergétiques, de la plus petite échelle à la plus importante, soient les plus frugales en termes de consommation de matières et de l'énergie nécessaire à leur édification (#21). Tout au long de ce texte, avec entêtement, nous interrogerons ce dilemme : la complexité constructive est-elle toujours adaptée ? (#20). Le jeu technique parfois trop savant en vaut-il « écologiquement » la chandelle ? Nous resterons fixés sur ce cap intangible, désigné par François Roddier [4] :

« Nourrie jusqu'ici par les énergies fossiles, sorte de lait maternel fourni par la Terre qui l'a engendrée, l'humanité a pu se développer. C'est bientôt l'épreuve du sevrage. Devenue adulte, elle va devoir apprendre à se nourrir par elle-même. L'humanité réalisera alors que, seule, l'énergie solaire peut assurer sa survie à long terme. »

Les grands chiffres de notre macrocosme

Les nombres dans le tableau ci-dessous dessinent le « compte de résultat potentiel » de notre vaisseau terrestre. A presque huit milliards, nous pourrions être largement créditeurs. L'énergie coule à flot, le gisement renouvelable est absolument colossal (Fig. 32). Le Sahara reçoit annuellement autant d'énergie que la consommation mondiale d'énergie primaire. Nous sommes à l'aube de l'exploitation de cette ressource aux limites très généreuses.

Fig. 32. Tableau tiré de l'article *Energie, effet de serre et changement climatique* par Valérie Masson-Delmotte, Hervé Le Treut et Didier Paillard dans *L'énergie à découvert, sous la direction de Rémy Mosseri et Catherine Jeandel*. CNRS Editions

		Puissance moyenne en TW
		moy
Nos besoins énergétiques		
	Nourriture des êtres humains	0,75
	Consommation mondiale (autre que nourriture)	16
	Besoins énergétiques futurs (en 2050)	32,5
Les sources primaires d'énergie		
	Le Soleil	175 000
	La Terre (géothermie)	45
	La Lune (les marées)	3,5
		Puissance moyenne en TW
		moy
Quelques ressources renouvelables		
	Photosynthèse globale	200
	... dont biosphère continentale	85
	... dont biosphère continentale déjà utilisée par l'homme	35
	Energie mécanique totale de l'océan	67,5
	... dont vagues côtières	2
	Energie éolienne totale de l'atmosphère	1 250
	... dont disponible sur les continents à quelques dizaines de mètres	35

À une échelle plus modeste, la liste ci-après détaille des explorations que j'ai conduites dans le « zoo des énergies renouvelables », depuis une quinzaine d'années entre les sujets opérationnelles et les recherches conceptuelles (mais sans intégrer dans cette liste les implémentations pédagogiques).

Solaire	Solaire photovoltaïque	Cellter Démon de Maxwell Clip and Clim Verrière au Luxembourg (#23) Wind-it (#26)
	Solaire thermique	Château d'eau du Bel-Air Piles thermiques urbaines
	Solaire passif	Villes Solaires Aléatoires Mobilier Climatique (#28) Gloriette de pare-brise Compacité solaire optimale Brise-soleil magique Maisonnette de Flagy
	Solaire à concentration	Cellter Piles thermiques urbaines Cinématique solaire
	Solaire thermodynamique Biomasse	Montagnes Solaires (#25) Un Acier Héliotrope Montagnes Solaires
Éolien	Axe vertical	Wind-it (#26) Miniguides CMS Togo Eolienne bi-plan
	Axe horizontal	Passerelle de Venlo Démon de Maxwell Piles thermiques urbaines
Global	Mix renouvelable	Infrastructures Solaires Urbaines Projet Reforme Groues 2037 Villes Solaires Aléatoires

La matière : tout a été donné

La matière, un flash d'énergie

La matière est inerte sans énergie. Sans apport, elle reste sans vie et sans capacité de transformation. Sa seule alternative consiste, dans certaines situations de température et de pression, à s'auto-animer par une sorte de *seppuku*, une forme de transition de phase de la matière vers l'énergie. Dans le cas d'une fusion ou d'une fission nucléaire, ces deux principes de réaction génèrent une perte de masse¹. Pour vivre et se construire, l'univers consomme sa propre matière pour régénérer de l'énergie pure. Une sorte de mouvement inverse au *Big Bang*, le retour de la matière en énergie. La matière est un stock d'énergie issu du flash originel. Ainsi la matière doit s'autoconsommer pour s'animer et fabriquer localement des *hyperdensités d'ordre*, des *hypercentres de néguentropies* comme l'est la vie sur Terre et sans doute sur d'autres planètes dans l'Univers. Ce point sera davantage détaillé dans le chapitre consacré au temps zéro (chapitre #6).

¹ Un *défait de masse* comme disent les physiciens.

Fig. 33. Un extrait avec Matt Damon dans *Seul sur Mars*, film de Ridley Scott de 2015, s'employant à faire pousser des pommes de terre en recyclant la matière de ses excréments. Ses serres captent l'énergie du soleil et permettent ainsi la « rotation » du cycle de la matière.



Le tirage des lettres à construire

Pour les briques fondamentales de nos constructions, pour l'ensemble des intrants que nous respirons ou que nous buvons, pour la matière, la Terre est un système thermodynamique fermé. Dans le film *Seul sur Mars* [7], l'astronaute incarné par l'acteur Matt Damon fait l'oppressante expérience d'un système thermodynamique analogue à une échelle beaucoup plus petite (Fig. 33). *Rien ne se perd, tout se transforme*, aphorisme célèbre du chimiste Lavoisier. Comme une micro-écologie circulaire, Matt Damon apprend à ne rien perdre de ses matières fatales pour les retransformer en intrants comestibles, et à cultiver sous serre sa parcelle de patates. La matière « tourne » animée par le flux solaire et nous le préciserons davantage dans le chapitre consacré au temps VI, l'architecture-matière (#17).

Poussières d'étoile

Toutes les matières de la Terre ont été données une fois pour toute, il y a quelques milliards d'années, ces « poussières d'étoile » narrées par l'astrophysicien Hubert Reeves, talentueux pédagogue et écologiste [8]. Les formes et les couleurs des briques de notre *Lego* planétaire ont été déterminés une bonne fois pour toutes (Fig. 34) sans d'ailleurs que le crash d'une météorite ait capacité à transformer cet ordre établi. Dans ce grand tirage d'un *Scrabble* puisant ces lettres-atomes dans le tableau de Mendeleïev, nous savons que l'atmosphère est principalement composée d'azote puis d'oxygène ; la croûte terrestre comporte, elle, majoritairement des atomes d'oxygène, de silicium, de calcium, de fer et de magnésium.

Fig. 34. Composition atomique relative des différentes de la biosphère, d'après Valéro. La biosphère est composée de la lithosphère (les roches), l'hydrosphère (l'eau) et l'atmosphère (air). L'atmosphère constitue une part infime en volume du volume terrestre total (dix milliardièmes) et la masse se compte en partie par millions. Cette prise de recul rend encore plus édifiante la question climatique : l'ajout d'une centaine de ppm (parties pour millions, voir le glossaire) de dioxyde de carbone (CO_2) dans un volume atmosphérique déjà infime met en exergue la fragilité de la permanence de la vie sur Terre. Pour la croûte continentale et océanique, le silicium est largement présent : plus du cinquième en pourcentage.

	Mantle	Oceanic crust	Continental crust	Core	Oceans	Atmosphere	Whole earth
% vol	81,89	0,085	0,44	17,56	0,033	1,48E-08	100
% mass	67	0,072	0,36	32,54	0,023	0,842 ppm	100
O	44,12	44,33	47,25	3	88,889	23,16	30,76
Si	20,89	23,1	27,58	7			16,39
Mg	25,09	4,66	2,65		0,0053		16,82
Al	1,24	8,47	8,36				0,87
Ca	1,49	8,07	4,57		0,0412		1,02
Fe	6,53	8,17	5,13	80			30,43
Ni	0,17	0,3		4,65			1,63
Ti	0,058	0,9	0,42				0,04
Cr	0,169	0,2		0,77			0,36
Mn	0,081	0,11	0,09	0,57			0,24
Na	0,14	2,08	2,37		1,0764		0,10
S	0,01			4	0,0902		1,31
K	0,03	0,12	1,58		0,0398		2,59E-02
U	5E-12	2E-11	1,00E-06				6,96E-12
Th	1,2E-11	4,4E-11	3,50E-06				2,07E-11
Cl					1,9383		4,46E-04
Br							
B					0,0005		1,15E-07
C	0,04				0,0028		2,68E-02
N						75,56	6,36E-08
Rare gases						1,28	1,08E-09

La fin de la « matière facile »

Les matériaux vivent une crise de mutation analogue à celle de l'énergie, tout au moins pour les énergies et matières facilement accessibles et exploitables. Notre époque, qui débutera dès le temps VI, est celle de la déplétion des flux de matières fossiles : sable, minerais, hydrocarbures sont pourtant aujourd'hui les composants fondamentaux de nos modes de construction usuels : bétons, métaux, plastiques issues de la pétrochimie (chapitre #17). Les outils¹ de la *material flow analysis* (ou MFA) permettent de quantifier et de suivre la ponction sur les stocks primaires, puis leur combinaison des stocks transformés puis leur mise au rebut. À l'échelle urbaine, sinon métropolitaine et territoriale, les travaux de Sabine Barles [9] ou ceux d'Ahmed Kahn documentent cette vision systémique des flux de matière, entre ce qui arrive, ce qui sort et ce qui est stocké (Fig. 35).

Le grand mélange, attracteur à entropie

Dans *L'âge des low-tech*, Philippe Bihoux détaille l'entropie de la matière, cette dilution de l'organisation des stocks disponibles [10]. En extrayant massivement les minerais (Fig. 36), en les triant et transformant de façon parfois inefficace, en consommant fugacement les produits finis (et l'architecture en fait partie), nous participons à cette dispersion de la matière. Dans la suite ce texte, nous distinguerons les éléments constructifs facilement recombinaisons, de ceux dont les transformations sont irréversibles (exemple d'un rocher de granit taillé en pièce ou du sable mélangé au ciment et au gravier pour faire du béton). Dual du temps, l'énergie ; dual de l'espace, la matière.

« L'architecture doit être un peu plus végétarienne. Il y a trop de béton et de minéraux dans l'industrie de la construction. Il faut penser comme un cuisinier. Le repas ne peut pas être totalement végétarien ni complètement carnivore. Nous devons atteindre un équilibre entre les minéraux et les végétaux. En plus, nous devons impliquer davantage la campagne et l'agriculture dans l'industrie de la construction. »²

Fig. 35. Le site créé par Elioth pour la Ville de Paris pour illustrer le métabolisme urbain (voir le site www.metabolisme.paris.fr)



Fig. 36. Une mine de fer au Brésil



¹ D'après *How Circular is the Global Economy? An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005*. Willi Haas, Fridolin Krausmann, Dominik Wiedenhofer, and Markus Heinz

² « *L'architecture végétarienne de Simón Velez* », propos recueillis par Jean-Philippe Hugron dans *Le Courrier de l'architecte*, 26 février 2014. Cité dans *Matière Grise*, p87

Trois principes

« Le problème historique n'est donc pas l'émergence d'une « conscience environnementale », mais bien plutôt l'inverse : comprendre la nature schizophrénique de la modernité qui continua de penser l'homme comme produit par les choses environnantes, en même temps qu'elle le laissait les altérer et les détruire. » [11]

La thermodynamique, cadre d'une autre Modernité

L'architecture comme un code

Embarqués dans notre allégorie thermodynamique, tentons cette définition : et si l'architecture pouvait être considérée comme un « état arrêté de la matière », dont la configuration était rendue possible d'une part par l'apport d'énergie, et de l'autre, par un « code »¹, au sens cybernétique du terme, décrivant son arrangement ? Prenons encore l'image du Lego, les briques dépareillées et séparées sur un grand tapis (Fig. 37). Pour générer une construction, il faudra de l'énergie pour chercher chaque brique, puis enclencher une brique dans une autre et encore un soupçon d'énergie pour les mettre en hauteur. Pour diriger ce projet miniature, il faut une partition, un plan de montage : de l'information, ou de l'architecture donc, le chef d'orchestre d'une « synthèse locale de matière et d'énergie ».

L'architecture et l'histoire des sciences

Bible de la Modernité, Siegfried Giedon voulait associer *Espace, Temps* [et] *Architecture* (Fig. 38) avec la nouveauté des sciences qui lui étaient contemporaines [12]. L'architecture devenait l'analogon de la révolution de ce début de 20^{ème} siècle, de la crise de la mécanique classique, ébranlée par les théories relativistes puis quantiques. Dans le domaine de l'art, au berceau de la Modernité, les néoplasticistes comme Rietvelt et les suprématises comme Malevitch revendiquaient la mutation conceptuelle opérée par la relativité restreinte, la symétrie de l'espace et du temps, les transformations possibles de Minkowski dans un espace à quatre dimensions. Je garde à ce propos un très bon souvenir du cours d'histoire de l'art et de la Modernité dispensé² par l'architecte Laurent Beaudoin dans les années 2000.

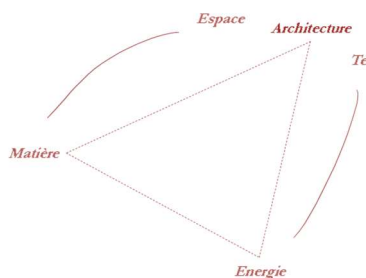
L'ouvroir de la thermodynamique

Mon récit empruntera, lui, davantage à Boltzmann et à Prigogine, figures scientifiques de la thermodynamique sur près de cent cinquante ans, et cette partie de la science est sans doute le cadre d'analyse fécond pour aborder et comprendre notre monde en crise écologique majeure. Je souris en écrivant ces lignes, en me rappelant que la thermodynamique était assurément l'enseignement que je honnissais en classes préparatoires. Depuis, les enseignements de l'ergodicité et de la physique statistique à Polytechnique, puis les lectures de François Roddier [4] et ensuite des théoriciens de l'exergie m'ont finalement réconcilié avec cette discipline.

Fig. 37. Des enfants jouant au Lego.



Fig. 38. La transposition de Giedon



¹ Le projet, la conception, l'intention créative s'élaborant au cours de la construction, etc.

² À l'École d'Architecture de Paris-Belleville.

L'espérance du Green Dream

Ainsi, à travers quelques exemples, ce mémoire tentera de participer à la construction d'un édifice théorique, celui d'une « autre Modernité », de baliser un chemin d'une « Contre-Modernité » pour sortir urgemment de notre impasse, en opérant une petite marche arrière avant de retrouver l'horizon d'un après-crise heureux. J'insiste sur la nécessité de l'optimisme et ne saurais encourager le lecteur à la réjouissante conclusion de Winy Mass, l'un des associés de l'agence d'architecture néerlandaise MVRDV, et de sa *Why Factory* dans leur *Green Dream* collectif [13] (Fig. 39).

Premier principe, la conservation des quantités

L'énergie, ce concept assez récent

L'architecture se nourrit de matières et d'énergie : pour pouvoir être d'abord édifiée, puis permettre ensuite son usage. Il en va ainsi de l'architecture comme de toute chose : les objets obéissent à ce métabolisme des flux d'énergie et de matière. Idem pour le vivant : notre corps réclame de la matière lors de sa croissance¹, et évidemment de l'énergie pour assurer la somme de nos fonctions vitales : thermiques, mécaniques, métaboliques et cognitives. Dans le cas de l'édifice, par écart de langage, on dit qu'il « consomme » de l'énergie, mais il ne fait que transformer de l'énergie : il consomme la *qualité* de l'énergie qui le traverse (chapitre #16). La chose étonnante est que le concept d'énergie est finalement assez récent comme le rappelle le physicien Roger Balian :

« Le concept d'énergie fut introduit en toute généralité en 1847 par Hermann von Helmholtz, médecin prussien (1821-1892) qui se consacra très tôt à la physique et apporta des contributions majeures à la plupart des branches de celle-ci. C'est lui qui émit l'idée que les transformations de la matière traduisent des changements de nature de l'énergie, et que la valeur totale de celle-ci reste conservée. Un apport de chaleur ou de travail à un système aboutit à un accroissement équivalent de son énergie interne. »

Les quantités se conservent mais les qualités se dégradent

L'énergie et la matière se conservent, et cet état de fait correspond à un résumé du premier principe de la thermodynamique, ou comme de façon plus générale, aux lois de conservation en physique. « L'énergie d'un système isolé reste constante au cours du temps. Il ne peut se créer ni se détruire d'énergie, et il est impropre de parler comme on le fait couramment de « production » ou de « consommation » d'énergie. Dans tous les cas, il s'agit de changement de forme, ou de transfert d'un système à un autre. »²

Fig. 39. *Green Dream, Why Factory*



¹ Une partie de nos besoins alimentaires pendant les premiers stades de la vie correspondent à cet accroissement de notre stock, au renforcement de notre squelette et plus généralement au changement d'échelle de la plupart de nos organes et de nos parties corporelles.

² Roger Balian (qui était d'ailleurs mon professeur de physique statistique à l'école Polytechnique et dont je garde toujours précieusement le cours dans mes archives)

Symétries d'espace-temps et loi de conservation

Emmy Noether, une grande mathématicienne allemande du début du 20^{ème} siècle, avait mis en évidence que la conservation de l'énergie était la conséquence de l'invariance de la physique par translation dans le temps, autrement dit que la façon de dépendre une expérience physique devait être la même quel que soit la date à laquelle cet événement se déroulait. De façon plus générale, elle avait démontré que les lois de conservation découlaient des symétries dans l'espace et dans le temps. Singh rappelle aussi que Charles Darwin, au cours de l'un de ses voyages à bord du bateau le *Beagle*, avait conclu auparavant que « *les lois naturelles s'appliquent uniformément dans le temps.* » [14]. C'est sans doute la grande différence avec l'architecture : ses lois à elle diffèrent en fonction de sa propre histoire et de l'évolution de l'environnement terrestre.

Diagramme de Sankey

Les notions d'énergie et de temps sont duales ; quantité de mouvement et espace aussi¹. Traduites dans les outils graphiques de l'architecture, la somme des intrants énergétiques est à long terme égale à la somme des sortants². Les diagrammes de Sankey sont à ce titre des instruments de projet très utiles pour exprimer et spatialiser cette loi de conservation³ (Fig. 40, Fig. 41, Fig. 54, Fig. 55, Fig. 56 et Fig. 57).

Fig. 40. *Diagramme de Sankey*

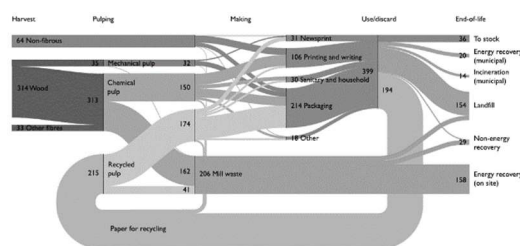
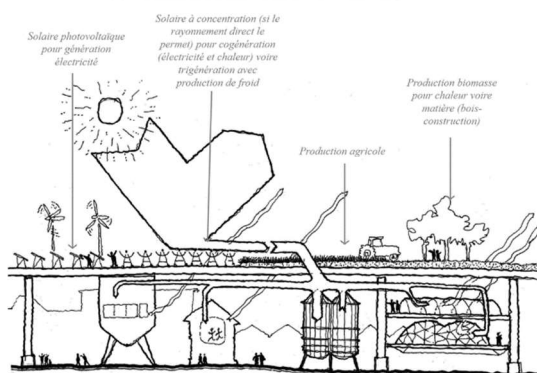


Fig. 41. *Un diagramme de Sankey appliqué à une esquisse d'Infrastructure Solaire Urbaine (ISU)*



¹ C'est d'ailleurs la relation d'incertitude de Heisenberg exprimée selon l'énergie et le temps qui révèle la fertilité du vide et l'hypothèse du Big Bang comme une très grande fluctuation du vide.

² Comprenant dans le cas de l'énergie, une somme d'énergies fatales.

³ Qui peut d'ailleurs se dessiner autant pour le cycle de l'énergie, que de la matière comme les très belles planches de Charles Minard au cours du 19^{ème} siècle.

Deuxième principe, la dégradation des qualités

L'entropie en quelques mots

La mécanique classique est réversible dans le temps¹. Dès que les degrés de liberté d'un système deviennent importants, cette symétrie est brisée. Les systèmes complexes sont donc orientés selon la flèche du temps. Le mélange d'un soupçon de crème de lait dans un café noir n'échappe pas à cette règle. Il est infiniment peu probable que crème et café se reséparent pour laisser voir une couche de blanc sur un océan noir² [15]. Destin identique en architecture et ses différents composants. L'ordre matériautique est irréversible, le temps fait son œuvre et l'ordonnancement de toute chose se détériore. Seul l'apport à peu près constant d'une énergie de bonne qualité peut y remédier. Il faut prendre soin des architectures que l'on souhaite préserver (Fig. 42).

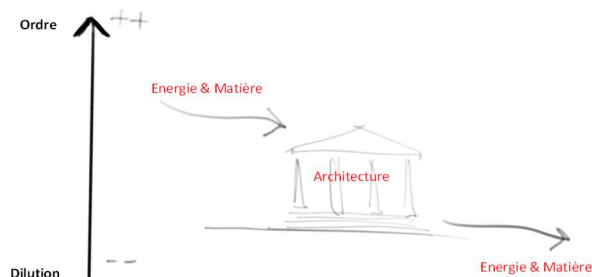


Fig. 42. *La flèche du temps appliquée à l'édifice. Une libre interprétation d'après un graphique de Goran Wall, où l'architecture remplace le « système ». Wall fait apparaître le terme d'exergie sur l'axe vertical.*

La flèche du temps

L'entropie d'un système fermé augmente avec le temps : le classement de l'énergie (par exemple du chaud et du froid) ou celui de la matière (des billes rouges et des billes bleues) tend inexorablement vers le tiède et le mélange. Le maintien en ordre suppose un flux énergie-matière. Ainsi va la vie. L'énergie n'échappe pas au deuxième principe : la qualité du flux (au sens thermodynamique) tend inexorablement vers sa forme la moins élaborée, la moins organisée, de la basse chaleur.

À titre d'exemple, la chaleur du four dont la température serait portée à 180°C se dissipe à proximité de celui-ci selon des températures toujours décroissantes. De façon similaire, lorsque nous prenons une douche, les 35 à 40°C du flux d'eau jaillissant du pommeau décroissent vers une température plus basse et finissent par être « moyennés » avec le flux des eaux grises du reste de l'immeuble (Fig. 25). Selon le vocabulaire de la cybernétique, ordre et information se dissipent dans un système fermé. Heureusement notre vaisseau planétaire est un système partiellement ouvert, de l'énergie de haute qualité arrive en abondance et fournit à notre système la capacité à fabriquer de l'ordre, du savoir et la possibilité de faire tourner la matière et faire croître l'information.

¹ La symétrie des équations de la mécanique classique par rapport au temps.

² Et il me semble que cet exemple est rappelé dans le documentaire *Une brève histoire du temps*, tiré du livre éponyme de Stephen Hawking.

Fig. 43. Une miniature du 15^{ème} siècle. Une tour de guet en construction. Extrait de miniature de la Bible de Toggenburg, maître suisse, 1411



Fig. 44. Adorazione del bambino, Giorgio Martini Francesco, vers 1485-90



L'architecture ou l'information

Retour en arrière, la construction mue par le soleil

Une miniature du 15^{ème} siècle, une tour de guet en construction. Une échelle pour monter les sceaux de mortier. Une poulie pour vaincre plus facilement la pesanteur¹. Faire forme, organiser la matière, la transformer réclame nécessairement de l'énergie. Dans ce dessin (Fig. 43), et pour la séquence finale de la construction, l'énergie humaine est à l'œuvre. Mais d'où vient le travail de ces biceps ? La machine animale, celle capable de fournir une puissance mécanique², utilise un carburant particulier que nous appelons communément l'alimentation. Quel était le contenu des assiettes au 15^{ème} siècle ?

Toute la nourriture humaine, tout le carburant des efforts de nos aïeux, était le fruit de la photosynthèse (les céréales du pain, les légumes des potages) et de ses différents produits dérivés selon la chaîne animale (la viande mangée épisodiquement³). Il y a cinq siècles, l'achèvement construit était exclusivement issu de la photosynthèse et donc d'un flux énergétique issu du solaire (l'architecture du temps III, #9). En amont de la totalité de sa dépense énergétique constructive, la constitution complexe de cette tour, cette « négentropie⁴ concrète » a été possible en se nourrissant exclusivement de la qualité et de la quantité du flux solaire. À ce stade, la civilisation humaine était durable, partie prenante d'un cycle pouvant perdurer tant que le feu solaire était actif⁵.

La ruine

Une autre image, la ruine en toile de fond à la révélation de la vie (Fig. 44). La faux de l'entropie qui attend son heure. La vie, la complexité, l'information, l'ordonnancement se dégrade inéluctablement avec le temps. L'édifice est un code matériel, une « phrase de matériaux »⁶. C'est l'hypothèse : l'architecture est le savoir, l'information plus que l'édifice lui-même. Ce dernier n'est qu'une projection macroscopique de l'art de construire.

¹ Un dispositif comme un autre d'efficacité énergétique.

² Autrement dit du travail.

³ Un diagramme de Sankey qui ne dit pas son nom. Il faut néanmoins comprendre que l'alimentation d'animaux correspond à l'ingestion du « stock construit » métabolique, mais que son élaboration suppose la vie (certes souvent abrégée) de l'animal en question et de la somme d'intrants énergétiques que cela suppose. C'est la raison essentielle de l'empreinte énergétique gigantesque de l'alimentation carnée : elle correspond à un produit de rendement métabolique.

⁴ La négentropie est le contraire au sens mathématique de l'entropie et elle est une grandeur généralement utilisée pour les sciences de l'information.

⁵ Encore pour quelques milliards d'année avant que le Soleil ne se transforme en géante rouge à la fin de son cycle de vie.

⁶ Et ce parallèle rappelle la nouvelle de Borges, *La bibliothèque de Babel* ; par extension, nous pourrions penser que la bibliothèque de Babel contienne également tous les projets architecturaux passés et à venir, réalisés et non réalisés puisque les images contenues dans un livre possèdent un nombre fini de pixels.

La pétrification d'un moment de culture

L'architecture se projette. Elle s'écrit, se dessine, se calcule. Elle dispose de toutes sortes de support d'informations constituant le génome de son ordonnancement constructif. L'architecture paramétrique et la maquette numérique tentent de faire converger dans un réceptacle unique¹ cet ADN de la construction, la promesse d'un suivi robuste sur le cycle de vie de l'édifice. L'architecture est un savoir qui s'est bâti. Aphorisme connu de Jean Nouvel, « *l'architecture est la pétrification d'un moment de culture.* ».

L'architecture serait le disque dur visible, sensuel, utile d'un *key frame* de la culture et du savoir. Ses démonstrations concrètes, ces édifices, sortes de « livres de pierre » mais aussi l'accumulation² du savoir par des textes, des dessins, des maquettes, des diagrammes, des calculs, des descriptions, des poèmes, des peintures, des films etc. : tout cela a réclamé matière et énergie. Celles des hommes et celles des médias qui ont permis la somme de ces projections.

Les transitions de phase de l'architecture

Les flux vus de l'architecture

L'architecture est objet fortement débiteur du point de vue de l'énergie et de la matière (Fig. 45). Sous l'angle de l'énergie, l'édifice peut être comparé aux besoins alimentaires nécessaires au métabolisme de nos corps : l'architecture est un sur-corps, un vêtement immobile qui endosse une partie des besoins énergétiques de l'humain, pour se maintenir à bonne température par impératifs de santé, puis par confort en gravissant la pyramide des besoins.

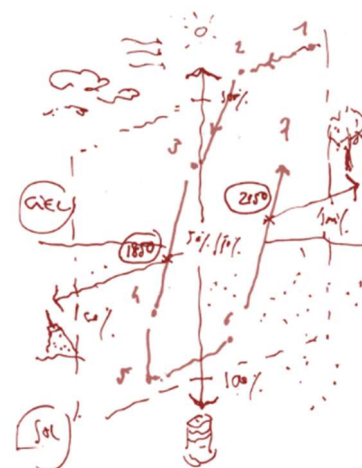
Le monde renouvelable, condition nécessaire à la poursuite de notre quête

Nous sommes dans un système ouvert pour ce qui concerne l'énergie. Le flux solaire va nous permettre à la fois de « détricoter » pour mieux « recombinaison » nos écheveaux de matière. Et sous ce flot permanent d'énergie, et de très haute qualité³, nous pouvons continuer de financer notre ponction de savoir. L'ordre extrait des énergies renouvelables autorisera la permanence de l'épopée humaine, celle de la construction du savoir et de la culture, quitte à passer de temps à autre par le détour d'une destruction créatrice, chère à Schumpeter.

Architecture, filtres énergie-matière

Le temps est court pour enclencher la symphonie des mutations (chapitre #21). Il faudra que nous soyons être extrêmement efficaces pour bien gérer les stocks restants d'énergie et de matière, et ingénieux pour fabriquer des « filtres » efficaces à flux d'énergie-matière.

Fig. 45. Le cycle énergie-matière de l'histoire de l'architecture comme un cycle thermodynamique à travers sept périodes successives, chacune associée à un triplet énergie-matière-architecture. Sur l'axe vertical, l'énergie : en partie haute les énergies renouvelables, en bas les fossiles. Sur l'axe horizontal, la matière : à gauche, les matériaux non renouvelables ; à droite, les matériaux biosourcés ou les matières réemployées.



¹ Et sous prétexte d'une forme d'efficacité teintée de productivisme avec l'apologie du BIM.

² Et une part de perte aussi.

³ Au sens exergique du terme.

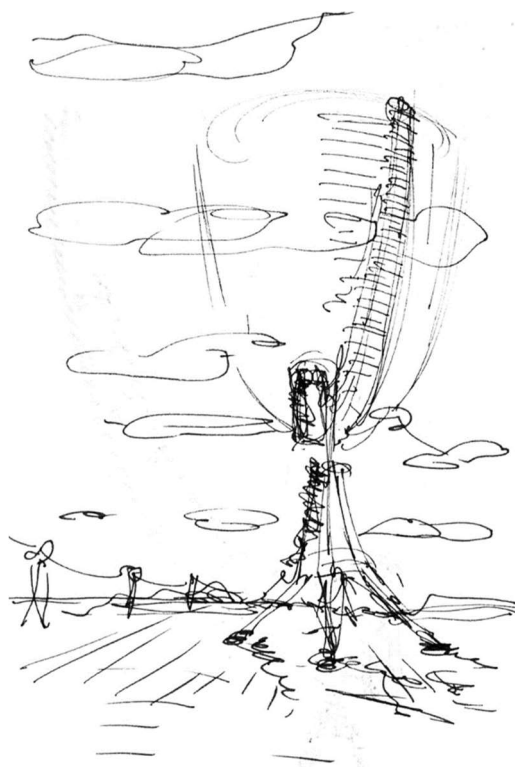
De fait, et comme exemple d'une architecture renouvelable, une éolienne est un filtre (Fig. 46) : elle chasse, elle tamise l'énergie de haute qualité contenue dans les courants venteux (chapitre #8). Nous devons inventer d'autres machines savantes, doublement efficaces, produisant beaucoup d'énergie pendant leur durée de vie et qui, pour leur édification, auront réclamé des ponctions très faibles sur les stocks fossiles d'énergie et de matière. Quelques articles dans ce mémoire apporteront des éclairages sur ces questions déterminantes, notamment sur ceux relatifs à l'analyse énergie-matière des énergies renouvelables dans la première partie de ce mémoire (chapitres #8, #10, #11, #13 et #15).

Parcours entre fossiles et renouvelables

Autre emprunt à la thermodynamique, les notions de cycles et les transitions de phase apparaîtront plusieurs fois dans ce texte. Le schéma (Fig. 47) résume ce qui sera décrit plus loin, à savoir une histoire de l'architecture décrite selon l'évolution des paradigmes énergie et matière. Avec pour ces deux thèmes un crible commun : le caractère renouvelable ou non de chacun de ces flux. Une précision étymologique s'impose néanmoins. Nous l'avons vu, nous sommes dans un système ouvert pour l'énergie. Il est aisé de distinguer ce qui est renouvelable de ce qui ne l'est pas, comme les énergies fossiles. Pour la matière, la distinction est plus subtile.

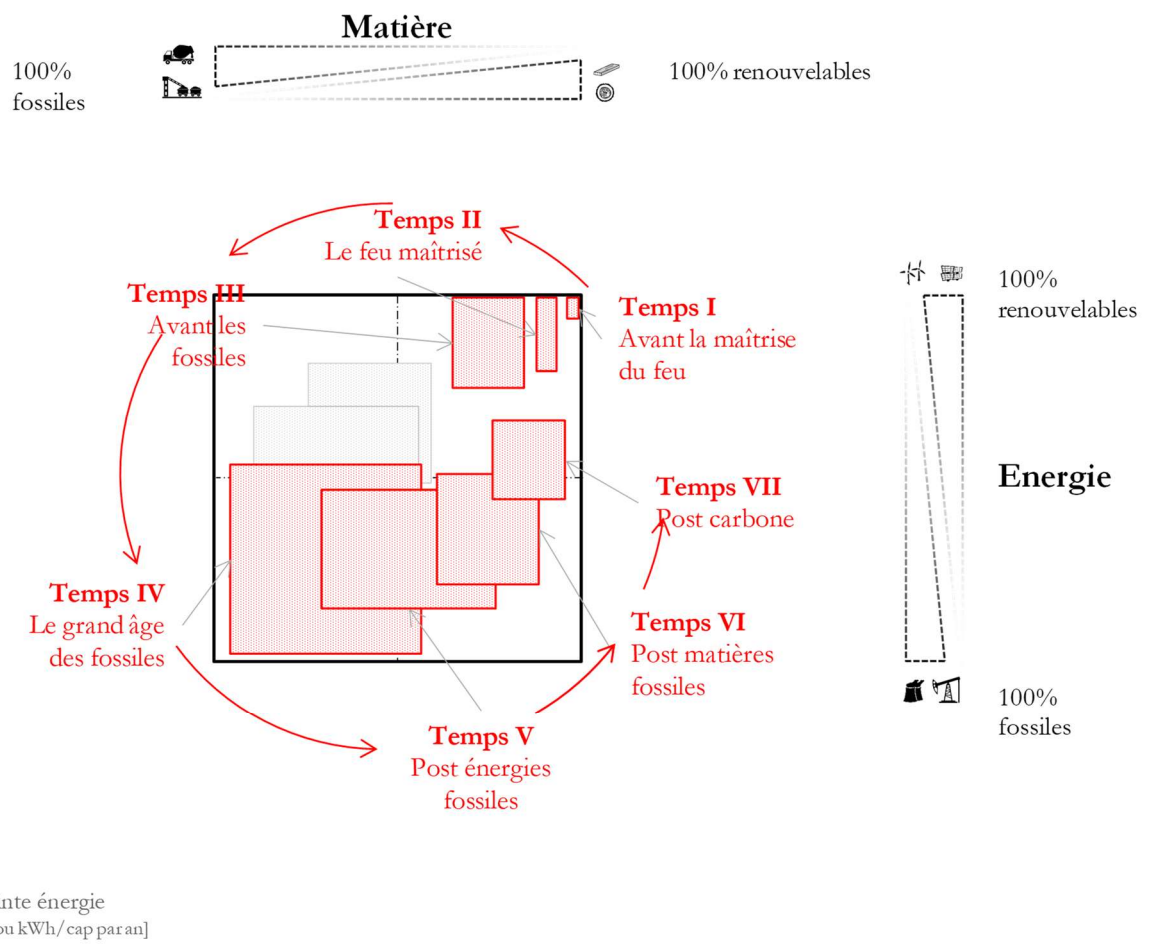
En première hypothèse, sera considéré comme matière renouvelable, l'ensemble de la production biosourcée et l'ensemble des matières issues du réemploi ou de la réutilisation (chapitre #17). Selon ces quatre quadrants, nous décrivons une trajectoire des sept temps différents de l'architecture, selon le présupposé suivant : la disponibilité et l'usage particulier des énergies et des matières à une époque déterminée sont des déterminants fondamentaux de la théorie et de la pratique architecturale et urbaine. Nous verrons aussi les mouvements de prévalence selon tantôt la matière, à d'autres époques, l'énergie et pour finir l'urgence climatique comme déterminant essentiel de la refondation à conduire (#18).

Fig. 46. Une hypothèse d'éolienne à axe vertical avec une seule pale pour réduire l'impact matière de la chasse à l'énergie du vent.



*

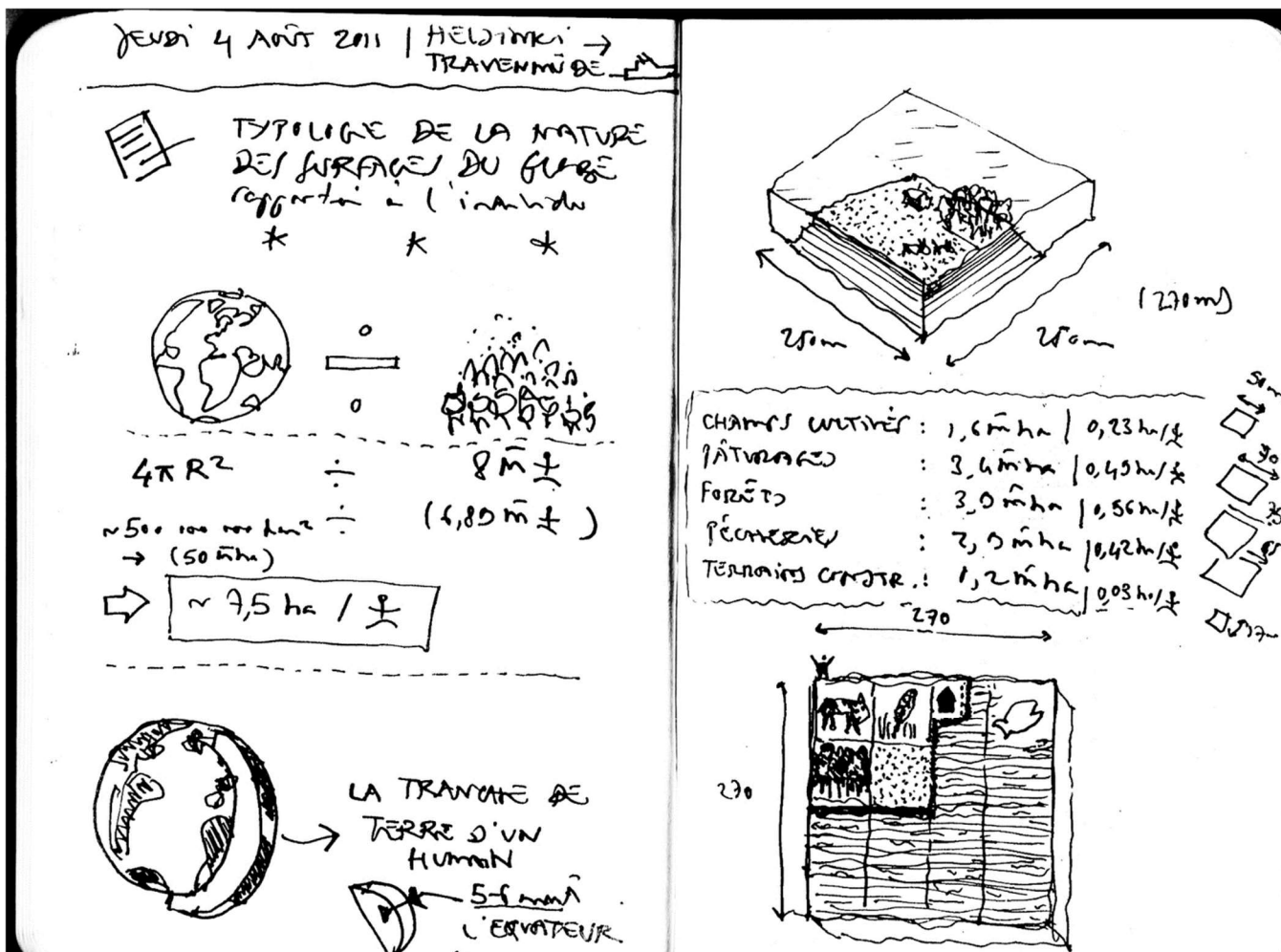
Fig. 47. Le graphique-pivot à cette narration en plusieurs temps. La position du rectangle dans le quadrant décrit le caractère renouvelable ou non des usages énergie et matière. Les dimensions du rectangle expriment l'intensité des demandes en énergie et en matière, en quantité mais non en qualité à ce stade de représentation.



Bibliographie

1. MENARD Raphaël et al., *Reforme, rapport final de recherche*, programme Ignis Mutat Res, 2014
2. GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, *La décroissance* (1979), 2ème édition, 1995
3. DE ROSNAY, Joël, *Le microscope. Vers une vision globale*, Seuil coll. Points, 1975
4. RODDIER François, *Thermodynamique de l'évolution, un essai de thermo-bio-sociologie*, Parole Editions, 2012
5. MENARD Raphaël, *Work in Process, nouveaux bureaux, nouveaux usages*. Exposition au Pavillon de l'Arsenal. Article « Don Drapper, la voiture et le climat », p237 à p265, 2012
6. HILLCOAT John, *The Road*, film d'anticipation post-apocalyptique américain réalisé tiré du roman du même nom écrit par Cormac McCarthy, 2009
7. RIDLEY Scott, *Seul sur Mars* (titre original : *The Martian*), 2015
8. REEVES Hubert, *Poussières d'étoiles*, Le Seuil, collection « Science ouverte », 1984
9. BARLES Sabine, *Mesurer la performance écologique des villes et des territoires : Le métabolisme de Paris et de l'Île-de-France*, Rapport de recherche final pour le compte de la ville de Paris, 2004
10. BIHOUIX Philippe, *L'âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable* Seuil, Anthropocène, 2014
11. BONNEUIL Christophe, FRESSOZ Jean-Baptiste, *L'Événement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Seuil, 2013
12. GIEDON Siegfried, *Espace, temps, architecture*, La Connaissance, Bruxelles, 1968
13. WHY FACTORY, *Green Dream: How Future Cities Can Outsmart Nature*, NAI Publishers, 2011
14. SINGH Madanjeet, *L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature*, Unesco France Loisirs, 1998
15. HAWKING Stephen, *Une brève histoire du temps*, titre original *A brief history of time*, Bantam Books, 1988

Fig. 48. Croquis de la surface d'emprise spatiale des humains (voir aussi chapitre #22)



#4 Mode d'emploi

Comprendre l'organisation du mémoire et le tissage entre les trois parties. Une bibliographie choisie. L'introduction à un glossaire nécessaire, développé en annexe. Les unités utilisées.

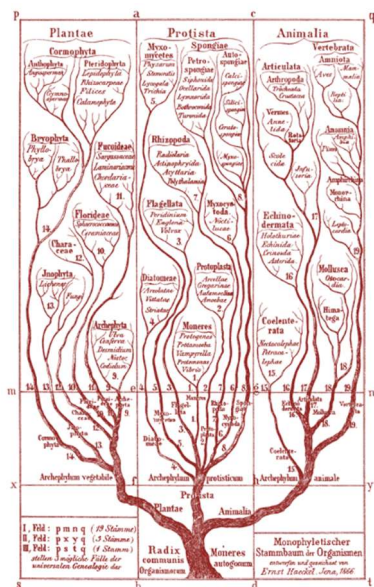
Organisation

Les trois parties et leurs chapitres

Les chapitres, comme particule élémentaire du mémoire

Ce mémoire comporte trois parties. Il contient vingt-neuf chapitres d'une vingtaine de pages chacun. Les chapitres sont numérotés pour favoriser leur repérage, inciter à des sauts, faciliter des lectures transverses (avec le repérage noté #N). Chaque chapitre comporte un bref résumé, sa propre liste de références et peut ainsi être lu de façon autonome. Les chapitres se répondent aussi entre eux et se font mutuellement référence en citant leur numéro pour des renvois réciproques.

Fig. 49. *Un arbre phylogénétique par Ernst Haeckel*



Partie 1, Une histoire en sept temps

La première partie, *Une histoire en sept temps*, explore l'hypothèse d'une chronologie selon les relations entretenues entre architecture, matière et énergie. Elle se compose de sept épisodes, chacun correspondant à un âge particulier, à un paradigme d'intrications, de causalité entre le mix énergie-matière et les théories et les pratiques de l'art de concevoir et de construire l'architecture. J'attire l'attention du lecteur sur le caractère approximatif de ce séquençage chronologique (Fig. 51). Seul un travail précis d'historien permettrait d'affiner ce découpage, fortement non-linéaire, puisque le temps I s'étend sur près de cent mille ans et le temps II sur dix mille (chapitre #7). Le temps III dure environ mille années (#9), tandis que le temps IV naît il y a environ deux cent cinquante ans (#12) et #14) et que les temps V (#16) et VI (#17) appartiennent à l'histoire moderne. Entre chaque épisode de cette saga énergie-matière-architecture, d'autres chapitres relatifs aux énergies renouvelables - ou aux enjeux de matières - ponctuent cette première partie (chapitres #8, #10, #11, #13 et #15).

Ces articles ont pour fonction d'aider le lecteur à mieux appréhender les éléments techniques et les quelques chiffres donnés dans les autres articles, avec peu ou pas d'équations, avec quelques ordres de grandeur et une première familiarisation avec les unités plus largement usitées en deuxième partie. Ils préparent à la lecture de la deuxième partie. À l'issue de cette fresque historique, cette première partie se termine en effet sur le temps VII, l'horizon de l'architecture renouvelable, enjeu central de ce mémoire (#18).

Partie 2, *Éléments d'architectures renouvelables*

La deuxième partie, *Éléments d'architectures renouvelables*, contient des chapitres plus techniques pour celles et ceux désireux d'aller plus loin sur les aspects quantitatifs et techniques. Cette section fournit des outils permettant de dimensionner, de proportionner l'architecture dite du « temps VII ». Cette partie fait parfois appel à des éléments mathématiques, à des métriques des proportions et des échelles (chapitre #20). Cette section fournit des outils pour dimensionner et proportionner un art de « concevoir renouvelable » à l'aune de quelques invariants terrestres (#19). Cette partie interpelle les enjeux temporels et décrit la métrique des temps de retour écologiques ; elle propose quelques clés pour des aménagements soutenables gouvernés d'abord par les densités de population (#22) (Fig. 50). De façon plus personnelle, cette partie s'aventure dans le champ politique avec quelques propositions pour engager les transformations nécessaires (#21) : elles reflètent plus globalement les prises de position, parfois radicales, de l'auteur sur l'ensemble du mémoire.

Partie 3, *Projets illustrés*

Toutefois, sans pouvoir « donner forme » à ce temps VII, la troisième partie décortique des expériences personnelles réinterrogées selon les résultats des deux parties précédentes. Ce choix de projets au cours de vingt années de pratique illustre un large spectre d'expérimentations, de la petite jusqu'à la grande échelle, avec un regard rétrospectif volontiers critique. Avec quelques résultats nouveaux pour le temps VII, quelques chapitres proposent des développements théoriques afin de tester la dépendance des impacts énergie-matière à la dimension des artefacts analysés. Ce mémoire souhaite avoir une portée pratique et illustrer par l'exemple quelques tentatives, quelques explorations sondant les prémices d'architectures renouvelables, minimisant l'amortissement de leur empreinte « énergie-matière-climat », voire de chercher les pistes d'un amortissement positif (à partir de #23). Ce mémoire me fournit ainsi l'occasion de synthétiser quelques histoires de projet, que j'ai choisi selon un ordre chronologique (du plus ancien au plus récent), avec un regard volontiers critique et parfois une mise en perspective plus large des enjeux énergie-matière-climat qu'ils interpellent. Ce texte souhaite une nouvelle fois rappeler les liens féconds et nécessaires entre théorie et pratique, recherche et projets et ainsi couper court à la scission au sein de la physique des particules élémentaires : les expérimentateurs d'une part, et les théoriciens de l'autre¹.

Dans les deux parties précédentes, les expériences personnelles seront aussi mises en exergue selon ce surlignage.

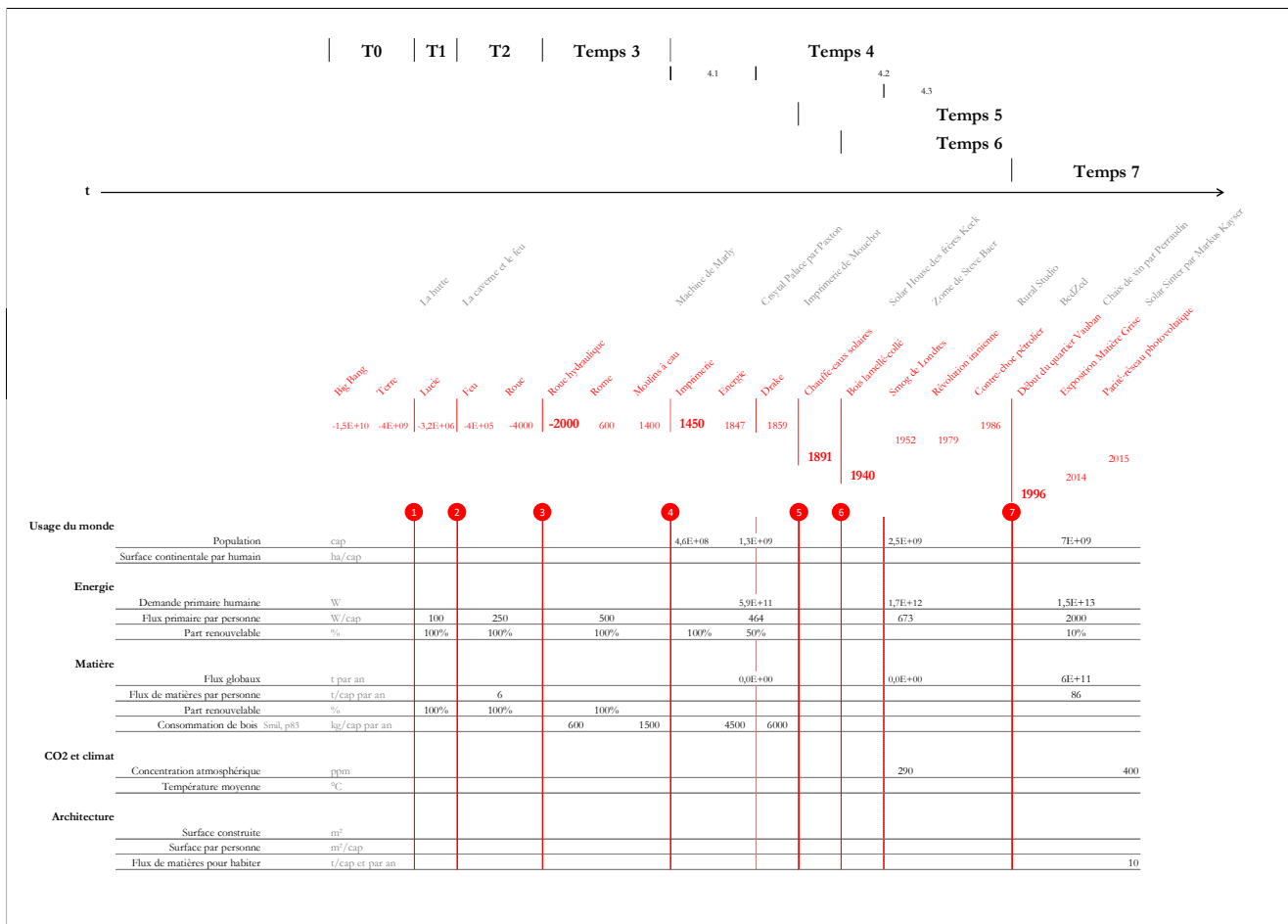
Sauf mention contraire, les croquis et dessins en illustration sont ceux de l'auteur.

¹ L'un des motifs d'ailleurs qui avait fini de me détourner de mon aspiration initiale vers la recherche en physique des particules élémentaires.

Fig. 50. *Quelques humains sur la plage de Coney Island à New-York. Photo de Weegee.*



Fig. 51. Une frise synthétique des sept temps avec la superposition des temps IV, V, VI et VII



Pour bien se comprendre

Récapitulatif des différentes notations employées

Les unités employées dans l'article

Pour la quantité, l'unité de mesure qui fera foi sera le watt (W). Il mesure un flux, un débit temporel d'énergie, une puissance. En employant cette unité, nous ne sommes pas forcés de rapporter une quantité d'énergie (comme par exemple des kWh¹) à une durée temporelle (par exemple une année). Dès lors, un logement « à 50 kWh par m² et par an » sera un habitat² à « 6 watts par m² »³. Autre exemple, le gisement solaire parisien est⁴ de 130 watts par m² : il correspond à la moyenne du flux solaire, été comme hiver, jour comme nuit. Selon cette convention, le temps n'intervient plus, on évalue un flux moyenné sur une période de temps caractéristique⁵. Des kWh par jour ou des kWh par année (etc.) ne sont rien d'autres qu'une puissance moyenne : une quantité d'énergie divisée par une durée⁶. Une unité courante est aussi la TEP, pour tonne équivalent pétrole, mais elle sera un jour ou l'autre nécessairement une unité du passé. Enfin, sauf précision, les unités énergétiques⁷ seront des valeurs exprimées en énergie primaire⁸, en amont donc du cycle de vie de l'énergie. Dans certains cas, la mention « électrique » ou « thermique » précisera la qualité énergétique du flux considéré, et fournira donc une indication sur le « taux d'exergie » du flux ou de la quantité évoquée (des compléments en #10).

W_{elec} watt d'électricité (ou d'exergie pure)

W_{th} watt thermique, de chaleur

W_{n.r.} watt non renouvelable, issu des énergies fossiles ou fissiles

¹ Cette unité est d'ailleurs composite puisque de façon typographique, elle est l'accolement d'une puissance (W ou kW) avec une quantité de temps (une heure) et explicite donc la multiplication d'une puissance par du temps. Après avoir lu ces lignes, vous comprendrez qu'il est inexcusable de lire cette aberration (vue malheureusement parfois) consistant à écrire kilowattheure en kWh !

² 50 kWh divisés par les 8760 heures que comptent une année.

³ Évidemment, il ne faudra pas confondre cette valeur avec celle du dimensionnement du chauffage qui serait sans doute voisine de 50 à 100 watts par m² et qui correspondrait à une valeur de pointe, comme la puissance maximale d'un moteur de voiture en quelque sorte.

⁴ Exprimée en kWh, l'irradiation solaire horizontale vaut environ 1100 kWh par m² et par an.

⁵ L'année en règle générale, sauf mention spécifique.

⁶ L'unité de temps fera éventuellement son apparition lorsque nous évaluerons un stock, une réserve : par exemple pour quantifier la capacité de stockage d'une batterie électrique (sous forme de Wh ou kWh par exemple)

⁷ De flux (en watt) ou de stock (comme précisées avant)

⁸ L'énergie primaire correspond à des produits énergétiques bruts tels que fournis par la nature : bois, charbon, pétrole, gaz naturel, uranium, pour les formes qui ne sont pas renouvelables ; énergie hydraulique, solaire, éolienne, biomasse, géothermie, marémotrice pour les formes renouvelables.

Fig. 52. Solarisation des tissus urbains existants par des ballons solaires captifs



Fig. 53. Des châteaux d'eau tiède dont la chaleur serait aussi générée par le vent, avec une éolienne de type Savonius en partie haute.

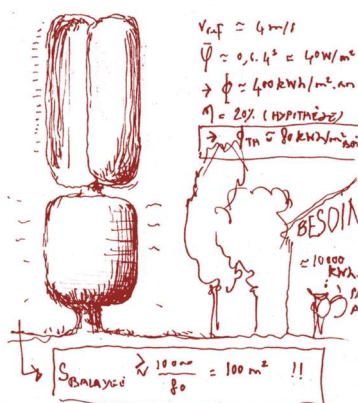
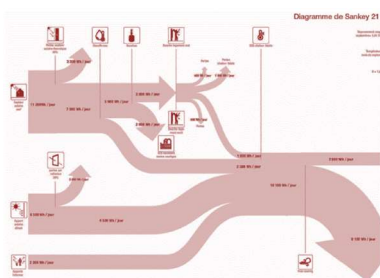


Fig. 54. Un diagramme de Sankey ré-alisé pour une étude du DPEA Architecture post-carbone



Les unités employées dans l'article (qualité de l'énergie)

Dans quelques-uns des diagrammes de ce mémoire, apparaîtra la notion de taux d'exergie¹. Cette valeur mesure la qualité de l'énergie². Plus ce taux est proche de l'unité (ou de 100%), plus la qualité énergétique est importante³. *A contrario*, la basse chaleur (celle par exemple du chauffage d'un logis) aura un taux d'exergie très faible, de l'ordre de quelques pourcents⁴.

Les autres notations

Ce mémoire introduira progressivement les notions de flux (f), de stock (S) ou encore de bilan (B). Les majuscules seront réservées à des grandeurs de stock tandis que les minuscules correspondront à des débits temporels. J'invite le lecteur à parcourir les éléments de définition en annexe avant de lire les chapitres pour éviter tout malentendu. L'indice permettra de distinguer la nature de la grandeur analysée. Par exemple, dans le cas de bilan :

B_e	Bilan d'énergie sur la totalité du cycle de vie (en kWh par ex.)
B_m	Bilan de matières sur la totalité du cycle de vie (en kg par ex.)
B_{CO_2}	Bilan d'émissions de gaz à effet de serre (en kg CO ₂ eq par ex.)

Voir l'énergie

La vie des flux

Impalpable, l'énergie réclame depuis longtemps sa projection visuelle, son « ombre graphique ». L'histoire des sciences a su démontrer la puissance des outils de représentation comme « marchepieds épistémologiques ». Songeons aux diagrammes du physicien Richard Feynman et leurs incidences sur la manipulation de la théorie quantique des champs.

Dans la typologie des systèmes de représentation, les diagrammes de Sankey (Fig. 40, Fig. 41 et Fig. 54) sont sans doute les plus efficaces pour révéler embranchements et transformations successives des flux d'énergie. Aussi, dans le prolongement des dessins de Minard, nous souhaitons faciliter la compréhension du cycle de vie des énergies, en déclinant ces diagrammes en cohérence avec les représentations traditionnelles de la géographie, du paysage, de l'urbanisme et de l'architecture. Nous invitons le lecteur à parcourir l'état de l'art présenté en annexe.

¹ Dans le cadre du programme de recherche *Ignis Mutat Res*, les travaux de *Réforme* faisaient la part belle à une expression bidimensionnelle de la donnée énergétique : caractériser sa quantité mais aussi sa qualité. Comme en mathématique et dans le cas du passage des nombres réels aux complexes, une partie de nos travaux avait consisté à jeter les bases d'une « algèbre de l'énergie ».

² Comme l'argument d'un nombre complexe (et l'énergie serait alors son module)

³ L'électricité possédant un taux d'exergie de 100% par exemple.

⁴ Rappelons que la Terre est constamment « arrosée » du flux permanent de l'énergie solaire et dont la valeur de qualité, le taux d'exergie, est extrêmement élevée, environ 97%.

Le diagramme de Sankey

Les diagrammes de Sankey sont utilisés dans le domaine de l'énergie, de l'économie, de l'industrie, et bien d'autres domaines encore (Fig. 55). Ils permettent de comprendre visuellement où et quand se passent les transferts les plus importants : l'épaisseur des flèches renseigne l'intensité du flux. Les diagrammes de Sankey expriment parfois une direction temporelle au cours d'un processus. Pour l'énergie, ils permettent ainsi de détailler les pertes successives de *qualité* énergétique de la gauche vers la droite ; ou du haut vers le bas. À l'heure où les territoires enclenchent des stratégies de transition¹, ces représentations proposent un « calque » pour les futurs projets territoriaux. Le diagramme de Sankey appliqué à grande échelle peut alors devenir un instrument puissant pour comprendre points forts et points faibles de transformation de l'énergie. L'énergie doit devenir en effet un objet graphique pour faciliter la dialectique formelle d'un projet spatial et politique.

Mode d'emploi du diagramme de Sankey

Voilà donc un glossaire et un ordonnancement de ses vies successives. En filigrane, le deuxième principe de la thermodynamique : la *quantité se conserve* mais la *qualité baisse inexorablement*. Sur la totalité de son cycle, toute l'énergie primaire se conserve en se transformant inexorablement en énergie fatale, une chaleur à basse température. Confrontons-nous à notre premier diagramme de Sankey : il se lit de gauche à droite. Les formes primaires à gauche, les usages finaux sur la droite. Entre les deux, les chaînes et les entremêlements successifs de transformation. À chaque étape (permettant par exemple de convertir une qualité énergétique en une autre, comme par exemple de la chaleur en électricité), il y a souvent une perte : la largeur de la flèche, quantifiant le flux, se rétrécit, tandis que la chaleur fatale émise dans le processus de transformation égale l'intrant.

Les diagrammes de Sankey spatialisés

Les dessins de Minard

Ancien élève de l'École polytechnique puis de l'École nationale des ponts et chaussées, Charles-Joseph Minard fut un pionnier dans l'utilisation des graphiques appliqués au génie civil et aux statistiques. Il atteignit la célébrité pour sa *Carte figurative des pertes successives en hommes de l'Armée française dans la campagne de Russie en 1812-1813*, une représentation graphique publiée en 1869 relative à la désastreuse campagne de Russie entreprise par Napoléon en 1812 (Fig. 56). Ce célèbre graphique présente plusieurs variables dans une simple image en deux dimensions : localisation et itinéraire de l'armée indiquant les points de séparation et de regroupement des unités ; pertes humaines de l'armée (particulièrement sensibles lors de la traversée de la Bérézina) ; variations de la température de l'air au cours de la retraite.

Fig. 55. L'un des premiers diagrammes conçus par Matthew Henry Phineas Riall Sankey (1853 -1926). De 1889 à 1905, Sankey était directeur au sein de Willans & Robinson engineers. En 1892, il devint ingénieur en chef et concepteur de machine à vapeur. En 1898, il déclina la première version de ce nouveau diagramme dans une publication sur l'efficacité énergétique d'une machine à vapeur.

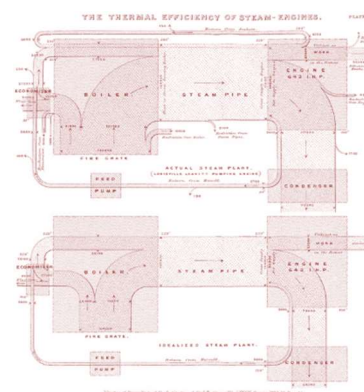
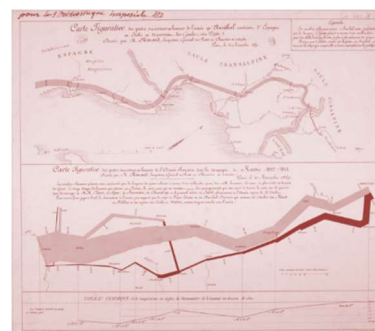
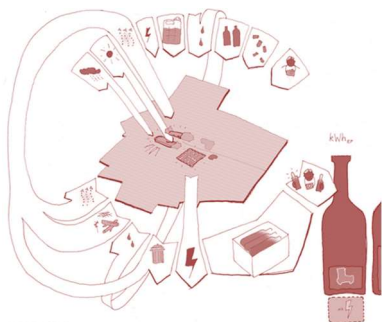


Fig. 56. Carte de Minard



¹ Songeons au « Master Plan » proposé par Jeremy Rifkin pour la région Nord-Pas de Calais en 2013.

Fig. 57. *Les flux d'une exploitation viticole à Château Guiraud*



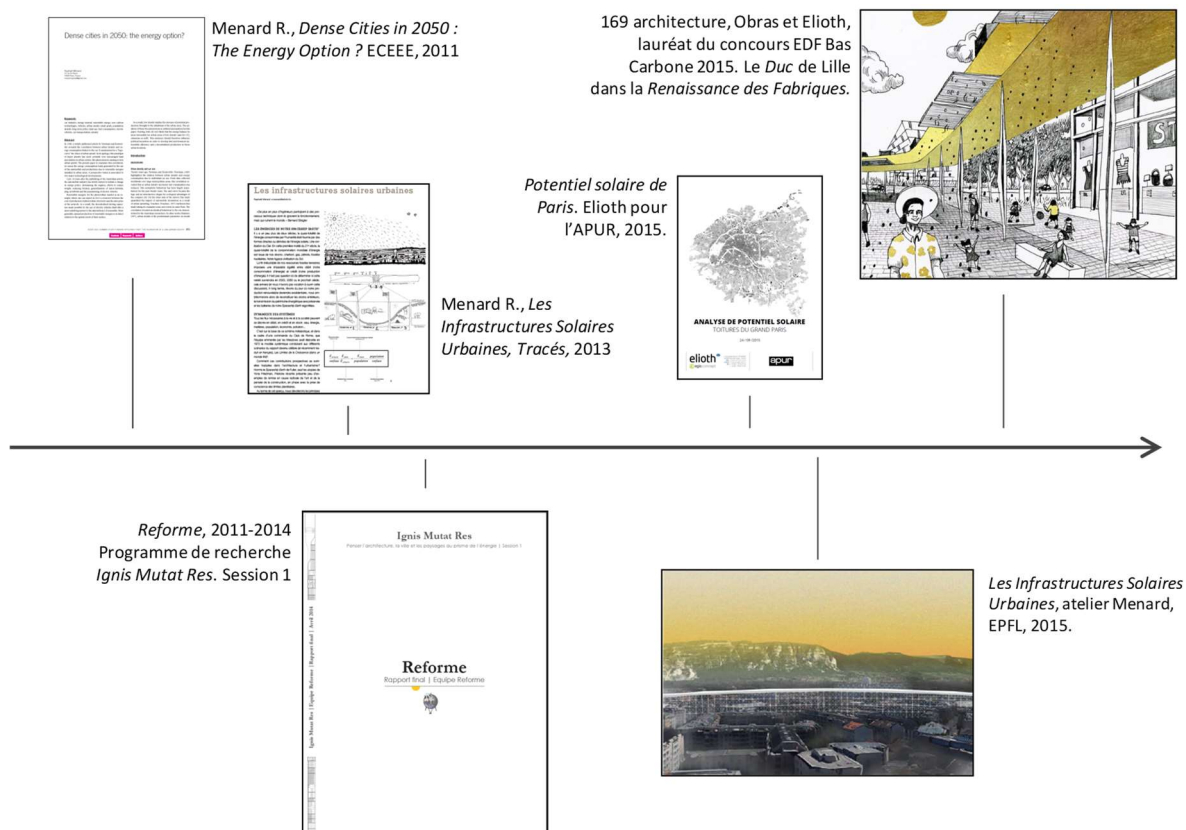
Une histoire des représentations

La force de cette représentation est qu'elle est superposable aux représentations traditionnelles de l'espace : une carte ou en coupe, comme dans cette préfiguration d'Infrastructures Solaires Urbaines. Les Sankey sont des photos de flux et peuvent raconter un bilan sur un pas de temps défini. Une année, lorsqu'un pays souhaite résumer son système énergétique. Mais cela peut-être un instantané sur la coupe d'un projet architectural, en matérialisant les apports solaires venant des fenêtres et les pertes d'isolation par les parois. En prenant les termes du monteur vidéo, le Sankey est un key frame d'une histoire énergétique.

Voir les flux de façon territoriale

Dans le cadre d'un concours, nous avons défini chez Elioth des stratégies architecturales et paysagères permettant de réduire les intrants nécessaires à la fabrication d'un Grand Cru dans le Bordelais. Le diagnostic montrait que la somme d'énergie nécessaire pour fabriquer une bouteille de ce grand cru correspondait à une consommation équivalente de pétrole ! Et nous souhaitions alors encourager un mode de fabrication bas carbone pour pérenniser ce bel art (Fig. 57).

Fig. 58. *Quelques repères personnels*

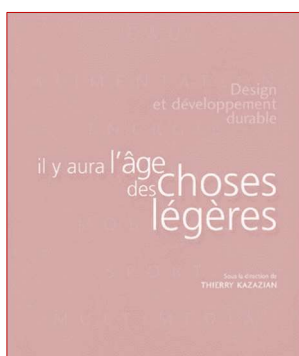


#5 Les chronogrammes

Avant le début de l'histoire, le trio de Vitruve et la première correspondance énergie-matière-architecture. Les chronogrammes de flux cumulés de consommation d'énergie et de matière pour une construction au cours de sa vie. Observer l'architecture dans le temps et mieux apprendre à la projeter selon cette dimension. La distinction entre flux et stock. Introduction aux bilans et aux temps caractéristiques.

Vitruve et le cycle de vie

Fig. 59. Il y aura l'âge des choses légères



Firmitas et utilitas

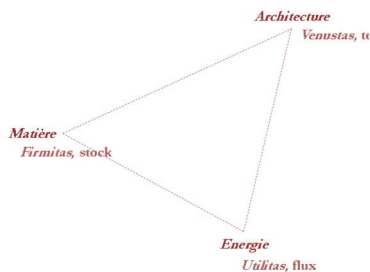
Il y aura l'âge des choses légères

Je me rappelle avoir découvert l'ouvrage de Thierry Kazazian (Fig. 59) en marge de la visite de l'exposition « Climax » à la Cité des Sciences et de l'Industrie à Paris en 2003. J'avais lu avec gourmandise ce livre à la couverture rose [1]. Dans ce livre, Kazazian posait les enjeux d'échelle, les principes d'analyse en cycle de vie et les bons réflexes de l'écoconception. Dans la suite de ce mémoire, nous nous interrogerons sur les trois points fondamentaux de l'analyse cycle de vie qui font écho à la triade vitruvienne. Dans *De Architectura*, écrit vers -150 avant J.C., Vitruve expose le principe de la superposition des trois ordres classiques, c'est-à-dire les qualités de *firmitas*, *utilitas*, et *venustas* : pérennité, utilité et beauté [2].

Firmitas et utilitas

La *firmitas* se réfère à la solidité ou à la robustesse. Elle décrit la bonne mesure de l'intention constructive et des externalités qu'elle engendre. Elle révèle la matière convoquée, l'énergie dépensée pour construire et incidemment, les pollutions engendrées lors de l'édification, les gaz à effet de serre notamment. L'*utilitas* évoque la commodité ou la fonctionnalité. Elle pourrait décrire l'impact de l'usage de l'édifice, le flux de « choses » nécessaires lors de l'exploitation. L'efficacité énergétique peut être l'un des marqueurs de performance si l'on analyse par exemple l'énergie (Fig. 60).

Fig. 60. La transposition selon les trois axes de Vitruve.



Venustas

La *venustas* convoque la beauté, la volupté, l'émotion spatiale, ce petit « supplément d'âme »¹ propre à nous rendre aimable la construction, à susciter la permanence d'un attrait et d'un désir de l'utiliser. Généralement la *venustas* « coûte »², elle impacte la dette constructive de la *firmitas*. Cela rappelle d'ailleurs un sentiment populaire contemporain : demander le conseil d'un architecte pour son projet personnel représenterait un budget complémentaire. Non seulement ses honoraires viendraient s'ajouter à l'estimation des travaux, mais l'on présuppose aussi qu'il va chercher à « se faire plaisir », chercher le beau, préférer peut-être même parfois la coquetterie à l'utile, voire pire, chercher à tout crin à illustrer son portfolio d'une référence comportant parfois beaucoup de superflu, des gesticulations comme une signature.

Écologie et ornements

Les statuaires dans l'architecture classique, les cariatides de temples en Grèce (Fig. 61), le surplus de matière³ pour la modénature d'une façade haussmannienne, le surcoût en matières⁴ du bardage sophistiqué d'un édifice contemporain⁵... : comme l'œuvre plastique, l'architecture rejoint la gratuité de la dette constructive de l'œuvre d'art. Un bronze de Rodin réclame une masse de matière, déformée par plasticité, en usant d'une quantité importante de chaleur (à haute température qui plus est) et dirigée, orientée, contrôlée selon le dessein de son créateur.

Le beau et l'usage

La *venustas* peut impacter également l'*utilitas*. Parfois, le souci du beau prime sur l'usage et il peut engendrer des architectures moins efficaces d'un point de vue fonctionnel ou énergétique. L'architecte soigne l'apparence de son édifice, sans forcément envisager les répercussions de ce coup de crayon sur la vie du bâtiment (Fig. 62). Nous avons tous constaté l'appétence de l'architecture moderne à (trop) largement vitrer les façades de bureaux par exemple. C'est chic, cela suggère la transparence de l'entreprise, mais cela coûte en général plus cher (en « capex »⁶ financier ou en stock écologique, c'est à peu près la même chose) et aussi en entretien-maintenance (en « opex »⁷ de nettoyage des vitrages mais aussi en charges énergétiques, comme par exemple en climatisation). Aujourd'hui, nul doute que la quête de *venustas* ou les réflexes guidés par l'air du temps,

Fig. 61. *Cariatide sur le baldaquin de l'Érechthéion, sur l'acropole d'Athènes*



Fig. 62. *Inventaire de la modénature d'une architecture haussmannienne par LAN architecture, pour l'exposition « Paris Haussmann, modèle de ville », Pavillon de l'Arsenal, 2017. Le souci du beau comme le gage de la permanence et donc de l'étalement de la « dette constructive »*



¹ *Ella*, chanson de France Gall et paroles de Michel Berger.

² Quoique Adolf Loos eut raison de prétendre le contraire.

³ Et de temps humain.

⁴ Et donc en énergie grise.

⁵ Songeons par exemple à l'*utilitas* faible de la Canopée des Halles ou encore aux voiles de verres cintrés, de bois et surtout de métal de la Fondation LVMH dessinées par Frank Gehry dans le Bois de Boulogne. Espérons que leur dette constructive élevée (sur beaucoup de paramètres environnementaux comme la matière, et la matière comprenant l'eau, l'énergie et les émissions de CO₂) soient amorties sur un temps important.

⁶ Pour « CAPital EXPenses ».

⁷ Pour « OPérationnal EXPenses ».

priment sur l'*utilitas*. En cela, le « *Form Follows Function* » de Sullivan énonçait un garde-fou d'équilibre entre l'*utilitas* et la *venustas*. Mais nous étions aux prémices de la modernité et avant le déchainement de puissance offert par le pétrole (#14).

L'ornement localisé

Je garde un souvenir ému d'une très belle visite au cours d'un voyage au Mexique. C'était à Oaxaca, en 2000, lors de la découverte de l'ancien couvent de Santo Domingo de Guzman, édifice transformé en musée ethnographique (Fig. 63). Dans la maçonnerie de pierre, figurait dans certaines parties de la façade des entablements sculptés et précieux. Le contraste entre le brut et le raffinement [5]. Rem Koolhaas a opéré une stratégie analogue avec sa *Casa da Música* à Porto au Portugal (2005). Dans cette géométrie brute, on distingue sur la partie haute du prisme, la grâce et la finesse de vitrages ondulants et cintrés. De l'orfèvrerie transparente (Fig. 64). Le précieux est local, frugalité du luxe, une *venustas* sous contrôle. Koolhaas modère ainsi l'investissement en matière, en énergie, en pollutions variées et en temps humain. En exprimant l'attention et l'effort ponctuellement, cette insertion rejaillit sur le tout, qui devient l'écrin du bijou.

Plus récemment, Koolhaas réexploite cette tension entre le local et le global, entre le brut et le raffiné avec les vitrages bombés de la bibliothèque Alexis de Tocqueville à Caen, alors que le reste de l'ouvrage est un ouvrage-pont, brut et à l'expression industrielle, projet d'ailleurs auquel Elioth a participé en tant que consultant sur les façades et la conception environnementale.

Le beau et la durée de vie

Et si ce supplément constructif¹ était d'abord destiné à accroître la durée de vie de l'édifice ? Son propriétaire l'admire, il tache de prolonger sa vie en limitant sa dégradation et en prenant soin. Son usager également, il veille à ne pas le dégrader. Il a conscience de ce luxe construit, il savoure la volupté de son usage et remercie le plaisir d'habiter ou de parcourir cette spatialité. Comprendre que cela a coûté, prendre conscience que ce qui nous est offert a réclamé de l'attention, sentir virtuellement la sueur des bâtisseurs, des artisans, invitent au respect de l'investissement d'autrui, voire parfois à une glorification de la mémoire des aïeux. On retrouve là un parallèle entre l'objet de luxe (la montre ancienne, les chaussures du bottier etc.) et l'architecture.

Le luxe est-il durable ?

« *Et si le luxe s'était l'espace* » déclamait une publicité pour nous vendre des automobiles toujours plus grandes, prélude à la déferlante honteuse, hors d'échelle, « boursouflée » dirait Olivier Rey [4], des *sport utility vehicles*². Pour l'architecture, la qualité de la construction, le soin du détail, le luxe parfois de l'ornement, sont des composantes importantes du plaisir et de l'émo-

Fig. 63. *Santo Domingo de Guzman*



Fig. 64. *Casa da Música par Koolhaas à Porto, au Portugal, et ses vitrages ondulés : sophistication locale au sein d'une brutalité globale.*



¹ Qui peut donc aussi parfois peser pendant l'usage.

² Ou l'acronyme SUV.

tion. Il n'y a qu'à voir comment les architectes de l'agence LAN, commissaires de l'exposition consacrée récemment à Haussmann¹ ont pris plaisir à redessiner, exhiber la richesse des modénatures, le catalogue des ornements et des accastillages de cet archétype (Fig. 62). Le patrimoine construit était révélé avec les codes scénographiques d'une boutique de luxe. Le temps de cette exposition, on se serait cru dans un *flagship store* de chez Hermès sur Omotesandō à Tokyo.

Amortir par le temps

Il est alors pertinent de questionner les rapports ambivalents qu'entretiennent luxe et écologie. Tout au moins de certains produits de grand artisanat comme ceux d'un maroquinier, dont les objets produits sont onéreux mais dont la pérennité est généralement extrêmement importante : amorti sur une longue période d'usage, le luxe coûte alors peu. Cela rappelle la truculente histoire de la montre de luxe ayant bravée la guerre du Vietnam, raconté par le personnage campé par Bruce Willis dans *Pulp Fiction*, film de Quentin Tarantino, Palme d'Or de Cannes en 1994 (Fig. 65). Vieille sans doute de cinquante ans, elle n'aura alors coûté qu'environ un centime de l'heure ! (Fig. 74) Adage connu d'Auguste Perret : « *L'architecture c'est ce qui fait de belles ruines* ». Ce sera notre hypothèse² pour l'interprétation du plus riche des derniers termes de cette triade *venustas*, le temps³, l'essence de l'architecture ?

Fig. 65. *Christopher Walken et la montre dans Pulp Fiction*



Dynamique d'énergie et de matière

Le chronogramme, métrique temporelle de l'architecture

Les externalités en fonction du temps

À ce stade, il devient utile d'introduire les diagrammes qui seront les outils récurrents dans la suite de ce mémoire. Il s'agit des courbes représentant les externalités écologiques d'un projet, cumulées au fur et à mesure de la vie de l'édifice : des diagrammes de coûts globaux selon différentes métriques environnementales. Ces chronogrammes (Fig. 66) pourront quantifier tantôt une grandeur de façon extensive, par exemple le cumul des gaz à effet de serre d'une construction au cours de sa vie, ou de façon intensive, cette même grandeur rapportée à la surface (le cumul des kgCO₂eq par mètre-carré utile par exemple). Ces diagrammes avaient été d'abord introduits dans un article d'un livre dont j'assurais la direction de publication pour Egis, intitulé *Petit Manuel de Transition Énergétique pour le bâtiment et la ville* [3]. L'inspiration était née à la fois de la lecture de Kazazian et de son *Age des choses légères* [1], mais aussi de retours de bâton d'expériences de sujets opérationnels chez Elioth, comme celui détaillé

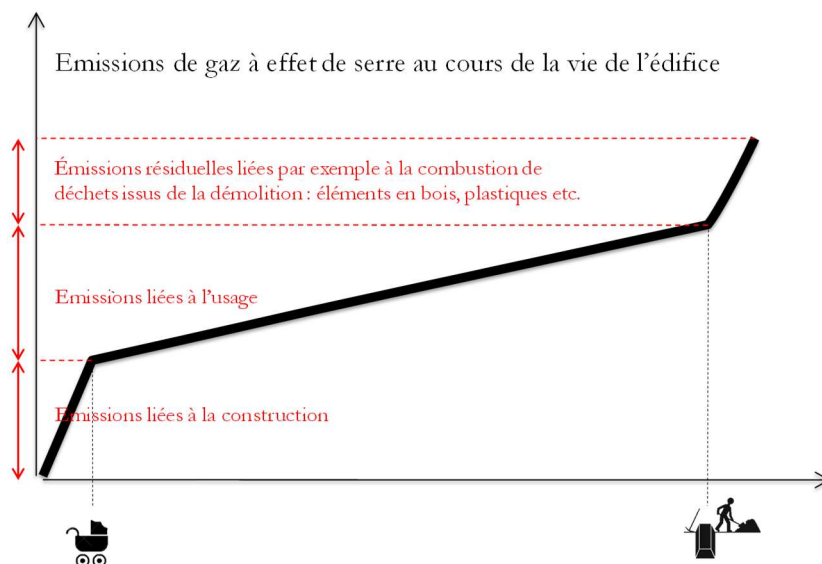
¹ En 2017, au Pavillon de l'Arsenal.

² Plus loin dans la lecture, nous verrons aussi comment les relations stock-flux et matière-énergie ne sont pas si univoques.

³ Tandis que *firmitas* serait le stock et *utilitas*, le flux.

dans le paragraphe qui suit, pour lequel nous étions consultant environnemental.

Fig. 66. Un chronogramme et la traduction en CO₂ de l'empreinte cumulée d'émissions de gaz à effet de serre d'une construction au cours de sa vie.



Vertige horizontal monégasque

Autour des années 2008, nous travaillions pour Bouygues et avec l'agence *Foster and Partners* pour la préfiguration de l'urbanisation en mer à Monaco, d'une nouvelle extension pour la conquête de nouveaux mètres-carrés très profitables à construire. Je me souviens du tiraillement entre d'un côté les réflexions bienveillantes sur les enjeux environnementaux, celui d'un marketing exploratoire visant à vendre les principes de futurs écoquartiers hyperluxueux et balnéaires, à grand renfort de réseaux d'énergie vertueux¹, d'efficacité énergétique, d'innovations, de certifications *Leed Platinum*, et de l'autre côté, le manque de recul, aucune conscience de l'évidence, celle de la dette constructive de cette future poldérisation, des remblais nécessaires qu'elle supposerait, des techniques sophistiquées de génie civil que réclameraient cette urbanisation en mer. Le regard était uniquement porté sur l'exploitation, et non sur la construction alors que le point de départ, l'« ordonnée à l'origine » était gigantesque. L'énergie intellectuelle dévolue aux questions environnementales était à mon sens investie très clairement sur le mauvais sujet.

¹ La chaudière à bois et son réseau de chaleur étant en général l'apanage des écoquartiers.

Les stocks

S , le stock construit, le stock transformé

Sur la base de cet exemple, et par la suite, nous noterons « S » cette ordonnée à l'origine constructive, ce « stock cristallisé » permettant un usage¹. S est la dette d'édification, le saut initial lié à l'acte de transformer la matière pour construire un ordre, cristallisé dans un stock construit (Fig. 67). Pour élaborer un suivi complet d'une architecture, il conviendra idéalement de mesurer les différents stocks énergie-matière et CO₂. Si l'impact étudié est l'énergie, S_e correspond à l'énergie incorporée (ou grise) exprimée comme une quantité d'énergie primaire qui aura été nécessaire à l'édification².

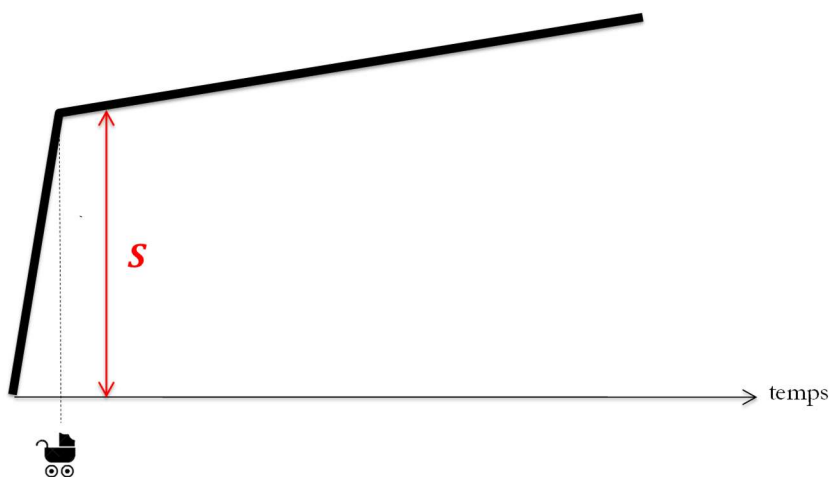


Fig. 67. La dette constructive, le stock édifié de matières, la masse construite selon un certain ordre choisi par les concepteurs et les constructeurs.

Si l'impact analysé concerne les émissions de gaz à effet de serre, S_{CO_2} correspond dans ce cas aux émissions de CO₂ dits « gris » ou « embarqués » liés à l'acte de construction ou de transformation. S_m caractérisera une grandeur relative à la matière, qui pourrait être dans le cas monégasque la masse totale de sable réclamée. S est un « capex »³ au sens financier du terme. Pour analyser l'impact « matière », le stock sera alors indicé de la sorte S_m . Nous verrons plus loin la métrique associée à chacune de ces valeurs et en particulier celle plus complexe relative à la matière. Concernant l'énergie grise, la part d'énergies renouvelables sera un indice déterminant pour juger de la « renouvelabilité » d'une architecture (chapitre #17).

¹ Habiter, produire, protéger, défendre, se réunir, manger...

² Et les unités seront préférentiellement des Joules ou des kilowatts-heure d'énergie primaire.

³ Les CAPEX ou dépenses d'investissement (de l'anglais *capital expenditure*), se réfèrent aux immobilisations, c'est-à-dire aux dépenses qui ont une valeur positive sur le long terme. Par exemple, l'achat d'un photocopieur est le CAPEX (non consommable), et le coût annuel de papier et de cartouches consommées est l'OPEX. D'après Wikipédia.

De même que la part renouvelable et/ou réemployée si le stock mesuré concerne la matière (en poids ou en volume). Pour les deux premiers, de distinguer la part renouvelable de la part fossile ; pour le CO₂, de séparer la part d'émissions nettes de gaz à effet de serre¹ de la part séquestrée par des matériaux biosourcés par exemple. Nous reviendrons dans d'autres articles sur ces notions (chapitres #17 et #29).

$$S = \text{stock}$$

S' , l'architecture mise à jour

Ce stock peut représenter les mises à jour, les transformations d'un existant. Ce stock complémentaire S' sera alors à additionner à la somme des stocks antérieurs. Ce bilan permet de consolider une externalité² liée à l'édification et à ses transformations successives (#23). S' correspond par exemple au remplacement des fenêtres, à la rénovation d'une toiture, au changement d'une chaudière. Cette mise à jour peut également être additive dans le cas de l'extension d'une construction existante (Fig. 69).

Fig. 68. Dessin de Carmelo Baglivo

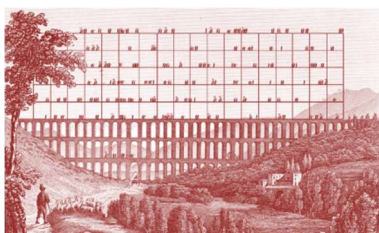
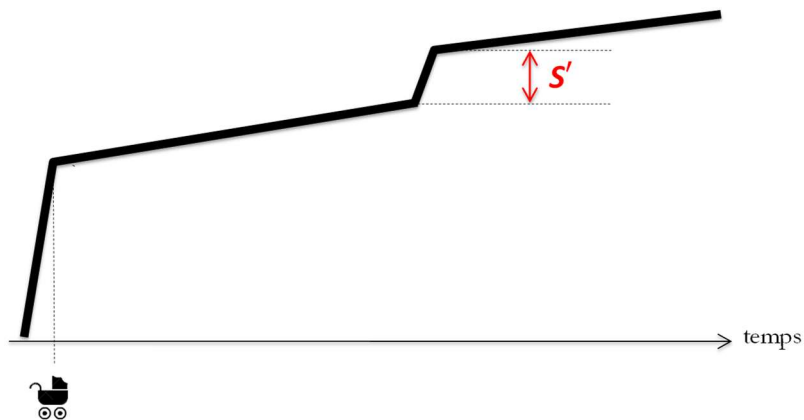


Fig. 69. S comme notation pour désigner l'entropie d'un système en thermodynamique.



¹ Exprimées par exemple en tonnes équivalent CO₂

² Par exemple l'énergie grise ou encore les émissions équivalentes de CO₂

Les flux

Consommation annuelle et puissance moyenne

« f » est un flux consommé ou produit lors de l'usage d'une construction. Rappelons qu'une construction peut concerner une grande diversité d'échelle : dimensions kilométriques d'une infrastructure (Fig. 68) à celle d'un composant comme une fenêtre (sujet analysé dans le chapitre relatif au solaire passif) ou encore à celle du mobilier (vu dans le cadre de l'expérience autour du mobilier climatique évoqué dans la troisième partie) (Fig. 70).

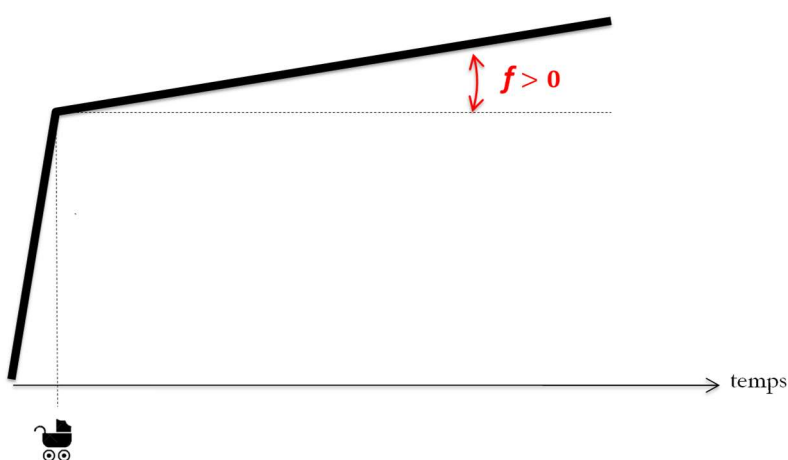


Fig. 70. Les flux récurrents de besoins d'un édifice consommateur d'énergie ou émetteur de gaz à effet de serre ou encore consommateur de matières. Le chronogramme ci-dessus pourrait par exemple correspondre au flux de consommation d'une maison récemment construite¹ ; ou encore les émissions annuelles de CO₂ de ce même bâtiment ; ou encore les besoins récurrents en eau d'un logement. Il pourrait aussi représenter la synthèse des coûts financiers pour construire puis ensuite utiliser l'édifice.

À la différence du stock, le flux est une mesure dérivée du temps, autrement dit une quantité de quelque chose divisée par une durée². Par exemple un bâtiment dit à basse consommation et dont la consommation annuelle d'énergie primaire serait de 50kWh_{EP} par m², cette dernière valeur correspond bien à un flux. Pour une unité de surface, elle compare une quantité d'énergie à une durée de temps. Exprimée en puissance primaire moyenne, ce bâtiment³ est à 6W_{EP} par m². Cette gymnastique consistant à convertir des quantités sur une période de temps en flux moyen est importante : il en sera souvent question dans la suite. Le flux peut aussi représenter une quantité de matière consommée ou produite en cours d'exploitation. Si la « construction » analysée concerne un hectare de forêt, f_m pourra mesurer le flux de biomasse produite au cours du temps en volume de bois annuel (chapitre #22).

¹ En puissance moyenne ou en quantité d'énergie rapportée à une durée de temps ce qui revient au même

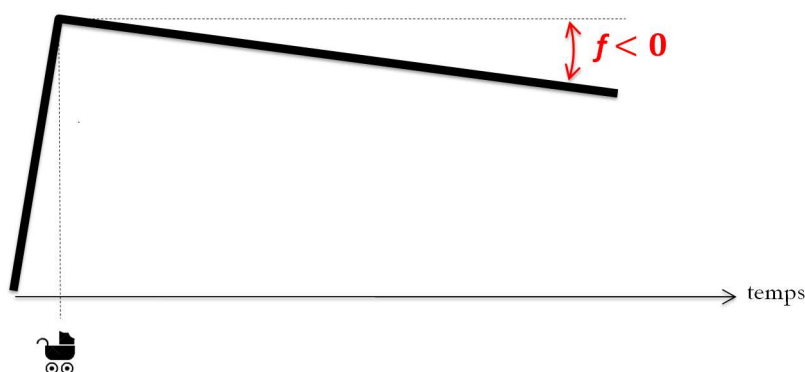
² De la matière mesurée en kilo par exemple, ou encore de l'énergie mesurée en joules ou encore des tonnes équivalent de CO₂

³ 50kWh/an = 50kWh/8766h ~ 0,0057kW ~ 5,7W ~ 6W

Une convention à retenir

Aussi, par convention, nous considérerons qu'un signe positif correspond à une consommation, à un débit de flux. J'ai longuement hésité sur le choix de cette convention (Fig. 71). D'un côté, il pouvait s'agir de rendre « algébriquement » positif un bâtiment qui ambitionnait de l'être.

Fig. 71. *La situation d'un édifice producteur : par exemple une centrale photovoltaïque si le flux mesuré est l'énergie. Ce graphique peut aussi correspondre à une séquestration de carbone atmosphérique par un hectare de forêt si le flux analysé est le CO₂ ; ce chronogramme peut être enfin la production de matériaux si l'analyse se porte sur la matière.*



À contrario, la presque totalité de l'architecture mondiale est « deux fois négative » : débiteur à la fois pour son stock comme du point de vue de son exploitation. La plupart des graphiques qui viennent auraient alors été présentés « la tête à l'envers », comme des portraits de l'empreinte écologique peints par Baselitz, artiste dont la marque de fabrique consiste à représenter le sujet à l'envers. Cette convention est celle d'une écriture comptable et le flux f sera un « opex »¹ de notre définition large de l'architecture. Comme pour les stocks S , les flux seront indiqués selon la grandeur analysée au cours de la vie de la construction.

$$f = \text{flux}$$

Pour une production (par exemple la puissance mécanique générée par un moulin à eau), le flux sera associé à un signe négatif. Un hectare de forêt durablement exploité, et séquestrant ainsi du carbone atmosphérique, agira comme une pompe à CO₂ et selon notre convention, son coefficient f_{CO_2} sera dès lors négatif. Par la même convention, f_{CO_2} positif correspondra à un système émetteur de gaz à effet de serre.

¹ « Opex » est un terme courant en ingénierie financière pour désigner les *operational expenses*.

Temps et bilans

Le temps de vie

Définition

Les deux grandeurs S et f introduites, la troisième variable importante de ce mémoire est homogène à un temps, à une distance temporelle, elle mesure la durée de vie de la construction¹ (Fig. 72). Cette valeur est soit constatée à la destruction d'une construction², soit évaluée au moment de la conception pour une construction nouvelle ou transformée. Cette durée peut aussi correspondre à la somme des vies successives liées à plusieurs transformations.

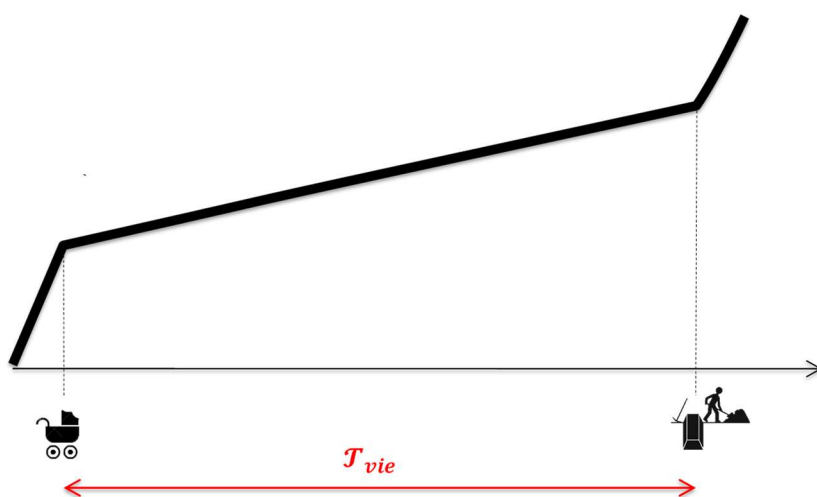


Fig. 72. *La durée de vie, paramètre essentiel.*

La durée effective d'usage

Permanence sans usage, est-ce la durabilité ? Évidemment non. Dès lors il sera souvent nécessaire de diviser certaines métriques non pas par la durée de vie de l'édifice mais selon sa durée effective d'usage. Sur le volet de l'énergie nous jugerons l'efficacité non pas à la toise du kWh par m² et par an mais plutôt la consommation par habitant et selon la durée réelle de son usage. De ce point de vue, la mesure de l'efficacité énergétique dans les transports est plus avancée puisqu'elle mesure généralement les consommations au « passager.kilomètre » ou à la « tonne-kilomètre » transportée (chapitre #24).

¹ Analysée ou projetée.

² Ou l'abandon irrémédiable

Le bilan global énergie-matière

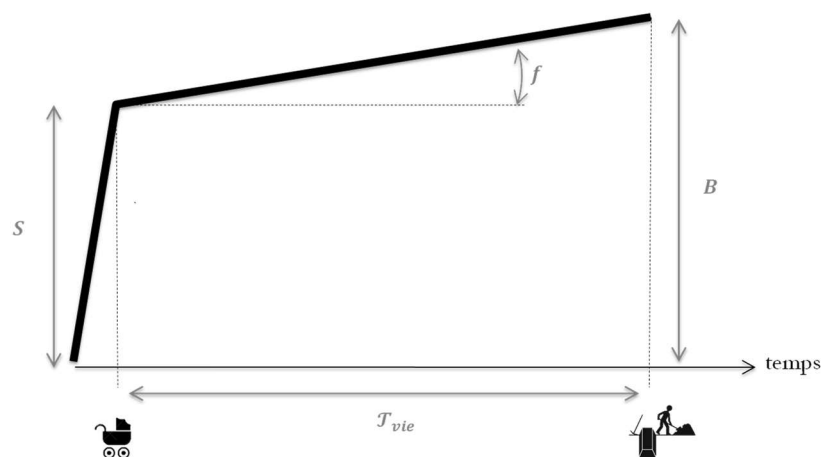
Définition du bilan

Le bilan (Fig. 73) correspond au cumul des externalités analysées et s'écrit :

$$\text{Eq 1. } B = f \cdot T_{vie} + S$$

Les notions de bilan seront évoquées au cours des chapitres de la première partie, pour représenter par exemple le bilan énergétique globale d'un panneau solaire, dans le chapitre consacré aux énergies solaires (chapitre #13). Les bilans seront aussi un crible fort utile pour distinguer la nature des époques et nous verrons comment le temps V , l'architecture-énergie (#16) tente de trouver la voie de construction dont le bilan d'énergie serait négatif. Des développements mathématiques plus fournis feront l'objet d'un chapitre consacré dans la deuxième partie (#20). Enfin, les exemples de projet personnels de la troisième partie utiliseront aussi cette notion (à partir de #23).

Fig. 73. *Chronogramme de synthèse d'un bilan écologique*

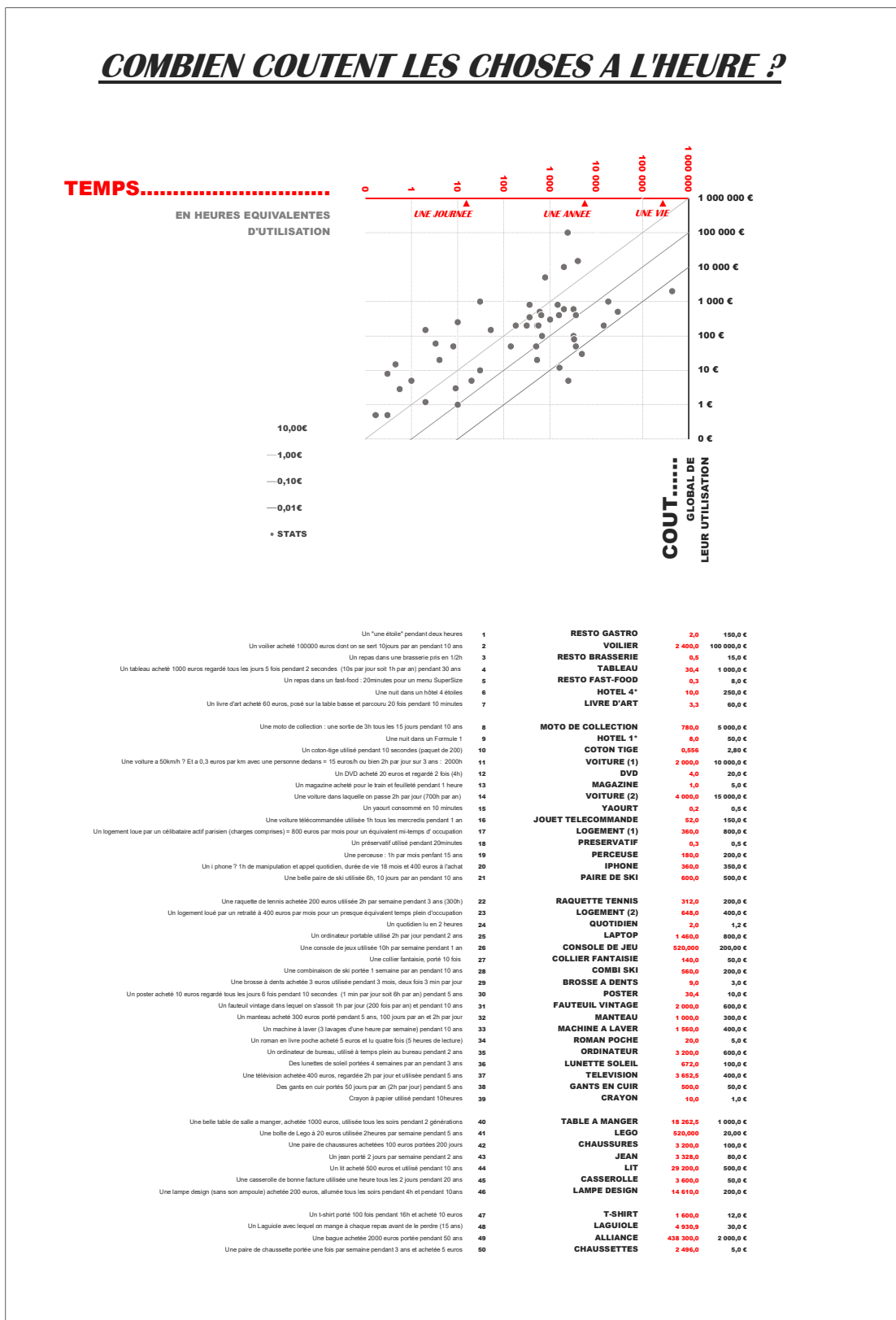


*

Bibliographie

1. KAZAZIAN Thierry, *Design et développement durable : Il y aura l'âge des choses légères*, Victoires Éditions, 2003
2. VITRUVÉ, *De Architectura*
3. MENARD et al., *Petit manuel pratique de transition énergétique pour le bâtiment et la ville, Convictions et solutions d'ingénieurs-concepteurs*, Egis, 96 p, juin 2013
4. REY Olivier, *Une question de taille*, Stock, 2014
5. LEVIN Sol, *Resturacion de Santo Domingo de Guzman, Oaxaca*, INAH, 1998

Fig. 74. Recherches en 2011 sur le coût des choses rapporté à leur durée estimée d'usage.



Partie 1. Une histoire en sept temps

Le récit des sept temps de la trilogie énergie-matière-architecture, avec un « temps zéro » qui précède l'apparition des hominidés.

Des chapitres par grandes époques et quelques incursions du côté des énergies renouvelables, architectures à l'interface de la matière et de l'énergie.

Quelques considérations sur les matières à construire, en anticipation de la deuxième partie et de l'horizon du temps VII.

Le temps à venir de l'architecture renouvelable, post-carbone, post-matières fossiles, post-énergies fossiles et résiliente face aux chocs à venir.

#6 Temps zéro d'un duo

Une typologie des époques. Quelques classements temporels selon différents auteurs. La frise des épisodes de cette première partie et sa comparaison avec d'autres chronologies. Le point zéro du grand feu d'artifice énergie-matière, le *Big Bang*, les galaxies, le système solaire, la Terre jusqu'à l'apparition du vivant puis des premiers hominidés.

Un hors d'échelle temporel

Charles Jencks, la post-modernité universelle

Premier saut, l'ère de l'énergie

En 1995, dans *The Architecture of the jumping universe* (Fig. 75), l'architecte écossais Charles Jencks, l'un des gourous du mouvement post-moderne, s'aventurait à narrer une histoire cosmologique de l'architecture en introduisant une chronologie universelle articulée autour de quatre sauts successifs [1]. Dans sa fresque, Jencks présente le premier saut (i) comme le départ de *l'ère de l'énergie*, coïncidant avec les premières secondes de l'Univers. Un instant fugace, l'existence très brève d'une soupe primordiale de quarks et de photons, quelques fractions de seconde après le Big Bang, l'instant zéro de la grande histoire.

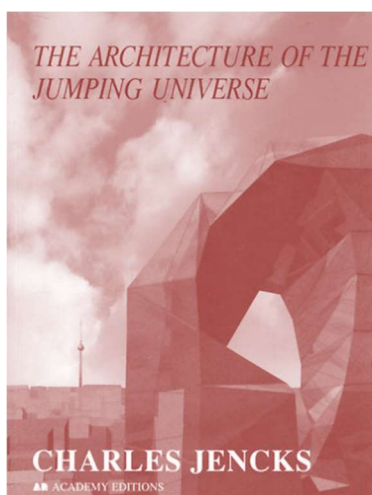
Deuxième saut, l'ère de la matière et les deux bonds suivants

Pour Jencks, un deuxième saut (ii) survient quelques secondes plus tard, ce sera *l'ère de la matière*, qui s'étend sur onze milliards d'années, suite à la transformation de l'énergie du Big Bang en un couple matière et antimatière. Cette très longue période donne naissance aux atomes puis aux étoiles et aux galaxies. Elle s'achève avant l'émergence de la vie. Il y a trois milliards d'année, survient le troisième bond (iii), *l'ère de la vie*. Le quatrième et dernier saut apparaît il y a près de cent mille ans (iv), *l'ère de la conscience* avec l'apparition de l'homo sapiens, l'émergence du langage, de la pensée, de la culture et de l'art.

Une mise en perspective cosmologique

Ce récit *new age* est inspirant par la perspective créée, entre d'un côté le récit cosmologique, et de l'autre, avec l'histoire récente de l'architecture. Des raccourcis un peu triviaux rendent parfois cette correspondance bancale et imparfaite, mais l'intention est sincère : faire émerger une post-modernité écologique, où la non-linéarité des attracteurs étranges de Lorenz innerveraient la représentation du projet d'architecture.

Fig. 75. *The Architecture of the jumping universe* [1]



Pointé dans la controverse d'Alan Sokal en 1996¹, Jencks se complait souvent dans un vocabulaire scientifique complexe, en épousant des notions mathématiques sophistiquées, paraissant parfois ne pas toujours les maîtriser, une coquetterie rhétorique finalement semblable à autre personnage érudit, et éminent de la post-modernité française, Henri Gaudin lorsqu'il s'appropriait la théorie des catastrophes du mathématicien René Thom².

Des géométries trop savantes

Chez Jencks, comme illustration à son grand récit, les bifurcations des suites à dynamique non-linéaire, fabriquent une modénature pour un meuble de cuisine³. Nous voyons éclore avant l'heure un plaisir des formes et des motifs, souvent non maîtrisés, qui seront quelques années plus tard, l'apanage, la marque de fabrique des Greg Lynn, Frank Gehry, Coop Himmelblau ou Zaha Hadid.

En convoquant l'éminent Christopher Alexander [2], Charles Jencks clôt son panthéon de références des sciences de la complexité, de la thermodynamique, de l'astrophysique pour créer une perspective emphatique d'une post-modernité écologique et universelle en quête d'identité formelle. Cette gourmandise à la complexité des formes initie l'appétence contemporaine pour le biomimétisme, à la fascination des géométries savantes de la nature, à leur réplification souvent baroque dans l'architecture et le design.

La démesure

The Architecture of the jumping universe est aussi l'un des premiers livres d'architecture que j'avais acquis⁴ et il m'a assurément marqué autant dans sa critique virulente de la Modernité que dans sa dénonciation du hors d'échelle, thématique repris avec brio dans le livre de Olivier Rey, *Une question de taille* [3]. Jencks pointait par exemple la démesure de l'Arche de la Défense de l'architecte Otto von Spreckelsen symptomatique de l'inconscience de l'*homo economicus*. C'était ce même Jencks qui signait l'acte de décès de la modernité avec la destruction de l'ensemble urbain, Pruitt-Igoe (Fig. 77), dans le Missouri en 1976 (il en sera à nouveau question dans le chapitre consacré à l'architecture du temps IV, chapitre #14).

Fig. 76. Diagramme « ordre – complexité » par Charles Jencks

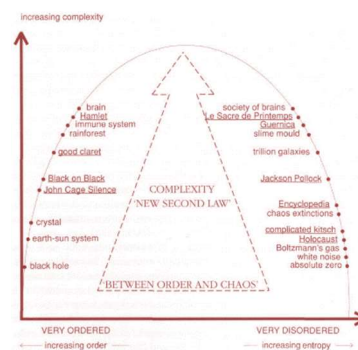


Fig. 77. Ensemble urbain, Pruitt-Igoe, dans le Missouri, par l'architecte Minoru Yamasaki



¹ L'affaire Sokal a pour origine la publication d'un article, qui s'avéra ensuite être un canular, par le physicien Alan Sokal, professeur de physique, dans la revue *Social Text*.

² Ou d'un Jean Nouvel avec Paul Virilio.

³ Charles Jencks, *Organization Emerging in Chaos*, 1992. p46

⁴ Je m'en souviens, à la librairie du musée Peggy Guggenheim de Venise en 1995.

Voir le temps, une synthèse chronologique

La frise

La première partie de ce mémoire est chronologique. Les deux premiers épisodes emprunteront d'ailleurs les temps décrits par Jencks, ses fameux bonds (chapitre #7). Cette mise en perspective temporelle coïncide avec mon goût pour l'histoire et le désir de représenter le temps spatialement, le plaisir d'écolier qui figurait sur les murs de nos classes de primaire. Celle du peintre David Hockney, montrée en double page de son ouvrage *Savoirs secrets* est à ce titre absolument splendide (Fig. 78). Elle expose les cartes postales des tableaux et des dessins reproduits par les musées et glanés par le peintre. Hockney les a ensuite réorganisées selon la flèche du temps, avec les tableaux du nord de l'Europe en haut de sa frise, et réciproquement pour ceux du sud de l'Europe (*Le Grand Mur*¹).

Fig. 78. Fresque de David Hockney

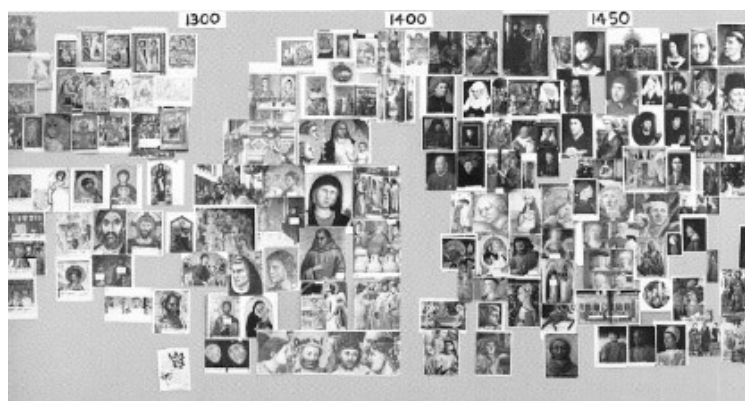
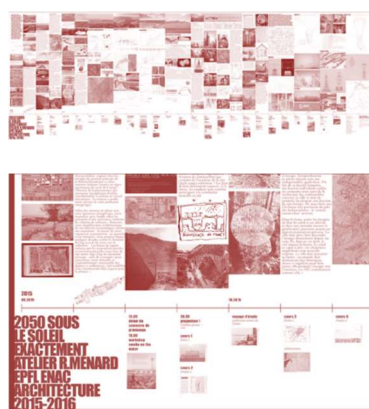


Fig. 79. La frise récapitulative de « 2050, sous le soleil exactement » et zoom sur le coin bas gauche en partie basse.



Le temps comme outil de projet

Dans mon mémoire de diplôme, *Le classement mode d'emploi* [4], je m'aventurais à une mise en perspective historique entre une chronologie du savoir, de la façon dont la connaissance se consignait à travers les âges et au rapport entretenu avec la manière de classer et de représenter spatialement l'information et la mémoire. Tic personnel, la frise temporelle est une représentation que je réclame régulièrement aux étudiants comme par exemple dans l'étude sur l'aéroport du futur ou encore sur l'enseignement en 2030, études effectuées dans le cadre du DPEA. Il y a aussi les mises en abîme pédagogique comme le récapitulatif de l'atelier *2050, Sous le soleil exactement* (Fig. 79). Aussi ce mémoire s'interroge sur la façon de représenter cette chronologie énergie-matière-architecture. Les dessins ci-contre (Fig. 80) relatent quelques hypothèses de représentation et les recherches par le dessin, comme la description d'un cycle thermodynamique global, circulant des renouvelables vers les quadrants des stocks fossiles pour tenter de revenir *nécessairement* vers une économie des flux...

¹ Daté du 31 mars 2000 dans l'édition de *Savoirs secrets, les techniques perdues des maîtres anciens*, édition du Seuil

Une synthèse chronologique

Quelques figures

Avant d'entamer la lecture de notre frise, avec ce séquençage approximatif selon sept temps, la suite synthétise quelques repères temporels, empruntés à plusieurs auteurs, et plus particulièrement John Perlin sur les dates-clés du développement de l'énergie solaire [5] ; également à Bill Addis [6]. Enfin, dans cette tentative d'un « récit total » pour arriver à une typologie grossière de l'architecture écologique (ou plus exactement d'architectures responsables ayant pleinement conscience des limites planétaires), il serait inconvenant de ne pas citer Fernandez-Galliano et son *Fire and Memory* [7] ou encore Ahmed Zaib Khan [8].

Jalons temporels des 7 temps

Temps 0 (chapitre #6)

- 13,8G Big Bang (environ -13,8 milliards d'années)
- 4G Constitution de la Terre

Temps I, avant le feu (chapitre #7)

- 3,2MLucie, *Australopithecus afarensis*
- 400k Premières conversions de la biomasse en feu

Temps II, après le feu (chapitre #7)

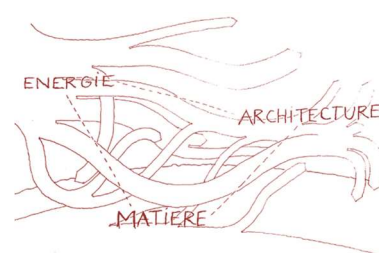
- 400k Premières conversions de la biomasse en feu
- 10k Naissance de l'architecture [9]
- 8500 Passage du paléolithique au néolithique
- 6000 Premier outils en cuivre [10]
- 4000 Naissance de la roue
- 4000 Apparition de l'écriture en Mésopotamie

Temps III (#9)

- 2000 Naissance des roues hydrauliques [11]
- 1400 Premières arches connues en brique¹ [6]
- 1200 Début de l'âge du fer
- 100 Premières fenêtres en verre
- 50 Premier ciment avec liant hydraulique
- 800 Premières éoliennes [11]

¹ Selon Addis, 0,8m de portée à Ur, en Mésopotamie

Fig. 80. Une esquisse de représentation des entrelacs et de la circulation entre l'énergie, la matière et l'architecture.



-
- 1180 Premières éoliennes en Europe [6]
 - 1400 Développement des moulins à eau
 - 1450 Naissance de l'imprimerie
-

Temps IV, séquence 1 (#12)

- 1670 Naissance de l'industrie du verre plat en France
 - 1708 Création de la première machine à vapeur par Newcomen
 - 1742 Premier poêle Franklin
 - 1779 Premier pont en fer à Coalbrookdale, Angleterre
 - 1784 Brevet de la machine à vapeur par James Watt
 - 1820 Début de la ventilation mécanique dans les grands édifices
 - 1820 Théorie du cycle thermodynamique par Sadi Carnot
 - 1824 Brevet pour le ciment « Portland »
 - 1830 Invention et commercialisation des turbines hydrauliques
 - 1847 Concept d'énergie formalisé par Helmutz
-

Temps IV, séquence 2, la Grande Accélération (#14)

- 1859 Premier puits de pétrole par Drake
 - 1859 Découverte par Arrhenius du pouvoir à effet de serre du CO₂
 - 1850 Convertisseur Bessemer pour affinage de la fonte en acier¹ [10]
 - 1860 Premiers moteurs mus par l'énergie solaire
 - 1870 Premiers essais de béton armé par Payne et Hyatt
 - 1880 Première mesure de la concentration de CO₂ (290ppm)
-

Temps V, les alternatives aux énergies fossiles (chapitre #16)

- 1891 Premiers chauffe-eaux solaires commerciaux
 - 1900 Début du bitume sur les routes
 - 1900 Début de la climatisation dans les grands immeubles² [6]
 - 1930 Début de la polymérisation et de la plasturgie
-

Temps VI, les alternatives aux matières non renouvelables (#17)

- 1940 Apparition du bois lamellé collé
 - 1950 Utilisation de l'aluminium pour la structure
 - 1950 Début des containers *Liberty ships* par la Sea-Land Service³ [10]
 - 1952 Verre structuré avec *Glasbau Hahn*, Frankfurt-am-Main
-

¹ Selon Bihouix, p49

² Selon Addis

³ Selon Bihouix, p55

1972 *Limits to Growth* par l'équipe des Meadows

Temps IV, séquence 3, la démesure et le boursoufflage (#14)

- 1973 Embargo de l'OPEP. Premier choc pétrolier (330ppm)
 - 1979 Révolution iranienne. Second choc pétrolier.
 - 1986 Point bas du contre-choc pétrolier, baril à \$10
 - 1986 Accident à la centrale nucléaire de Tchernobyl, URSS
 - 2011 Accident à la centrale nucléaire de Fukushima, Japon
-

Temps VII (#18)

- 2015 Début de parité réseau du photovoltaïque
- 2015 Signature de l'Accord de Paris, COP21
- 2016 Concentration de CO₂ supérieure à 400ppm
- 2017 Stratégie de neutralité carbone de la Ville de Paris

Fig. 81. *Une chronologie du trio.*



Le Big Bang, la Terre avant Sapiens (épisode 0)

Quelques repères temporels (G correspond à des milliards d'années) :

-13,8G	Big Bang, explosion d'énergie de très haute qualité
-13,8G+...	Formation des premières particules de matière
-13,8G+380k	Formation des premiers atomes
-4,6G	Formation du Soleil, principalement composé d'hydrogène
-4G	Formation de la Terre, petite sphère de matières plurielles

Cette gigantesque oscillation du vide

Heisenberg

C'est ainsi que tout commence, cette patiente enquête des hommes, la recherche de nos origines. Notre lente accumulation de connaissances conclut pour l'instant à cette piste : l'histoire de l'Univers, la naissance du temps, l'origine simultanée de l'espace et de la matière débute il y a plus de treize milliards d'année. Et d'ailleurs, peut-être sur un malentendu, par une immense fluctuation du vide¹, une gigantesque incertitude quantique qui aurait emprunté une quantité phénoménale d'énergie au néant [12]. Un flash inouï d'énergie que l'Univers ne connaîtra sans doute plus. La plus grande relance keynésienne de l'histoire, le plus grand emprunt jamais conclu, le *Big Bang*².

Einstein et Riemann

Selon ce récit, et émergeant de cette bouillie primordiale, l'énergie engendre la matière selon l'équivalence formulée par Albert Einstein au début du 20^{ème} siècle³, $E=mc^2$ [13]. Matière et antimatière se délient, la dédensification progressive de la matière décintre et aplanit les involutions de l'espace-temps, pour générer des lieux d'univers où la densité de matière devient extrêmement faible (Fig. 81). L'espace-temps et la matière se déploient, se détendent, s'éloignent, selon des géométries et des densités qui vont permettre de nouveaux futurs, à l'échelle des amas de galaxies. L'espace euclidien naît çà et là et rendra bien plus tard licite le « poème de l'angle droit » cher à la modernité en architecture, approximation très locale, nous dirons *tangentielle*, d'un univers décidément bien courbe et aux topologies variées.

¹ Un gigantesque effet Casimir, effet décrit par la théorie quantique des champs.

² Le principe d'incertitude de Heisenberg traduit en énergie et en temps : $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$

³ Et qui dont une équivalence contraire, donnera naissance au feu nucléaire de la fission puis sous forme incontrôlé, de la bombe H, à la fusion nucléaire : la matière redevient énergie pure dans ces deux transformations.

Le paysage universel

Les étoiles, splendides convertisseurs matière-énergie

Ainsi naissent des grumeaux de complexité qui s'organisent selon des parlements d'étoiles, et dont chacun des feux, équilibrant les forces de gravitation (centripètes) avec les forces de réactions nucléaires (centrifuges), « évaporent » de la matière pour la retransformer en énergie, tout en fusionnant les noyaux atomiques légers. Les feux stellaires mangent en quelque sorte une « néguentropie intérieure », contenue dans les éléments atomiques les plus légers : les étoiles consomment l'ordre inhérent à l'organisation des noyaux peu massiques, pour les convertir en d'autres espèces de noyau et en flux d'énergie.

Tous de fer à -270°C : voilà notre destin

Lorsque toute la matière aura fini par converger vers son état le plus stable, un jour donc, l'Univers ne sera peut-être qu'un espace froid, très peu dense et ne comportant que des atomes de fer, le noyau atomique le plus stable du tableau de Mendeleïev (Fig. 82). Ainsi va notre destin entropique, celui de l'énergie et de la matière. Autrement dit, une fois consommée toute la néguentropie immense du *Big Bang*, ce « flash d'ordre absolu », nous tendrons vers un Univers sans contraste de températures et sans aucune diversité des principaux composants de la matière.

Nous sommes en route vers une convergence à 3 kelvins¹, notre horizon climatique, absence de flux d'énergies, et nous courrons vers un tableau de Mendeleïev principalement centré autour de l'élément « Fe 26 », le fer. Voilà de façon sans doute brouillonne et imprécise ce que nous apprend la modernité en astrophysique [14].

« Depuis environ sept milliards d'années, l'expansion de l'Univers n'a cessé de s'accélérer. Et si l'expansion de l'Univers s'accélère, les galaxies et leurs étoiles, les sources de lumière et de chaleur dans l'Univers dans l'Univers, s'éloignent de plus en plus les unes des autres. L'Univers entier se refroidit de plus en plus. »²

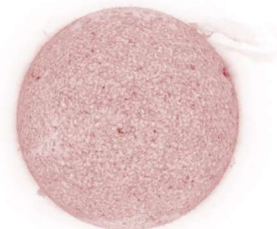
Système solaire et Soleil

Avant cette mort sidérale, quelques milliards d'années après la naissance de l'Univers, aux confins d'une galaxie, la *Voie lactée*, naît un petit ensemble planétaire en orbite d'une étoile tout à fait courante, et au demeurant relativement petite, le *Soleil* (Fig. 83). Sa masse³ le positionne dans la catégorie des étoiles légères. Le Soleil est l'expression du parfait équilibre entre les forces centripètes dues à son propre effondrement gravitationnel et les forces centrifuges de la pression générée par la fusion thermonucléaire régnant en son sein.

Fig. 82. *Tableau de Mendeleïev et les briques fondamentales de l'architecture.*

Le tableau de Mendeleïev est présenté avec l'élément Carbone (C) au centre, entouré d'un rectangle rouge. Le numéro atomique 6 et la masse molaire 12,011 sont indiqués. Les briques fondamentales de l'architecture (B, C, N, O, F, Ne) sont également mises en évidence.

Fig. 83. *Photo du soleil*



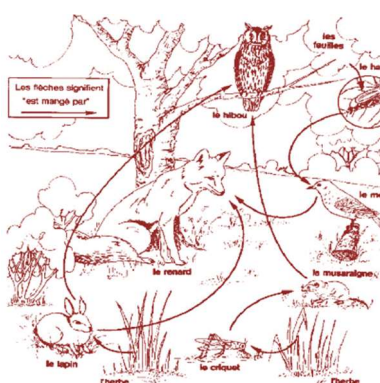
¹ Soit -270°C.

² p120, *Sur les épaules de Darwin. Les battements du temps.* Jean-Claude Ameisen.

³ De 2.10³⁰ kilos, soit 330 000 fois la masse de la Terre.

Au terme d'une longue vie de dix milliards d'années ayant concouru à transformer de l'hydrogène en hélium¹, le Soleil brûlera son hélium et se dilatera. Ensuite sa taille sera semblable à celle de la Terre pour n'être qu'une étoile solide appelée « naine blanche ». Le premier chapitre de la deuxième partie décrit plus précisément les caractéristiques solaires et ses incidences terrestres (chapitre #19).

Fig. 84. La chaîne de prédation comme un diagramme de Sankey.



Le contexte énergie-matière à l'échelle planétaire

La prolifération du vivant

Notre planète, la Terre, est située en troisième position après Mercure et Vénus. Aux origines, il y a probablement un peu moins de trois milliards d'années², le vivant s'installe et commence à prendre racine sur notre vaisseau terrestre. Comment ce miracle s'est-il produit ? [15] Sans doute par un³ parfait mix *énergie-matière-température* ayant permis la lente maturation d'une chimie du carbone, devenant de plus en plus élaborée. Selon l'hypothèse de François Roddier, celle d'un troisième principe de la thermodynamique [16], le vivant prospère, comme autoprogrammé pour faire régner sa prolifération⁴. La biocénose se nourrit de la production de matières générées grâce à l'énergie solaire. En dézoomant, la chaîne de prédation animale n'est finalement qu'un avatar particulier d'un diagramme de Sankey. Toute proie n'est que le vecteur énergétique « intrant » du prédateur. La proie permet de consolider l'énergie grise du prédateur et d'entretenir ses fonctions vitales. Le vivant est une cascade de cycles énergie-matière-information (Fig. 84).

Cent soixante-neuf watts par mètre-carré

Pendant des millions d'années, et sous le flux de notre « douche solaire » permanente et les quelques 169 watts par mètre-carré en moyenne disponibles (chapitre #19), le « compte de résultat énergétique » de la planète est positif. Les richesses s'accroissent et le capital énergétique terrestre augmente (Fig. 87). Si S_e mesure la quantité d'énergie stockée sur notre « vaisseau planétaire », cette valeur augmente au cours de ces millions d'années. Les profondeurs de la Terre emmagasinent une partie de l'énergie solaire par les dépôts des couches organiques successives de la matière transformée sous le soleil. Ce seront les futurs charbons, pétroles et gaz que nous consommerons avec frénésie avec le déclenchement du temps IV (#12 et #14).

¹ En émettant de l'énergie du fait du « défaut de masse » de cette transformation.

² Le troisième bond de Jencks.

³ Il est possible que d'autres configurations puissent permettre la génération de complexité. Pensons à la chimie du soufre et les formes de vivant trouvées dans les grandes profondeurs et à proximité de sources géothermiques très chaudes.

⁴ « Dans un système thermodynamique ouvert, les structures dissipatives s'auto-organisent pour maximiser leur dissipation d'énergie »

Le vivant, mémoire du feu solaire

De fait, la surface et les profondeurs superficielles de la biosphère capitalisent une infime fraction de l'énergie solaire reçue. Sous le flux solaire, la photosynthèse permet la transformation, puis le stockage de l'énergie en biomasse de façon très concentrée dans les couches géologiques successives. La décomposition de la matière organique fabrique les premiers sédiments, ces derniers emmagasinant de l'énergie sous forme chimique. Le sol agrège et stocke petit à petit une « mémoire énergétique » de ce feu solaire du passé. Les amoncellements successifs de sédiments organiques consolident patiemment un potentiel énergétique qui ne sera réveillé que tardivement avec l'exploitation des énergies fossiles.

La lente constitution d'une épargne énergétique

En l'absence de ponction sur ce capital accumulé, cette richesse énergétique¹ augmente lentement dans des temps bien antérieurs à l'apparition de l'humanité. En plusieurs millions d'années, la Terre épargne une richesse énergétique dont la consolidation charbon, gaz et pétrole correspondrait encore à environ 900 GTep², soit autant que l'énergie solaire reçue sur la surface du globe en cinq jours ! Quoique nous rencontrions sans doute au cours de ce siècle le pic de la demande énergétique de l'histoire de l'humanité, cette demande ne correspondra qu'à une fraction dérisoire de l'énergie solaire reçue à la surface du globe³ (chapitres #16 et #19).

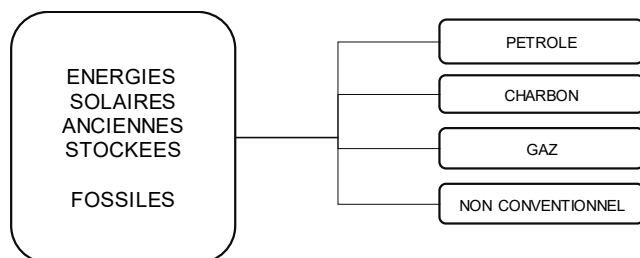


Fig. 85. *Un extrait de l'arborescence des énergies primaires et zoom sur le solaire ancien.*

La patiente maturation des hydrocarbures

Ces élixirs de soleil, ces « gnôles de carbone⁴ » auront réclamé des dizaines de millions d'années pour être formées. Patiemment le vivant aura pompé du carbone atmosphérique. Une fraction sera emprisonnée dans nos sols continentaux ou océaniques. L'énergie du flux solaire aura permis la transformation de chaînes carbonées complexes. L'architecture de la matière permet de stocker une petite quantité du feu solaire et la matière devient alors un stock, une batterie énergétique.

¹ Située dans les couches géologiques supérieures

² 912GTep de réserves mondiales d'énergies fossiles encore disponibles en 2017 selon Wikipédia.

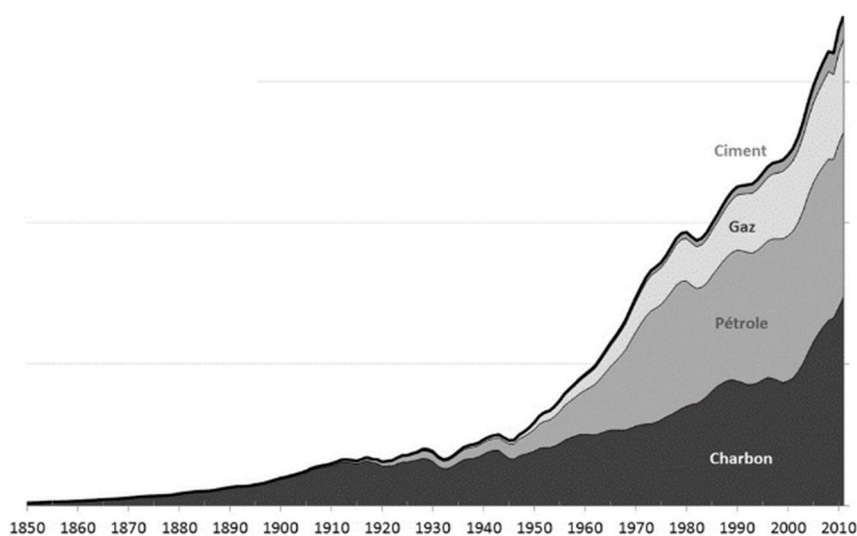
³ La demande énergétique actuelle correspond à environ 0,02%.

⁴ Sous trois formes : solide avec charbon, liquide avec le pétrole, et gazeuse avec le méthane et le propane.

Nous verrons dans des temps plus tardifs, au début du temps IV (chapitre #12), comment ce feu emprisonné se réveille finalement sous la Première Révolution Industrielle, puis se déchaîne avec la Modernité. Après la découverte du feu de biomasse au temps II (#7), l'homme allume l'incendie des énergies fossiles avec le temps IV (#12 et #14).

En 2016, la libération du carbone séquestré dans les énergies fossiles correspondait au relargage dans l'atmosphère de plus de 30 milliards de tonnes de CO₂ (Fig. 86) et la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ne descendrait plus jamais en-deçà de 400ppm¹, nonobstant les fluctuations saisonnières rappelées par Al Gore dans son *Une vérité qui dérange*² [17]. Voilà les prémices des nombreuses relations qu'entretiennent climat, énergie et matière. Aussi nous allons aussi découvrir comme petit à petit, l'architecture s'imisce dans ce triangle infernal.

Fig. 86. Courbe d'évolution des émissions de CO₂ issus des hydrocarbures et du ciment entre 1850 et 2010. Un changement d'état massif du carbone vers une forme gazeuse.



*

¹ Pour parties par million.

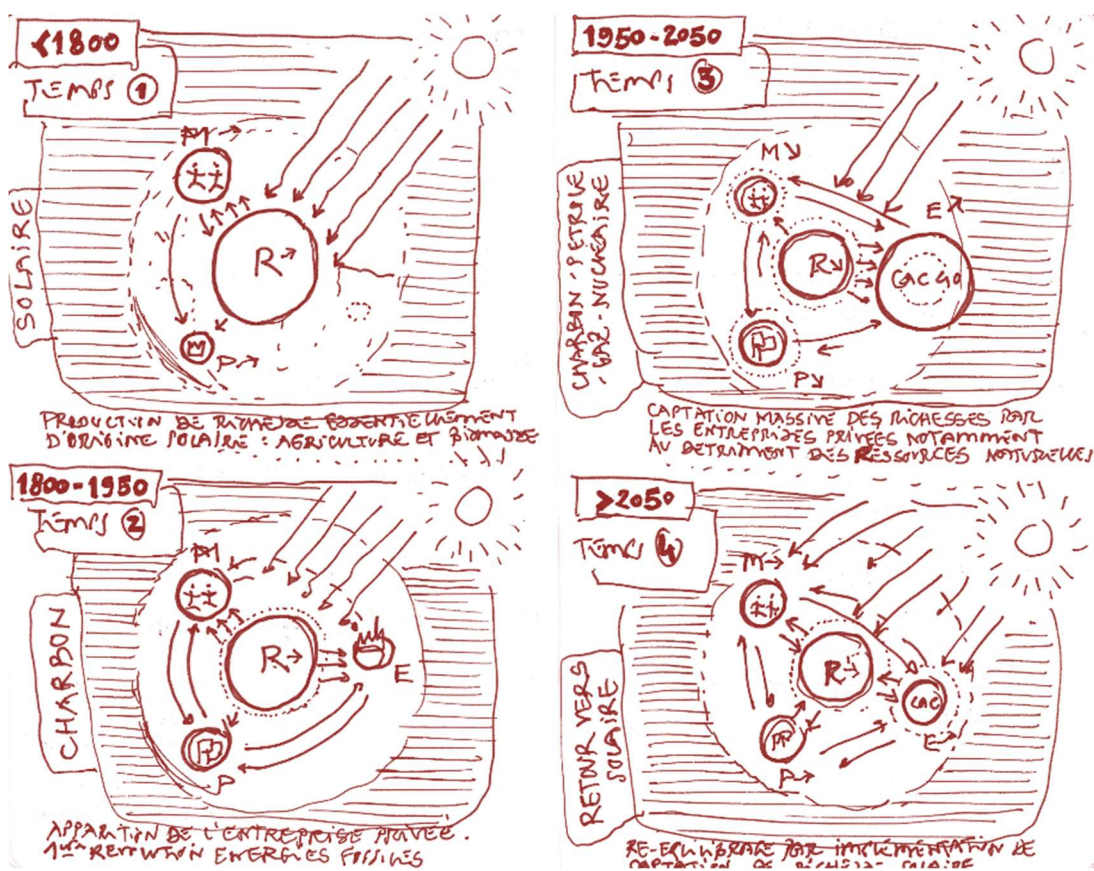
<http://cdiac.ornl.gov/trends/co2/graphics/lawdome.gif>

² Du fait d'une dissymétrie de la présence des végétaux entre les deux hémisphères

Bibliographie

1. JENCKS, Charles, *Architecture of the jumping universe*, Academy Editions, 1995
2. ALEXANDER Christopher, *A city is not a tree*, 1965
3. REY Olivier, *Une question de taille*, Stock, 2014
4. MENARD Raphaël, *Le Classement, Mode d'Emploi*, Mémoire sur les organisations du savoir et les classifications bibliographiques, 67 pages, 2002
5. PERLIN John. *Let it Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy?* New World Library, 2013
6. ADDIS Bill, *Building: 3000 years of design engineering and construction*, Phaidon Press, 2007
7. FERNÁNDEZ-GALIANO Luis, *Fire and Memory: On Architecture and Energy*, Cambridge (Mass.), The MIT Press, 2001
8. KHAN Ahmed Zaib, VANDEVYVERE Han, ALLACKER Karen, "Design for the Ecological Age: Rethinking the Role of Sustainability in Architectural Education", *Journal of Architectural Education*, 67:2, 175-185, DOI: 10.1080/10464883.2013.817155, 2013
9. SALVADORI Mario, *Comment ça tient ?* Parenthèses, 2005
10. BIHOUIX Philippe, *L'âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable* Seuil, Anthropocène, 2014
11. SMIL Vaclav, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015
12. HEISENBERG Werner, *La Partie et le Tout*, 1969
13. BALIAN Roger, « Physique fondamentale et énergétique : les multiples visages de l'énergie », cours donné par l'auteur (Service de Physique Théorique du CEA, Saclay) à la première École d'Été « e2phy » : *L'énergie sous toutes ses formes : données scientifiques, contraintes, enjeux*, 27-30 août 2001
14. AMEISEN Jean-Claude, *Sur les épaules de Darwin. Les battements du temps*, Les liens qui libèrent, 2012
15. MONOD Jacques, *Le Hasard et la Nécessité : Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, Éditions du Seuil, coll. « Points Essais », 1970
16. RODDIER François, *Thermodynamique de l'évolution, un essai de thermobio-sociologie*, Parole Éditions, 2012
17. GUGGENHEIM Davis, *Une vérité qui dérange*, documentaire, 2006

Fig. 87. Le story-board de l'accumulation d'énergie solaire sur Terre.



#7 Préhistoire de l'architecture (temps I et II)

Une introduction aux besoins énergétiques fondamentaux. Le même exercice sur la matière à la préhistoire. Temps I, une « proto-architecture » contrainte par la disponibilité des matériaux. Temps II, de la maîtrise du feu jusqu'aux premiers moulins à eau.

Avant le feu (temps I)

Jalons

-3,2M *Lucie, une Australopithecus afarensis*
-400k *Premières conversions de la biomasse en feu*

Énergies

Biomasse ingérée pour l'alimentation
100% renouvelable
100W à 250W par individu
Pas de domestication animale

Matières

Bois, branches et feuillages
Peaux et os d'animaux
Pierre
Or

Les besoins énergétiques de sapiens

Les 100 watts essentiels de l'homme primitif

Il y a environ cent mille ans, quelques temps après l'émergence des premiers hominidés, avant de scruter l'apparition de l'abri, nous allons décoriquer les besoins métaboliques de ce prédateur particulier, l'*homo sapiens*. Afin d'assurer leurs fonctions vitales, les animaux ingèrent des végétaux ou d'autres animaux : cela constitue leur source d'énergie. La biomasse digérée, combinée à l'absorption d'oxygène¹ lors de la respiration, active l'énergie métabolique chez les animaux. Aussi, et depuis d'Arcy Thomson [1] et d'autres biologistes, nous savons que les besoins caloriques sont corrélés à la taille des animaux, ou sinon à leur masse.

« Le métabolisme de base (MB), ou métabolisme basal, correspond aux besoins énergétiques « incompressibles » de l'organisme, c'est-à-dire la dépense d'énergie

¹ Le comburant

minimum (le comburant) m quotidienne permettant à l'organisme de survivre ; au repos, l'organisme consomme de l'énergie pour maintenir en activité ses fonctions (cœur, cerveau, respiration, digestion, maintien de la température du corps), avec des réactions biochimiques (en utilisant l'ATP). Il est exprimé sur la base d'une journée, et donc en joules ou en calories par jour. L'alimentation permet de subvenir à ces besoins, en apportant les calories nécessaires. Il dépend de la taille, du poids, de l'âge, du sexe et de l'activité thyroïdienne. La température extérieure et les conditions climatiques modifient sensiblement le MB. Le métabolisme de base pour un homme de 20 ans, mesurant 1,80 m et pesant 70 kg est d'environ 6300 kJ (1510 kilocalories) [soit 73W en moyenne]. Celui d'une femme de 20 ans, mesurant 1,65 m et pesant 60 kg est d'environ 5500 kJ (1320 kilocalories) [soit 64W en moyenne]. Le métabolisme basal diminue avec l'âge. On remarque une diminution de métabolisme basal de 2 % à 3 % par décennie après l'âge adulte. Les enfants ont par contre un métabolisme basal deux fois plus élevé que celui des adultes. »¹

Nous verrons dans d'autres chapitres comme la taille gouverne également les besoins énergétiques de l'architecture, tant vis-à-vis du stock construit (#14) que des flux nécessaires ou créés en usage (#8). En particulier, dans la troisième partie, autour de l'analyse de la passerelle Simone de Beauvoir (#24), nous analyserons comment les besoins en matière croissent plus vite que la taille de la construction.

Pour les besoins climatiques, nous savons aussi que le rapport entre la surface déperditive et la surface utile décroît avec la dimension caractéristique de la construction. Les spécificités énergétiques des organismes varient de façon prévisible avec la taille du corps. Les travaux de Max Kleiber² (1932) ont permis d'établir une relation entre la masse des organismes et leur taux métabolique, pour une température corporelle donnée (Fig. 88), et plus tard, Geoffrey West a tenté de transposer cette relation aux métabolismes urbains.

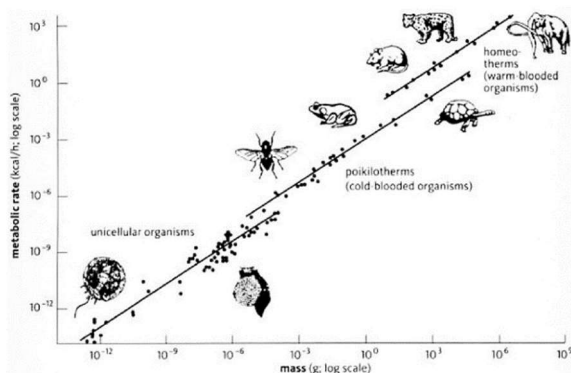


Fig. 88. Le diagramme de corrélation entre la demande énergétique d'organisme selon leur masse. Kleiber avait montré une corrélation en puissance $3/4$.

¹ Wikipédia

² $Q = q \cdot M^{3/4}$ (Q: le taux métabolique, q: une constante indépendante de la taille du corps, M: la masse de l'organisme)

Besoins métaboliques

Chez les humains, rapporté au volume d'un corps, un nourrisson possède beaucoup plus de surfaces déperditives qu'un adulte, et ceci explique le soin particulier pour les vêtir en fonction des saisons et des situations. Pour un adulte, les besoins caloriques sont compris entre 1000 et 3000 kilocalories selon que l'on soit jeune, vieux, femme, enceinte ou pas, homme actif ou non etc. Depuis cent mille ans, notre machine métabolique a peu varié et l'homme des cavernes assurait sa survie selon cette contrainte du besoin énergétique primordial. Du point de vue de la matière, en terme massique, les besoins alimentaires quotidiens sont d'environ 680 grammes par jour¹. Si l'on convertit cette quantité journalière en flux moyen d'énergie, l'ordre de grandeur de nos besoins vitaux est d'une centaine de watts, ou un peu moins telle que rappelé dans la citation précédente.

Une bonne centaine de watts

Selon la formule de Black et al. (1996), considérant mes données physiologiques, celle d'un adulte masculin de quarante-trois ans (chapitre #1), mon métabolisme de base est d'environ 77 watts soit un peu moins de 1600kcal par jour. Il est intrigant de comparer ce flux de « bon père de famille » aux valeurs de puissance de quelques exploits sportifs, comme ceux de Chris Froome montant le col du Galibier « flashé » à plus de 400 watts², valeur délivrée par son incroyable métabolisme. Mais ce pic de puissance est fugace. Le métabolisme des sportifs est préparé à stocker de l'énergie pour la délivrer intensément, un peu comme les supercondensateurs dans une chaîne de propulsion électrique. En pointe, un autre cycliste, Peter Sagan, contemporain de Froome, est capable de délivrer sur quelques secondes, en *sprint*, près de 1400 watts, soit l'équivalent de 2 chevaux de puissance motrice (Fig. 89).

Fig. 89. *Sprint de Peter Sagan*



Bifurcations des besoins métaboliques

Pour nos aïeux, de quelles façons se dissipe cette énergie ingérée, ce « pain quotidien » d'environ deux mille kilocalories ? Son contenu énergétique est d'abord littéralement brûlé avec de l'oxygène comme comburant³. Ensuite, comme une machine thermodynamique, une grande partie de cette énergie est dissipée en énergie de très basse qualité, une chaleur à environ 37°C, par la conduction et la convection autour du corps, ainsi que par la sudation. Pour une personne moyenne au repos, on retient en général un flux de chaleur dissipée d'environ 70 watts par individu.

¹ Konecni, 1964

² D'énergie mécanique en moyenne.

³ Et nous rejetons d'ailleurs du dioxyde de carbone, comme toute machine thermique brûlant des chaînes carbonées, hydrocarbures ou biomasse.

Le vêtement et l'invention de l'adaptation climatique

Évidemment, les vêtements jouent un rôle primordial vis-à-vis du bon contrôle de ce flux. Les habits participent évidemment à la réduction des pertes par convection et par conduction (Fig. 90). L'isolation moyenne des vêtements gère l'écart de température entre la surface de notre corps et l'extérieur, comme l'enveloppe du bâtiment dans le contrôle entre les conditions climatiques extérieurs et la température intérieure. La surface développée du corps humain étant d'environ deux mètres-carrés, le flux est donc d'une trentaine de watts par unité de surface. Ainsi, une simple robe en coton permet de créer un confort suffisant pour des températures supérieures à 25°C. Cette sensation de confort dépend aussi d'autres paramètres comme l'activité physique ou l'hygrométrie. Des études précises sur l'isolation vestimentaire¹ établissent que l'isolation atteinte par un duvet polaire est d'environ 0,8W par m² et par degré. Autrement dit, en se figurant cette valeur d'isolation moyenne sur la totalité des deux mètres-carrés de surface corporelle, l'élasticité thermique est d'environ 1,5W par écart de température avec l'extérieur, ainsi par température légèrement en dessous du gel, le flux de déperdition par conduction est d'environ 60 watts.

Les 250 watts du chasseur

En 1971, dans son article *The flow of energy in an industrial society* [2], Earl Cook décrivait une évolution significative des besoins énergétiques de l'homme primitif, lorsque devenu chasseur², passant de deux mille kilocalories quotidiennes à près de cinq mille kilocalories, en estimant que l'habitat et le commerce réclamaient plus de deux mille kilocalories supplémentaires. Cook préférait d'ailleurs conserver les unités énergétiques de l'alimentation pour les autres besoins réclamant de l'énergie. La calorie est cette unité énergétique primitive, lorsque l'essentiel des besoins énergétiques de l'homme était d'abord la survie de son métabolisme (Fig. 91).

Fig. 90. Extrait de *The Revenant* avec les inconforts thermiques récurrents du trappeur campé par Leonardo di Caprio.

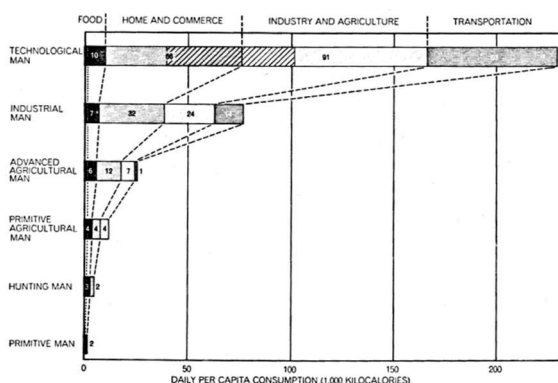


Fig. 91. Earl Cook, les 6 âges des besoins énergétiques rapportées sur une échelle des besoins fondamentaux exprimés en kcal d'énergie par jour. 2 000kcal par jour correspond à environ 100W : le Technological Man de Cook réclame plus de 10 000W (en gant de l'histogramme). Pour mémoire, le flux d'énergie primaire d'un Européen est de l'ordre de 6 000W (hors prise en compte de l'énergie grise entrante).

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/Clothing_insulation

² Mais sans doute Earl prend-il en compte le flux complémentaire lié à l'usage suite à la découverte du feu.

Le watt et le joule naissent eux avec les machines thermiques et l'énergie *exosomatique*, située « hors du corps ». Exprimé en flux moyen (en watts), cette évolution de l'homme primitif au chasseur s'accompagne d'une augmentation du débit temporel d'énergie d'environ 100 watts à près de 250 watts. Ces quantités restent très faibles comparées à nos besoins contemporains, dix fois plus élevées en moyenne (environ 2 000 W) et trente à cinquante fois plus élevées pour les pays riches et les plus énergivores (plus de 10 000W) (Fig. 481 et Fig. 477).

Nous verrons au cours des prochains chapitres (et des différents temps), cette croissance progressive de l'empreinte énergétique des humains. Au moment de l'inflexion urgente et nécessaire, celle contemporaine appelant le temps VII (#18), nous verrons comment une décroissance de ces besoins est nécessaire. Ce scénario avait été étudié également dans la troisième partie de *Reforme*, intitulé « les Métamorphoses » [3].

La matière à construire du chasseur

Le lourd fortuit ou le léger opportuniste ?

Pour initier notre trilogie énergie-matière-architecture, nous ferons cette hypothèse pour ce premier épisode : la disponibilité de la matière précède l'architecture. L'abri était d'abord affaire d'opportunité. Chasse et cueillette : la récolte énergétique était déjà bien ardue pour garantir le métabolisme basal de sapiens ainsi que celui de ses proches. Les besoins énergétiques de l'humanité se résument à puiser dans le stock facilement accessible de solaire récent, autrement dit la biomasse : la cueillette et la chasse pour les besoins alimentaires. Il était donc nécessaire de ne pas perdre trop de temps et d'énergie pour constituer sa protection et son modeste abri climatique. Ce souci était déjà la concrétisation d'un investissement dans le futur, d'une certaine garantie des lendemains voire d'une anticipation des rigueurs climatiques à venir.

Matières à construire

« Osons faire commencer notre histoire il y a 50 000 ans, lorsque se répandit partout sur la terre un groupe d'*Homo sapiens* un peu plus malin que les autres (l'espèce était née depuis 200 000 ans). [...] Pour la maison, il avait une tente, peut-être faut-il plutôt dire des tentes car elles étaient diverses ; les piquets et l'armature, de bois ou d'os, de pierre encore, il les trouvait sur place ; l'enveloppe de peau, levée sur le gibier, il l'emportait avec lui [...] »¹

¹ 50000 ans de « maisons pour rien », Patrick Pérez, Matière Grise, p23

Comme le rappelle donc Patrick Pérez [4], les vêtements et les objets de la vie quotidiennes étaient souvent les déchets valorisés de la quête de nourriture : peaux de bêtes pour se vêtir, squelettes d'animaux chassés comme outils, dents comme ornements, ligaments comme fil de couture. Le bois et la végétation participaient à la construction de ces petits édifices ou encore la transformation des terres et minéraux aisément accessibles. Par effet de taille, les tentes permettaient d'assurer un plus grand confort thermique que l'habit : la surface déperditive était réduite.

En l'absence du feu, l'isolation et la réduction des pertes convectives étaient primordiales pour tenter d'assurer sa survie par un froid rigoureux. L'igloo est une illustration de cette quête et les tableaux ci-contre indiquent quelques ordres de grandeur des flux thermiques de ces proto-architecture et des relations avec les ambiances intérieures potentielles, à partir uniquement du flux de chaleur dégagé par leurs habitants (Fig. 92 et Fig. 93).

Fig. 92. *Une tente préhistorique*



Besoins thermiques d'une petite tente type canadienne

Longueur	2,2 m
Largeur	1,6 m
Surface déperditive	10 m ²
Isolation moyenne de l'enveloppe	5 W/m ² .°C
Apports internes (2 personnes)	140 W

Flux thermique nécessaire pour 10°C intérieur

par -20 °C	1300 W	soit	650 W par personne
par -10 °C	820 W	soit	410 W par personne
par 0 °C	340 W	soit	170 W par personne
par 5 °C	100 W	soit	50 W par personne

Besoins thermiques d'un tipi isolé

Surface déperditive	10 m ²
Isolation moyenne de l'enveloppe	2 W/m ² .°C
Apports internes (4 personnes)	280 W

Température intérieure en l'absence d'autres puissances thermiques que corporelles

par -20 °C	-5 °C à l'intérieur
par -10 °C	5 °C à l'intérieur
par -5 °C	10 °C à l'intérieur
par 0 °C	15 °C à l'intérieur
par 5 °C	20 °C à l'intérieur

Fig. 93. *Le bilan thermique d'un tipi bien isolé : la chaleur dégagée par quatre corps maintenus dans une enveloppe compacte et bien isolée permet de gagner près de quinze degrés par rapport à la température extérieure.*

Ces abris protégeaient davantage des intempéries, des pertes convectives du vent plutôt qu'un réel gain conductif : vu leurs petites tailles et en l'absence du feu, les écarts de température se limitaient au maximum à une petite dizaine de degrés.

Fig. 94. Falaise troglodyte et sans doute les débuts de l'observation de course solaire et l'optimisation de l'orientation pour bénéficier des apports solaires gratuits en hiver. Site de Guyaju en Chine.

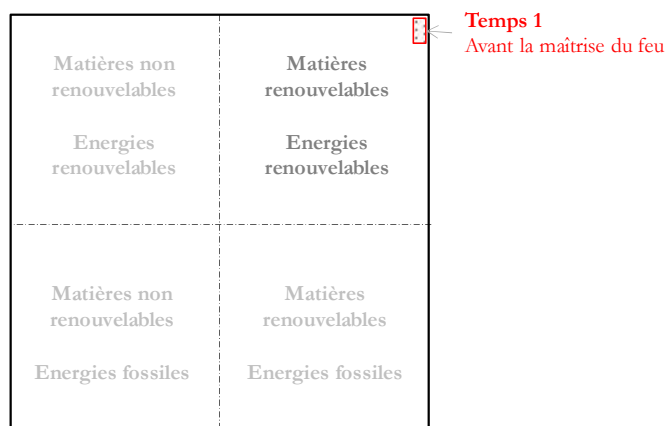


Un premier dilemme entre lourd et léger

Dans *L'Âge des low tech* [5], Philippe Bihouix¹ rappelle qu'au temps du paléolithique, les terriens tiraient l'essentiel de leur subsistance des grands troupeaux de chevaux ou de rennes : ils en tiraient graisse pour l'éclairage, outils et décorations en os, vêtements en peaux et en tendons. L'habitat s'insinuait aussi dans des cavités minérales (grottes), des abris précaires étaient fabriqués à partir de végétaux (branches) et de restes d'animaux (peaux). La grotte, les habitats excavés, les sites troglodytes [8], les cavités dans la matière, proposaient une opportunité d'abris et de refuges (Fig. 94). Dans *L'énergie solaire Comment vivre en paix avec la nature* [7], l'ex-ambassadeur Madanjeet Singh² rappelle que les hommes des cavernes avaient initié les prémices de l'architecture bioclimatique, en notant la propriété qu'avait la pierre d'emmagasiner la chaleur du soleil de la journée.

La matière reste dure à conquérir et l'architecture est affaire d'opportunités. Aussi, certaines architectures exploitaient déjà l'effet de la taille, comme ses grandes constructions, sorte de longères, qui limitaient l'interface avec l'extérieur et permettaient sans doute d'accroître les conditions de confort intérieur. Toutefois, le stock de matière construite, l'édifice lourd et statique pouvait être aussi un désavantage : il limitait la mobilité et donc la capacité du groupe à s'adapter et à se soustraire rapidement à l'ennemi.

Fig. 95. La situation énergie-matière des hommes préhistoriques : des besoins réduits aux besoins les plus fondamentaux. Des usages énergie et matière concentrés sur des ressources entièrement renouvelables. Une empreinte énergie-matière extrêmement faible.



¹ *L'Âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable*, Bihouix, p26

² Singh, p143

Après le feu (temps II)

Jalons

- 400k Premières conversions de la biomasse en feu
- 10k Naissance de l'architecture¹
- 8500 Début de la domestication animale au Proche Orient
- 8500 Passage du paléolithique au néolithique²
- 6000 Premier outils en cuivre³
- 4000 Naissance de la roue
- 4000 Apparition de l'écriture en Mésopotamie

Énergies

- Feu à partir du bois
- Domestication de la force animale
- Embarcations à voile, premières utilisations de l'énergie éolienne
- Premières retenues d'eau et premières utilisations de l'énergie hydraulique
- 100% renouvelables
- Passage de 250W à 500W par individu

Matières nouvelles

- Transformation des matériaux par cuisson (bois durci au feu)
 - Cuivre
 - Poteries
-

La chaleur concentrée contenue dans la biomasse

De l'énergie mécanique pour faire de la chaleur

Il est difficile de ne pas aborder cet épisode sans partager ce souvenir d'enfance, *La guerre du feu*⁴, film de Jean-Jacques Annaud de 1981 [9]. Il y a en particulier cette séquence, l'apprentissage du feu par la tribu plus avancée, les *Kzamm*. Les membres de ce clan montrent aux autres la méthode pour déclencher un feu de bois. Par un parfait « cocktail de matière », par le frottement entre deux éléments de bois aux essences et aux géométries judicieusement choisies, la combustion de matières végétales peut s'amorcer par la volonté de l'homme (Fig. 96). Autrement dit, la rencontre deux matières savantes, « informées » avec un soupçon d'énergie mécanique (la rotation oscillante de la fibre de bois entre les paumes de la main) permettaient d'obtenir la température minimale, celle permettant l'activation de la réaction chimique auto-entretenu de la combustion des

Fig. 96. Une scène dans *La guerre du feu*, film de J.J. Annaud



¹ Selon Mario Salvadori dans *Pourquoi ça tient ?*

² Néolithique dans nos régions entre 5100 et 2300 av J.C. (panneaux du Musée de la Préhistoire à Nemours)

³ Bihouix, p27

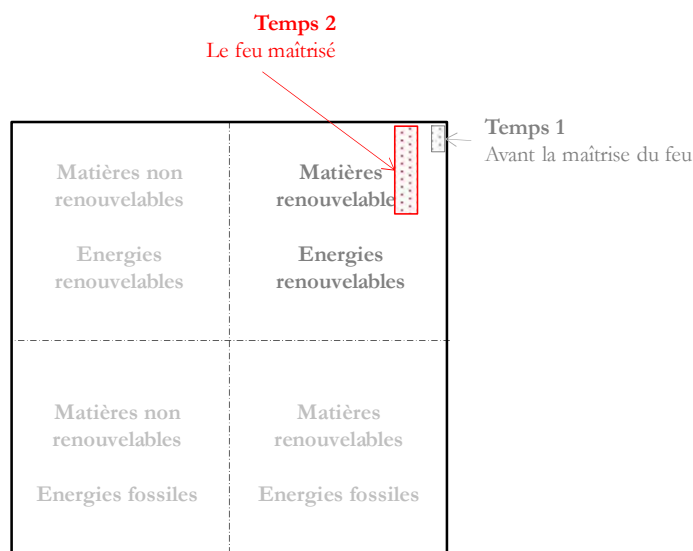
⁴ 1981 et adaptation du roman éponyme écrit en 1909 par J.-H. Rosny aîné.

herbes séchées à proximité de ce micro-foyer, ce départ de feu. Les outils étaient jusqu'à présent de la matière qui agissaient sur de la matière. Dorénavant, de nouveaux procédés permettent à la matière de libérer de l'énergie contenue dans une matière choisie.

Une révolution de l'énergie

Ainsi, naît le feu, engendré et maîtrisé par l'homme ; vient aussi la capitalisation et la transmission de son savoir. Le film d'Annaud relate aussi cette conversion entre les tribus tentant bon gré mal gré d'entretenir un feu actif, et celle, plus avancée, conservant l'information de son élaboration [9]. Qu'est que sont ces premiers feux ? Essentiellement de la combustion de biomasse, de bois parfois mal séchés. Ce temps II est d'abord une révolution de l'énergie, celle d'un savoir nouveau, la capacité des hommes à engendrer et à contrôler une puissance thermique considérable

Fig. 97. *Le temps II de l'architecture : une architecture de biomasse, de terre et de pierres. La chaleur du bois et de la biomasse comme source d'énergie. L'énergie animale (et donc issue de la biomasse) comme énergie mécanique d'appoint. La multiplication de l'empreinte énergie-matière de l'individu par rapport au temps I : le flux de demande d'énergie s'accroît ; la ponction sur la matière devient plus importante.*



L'alimentation : de l'énergie et du savoir

Ces premiers feux permettent la cuisson des aliments, autorisent l'augmentation du confort de l'habitat et permettent les débuts de la transformation des matériaux, comme par exemple le bois durci ou la fabrication d'outils en pierre. Les hommes s'alimentent mieux, le régime alimentaire s'étend ainsi que l'art culinaire, autrement dit le savoir lié au plaisir de l'ingestion de nos carburants quotidiens. Le feu permet la conservation des aliments par fumage, améliore la digestion des aliments : il a sans doute concouru à des évolutions métaboliques significatives, y compris sur les capacités cognitives : le feu aurait donc catalysé le développement de l'intelligence, la perpétuation et la progression du savoir.

De fait, l'ingestion de l'alimentation met en route la magnifique cogénération humaine. Un métabolisme qui permet une large diversité de qualité énergétique : de la basse chaleur pour le maintien du corps à une température de 37°C, de l'énergie mécanique par les muscles, la fabrication de tissus et les influx nerveux permettant aussi l'ensemble de l'activité cérébrale. Le vivant est un splendide filtre à exergie et à anergie, les deux extrêmes de la qualité de l'énergie¹. L'homme découvre la basse et la moyenne chaleur, celle permettant d'atteindre localement sur un foyer ouvert de bois et de feuilles, des températures pouvant atteindre 200°C à 300°C, quoique certaines parties du feu puissent atteindre environ 1000°C². Le feu permet le futur en augmentant l'autonomie alimentaire et en permettant d'affronter des hivers rigoureux ; ils dissuadent aussi les agressions des grands prédateurs.

L'architecture du feu

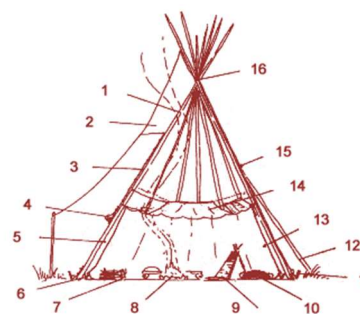
Le changement de phase et la respiration

Les vertus du feu sont multiples : cuisson des aliments, transformations des matériaux et évidemment chaleur et lumière. Cependant le feu de biomasse produit un bouquet de gaz lors de sa combustion : si le combustible était parfait et composé de carbone pur, et si le comburant, l'oxygène n'était pas mélangé à d'autres gaz contenu dans l'air (comme l'azote essentiellement), la combustion générerait alors du dioxyde de carbone. À forte concentration, ce gaz peut devenir nocif dans un espace confiné. De façon plus complète, la composition chimique des bois, brindilles et autres résidus organiques génèrent aussi d'autres produits de combustion comme de la vapeur d'eau ou encore des particules fines, nocives également en petite concentration dans l'atmosphère. Mais lors d'une combustion incomplète, du monoxyde de carbone est également produit. Or, ce dernier est létal à très faible concentration et il est encore la cause de nombreux accidents domestiques aujourd'hui (cheminées, poêles, chaudières à gaz etc.).

Les fondements de la cheminée et du conduit

Dès lors, l'évacuation des produits de la combustion, l'exutoire de la matière gazeuse liée à cette utilisation thermique et lumineuse de l'énergie a supposé l'invention du conduit, celle de l'organisation géométrique et matériautique pour évacuer les résidus gazeux de la combustion. Ainsi sont posés les fondamentaux de la cheminée. Les prérequis de la combustion, de la bonne évacuation des fumées et d'un tirage thermique suffisant pour faire entrer suffisamment d'oxygène dans le foyer, ont généré un vocabulaire de forme et une grammaire des matériaux (et de la nécessité de les protéger du feu, de leur détérioration voire de l'embrasement).

Fig. 98. *Le tipi et la bonne évacuation de la fumée du feu.*



¹ 100W moyens et flux mécanique disponible ~15W. Compactés sur 8 heures d'activités diurnes ~50W

² Autrement dit, un taux d'exergie de près de 75%, soit localement, une énergie de haute qualité. Cette question de la qualité de l'énergie fait l'objet d'un chapitre dédié.

« Si l'on compare aux autres activités humaines, l'architecture est un art relativement jeune, dont les origines remontent à environ 10 000 ans. L'homme venait de découvrir l'agriculture et cessait de parcourir le monde à la recherche de sa propre subsistance. Jusque-là, ces nomades exposés aux intempéries vivaient sous des sortes de tentes en peaux de bêtes, et se regroupaient en petites tribus. Lorsqu'ils devinrent sédentaires, les tentes furent remplacées par des abris plus solides, et les feux de bois par un foyer permanent au centre de la maison. » [10]

La verticale du feu

Le feu a-t-il engendré les prémices du projet d'architecture, par la nécessité d'anticiper les contraintes imposées par la combustion ? Lors d'une conférence chez Elioth en 2015, Emeric Lambert de l'agence *Parc Architectes* citait l'exemple des tipis, typologie de forme parfaite (Fig. 98). De fait, le feu a été moteur d'inventions par la contrainte nouvelle qu'il imposait à l'amoncellement informel d'un abri offrant une protection simple aux éléments. Les fours, ces microarchitectures du feu de biomasse, arriveront plus tard, ainsi que la méthode permettant la fabrication du charbon de bois¹ (et sa capacité à générer des températures de combustion bien plus élevées).

Nous verrons plus loin dans ce texte les vertus du tirage thermique, dans le cas du projet des montagnes solaires (chapitre #25) : la hauteur permet d'accélérer les gaz chauds. La cheminée agit comme un barrage hydraulique (#8), mais à l'envers, en inversant l'orientation de la verticale.

Les gaz chauds étant plus légers que l'air, il faut comprendre cette dynamique comme un « retournement de la gravité ». En accélérant les vitesses d'air, cela permet de fortifier le feu en comburant et donc d'attiser la combustion : la consommation de combustible augmente mais puissance de chauffe et température de feu sont à l'avenant. Pour cette deuxième époque, celle du feu donc, nul doute que ce dernier était le déterminant de la genèse des formes et du bon choix des matériaux.

Matières de feu

Le minéral, matière du feu

Christophe Wieser et Andrea Deplazes² [11] rappellent la double origine de l'évolution des formes architectoniques et reprennent les éléments d'une conférence de Kenneth Frampton : les « ouvrages en terre » (avec pour équivalents la construction massive et la stéréotomie) et de l'autre « les ouvrages de toiture » (la tectonique ou la construction filigrane). Les formes évoquées précédemment comme les yourtes et les tipis, appartiennent à la seconde catégorie. Avec le feu, la cuisson de la matière est rendue possible et il est évident que la construction massive, l'usage de la terre et de la pierre, permet en retour le contact avec le feu, tandis que les toiles,

¹ Sans doute aussi celles des huiles issues de la chasse des grands mammifères marins. Édicule permettant la fabrication de charbon de bois.

² p13 et p16, tableau décrivant les logiques constructives propres aux deux types.

les laines et les peaux des tentes se mettent à une respectable distance du foyer et des gaz chauds de la combustion, comme dans le cas de la yourte, où le poêle prend place au centre de l'édifice.

L'amortissement thermique du minéral

En offrant cette résistance à la haute température, l'appareillage de pierre, la maçonnerie, la terre cuite ou séchée révèlent leurs vertus. Les calcaires, les granits, les grès possèdent une inertie thermique intéressante : certaines matières vont adoucir le « *shoot* thermique » du feu dans le temps, amortir sa violence, juguler l'intermittence de sa nécessaire nourriture. L'inertie thermique (chapitre #28) de la pierre fabrique une « mémoire du feu » et pour paraphraser Lisa Heschong [12], engendrer une *volupté thermique*, le plaisir de l'âtre et la douceur du regroupement social qu'il occasionne. Aussi, la cheminée massive¹, stéréotomique, constitue une colonne dure, un point dur autour duquel la construction tectonique peut venir s'appuyer ou se contreventer.

« Depuis la préhistoire, on le sait, le feu est l'une des grandes conquêtes de l'homme. Le feu, c'est la chaleur, la lumière et la cuisson des aliments. Mais c'est aussi le fléau redouté de l'incendie. La maîtrise du feu a été ainsi une longue histoire. Le passage du feu directement dans la cheminée au feu enfermé dans le poêle s'est effectué lentement, c'est ce passage que nous voudrions suivre ici. Sur le plan domestique, la véritable domestication du feu est récente : le fourneau de fer ou de fonte en a été l'instrument essentiel. Son apparition constitue une véritable révolution domestique, car le fourneau crée les possibilités nouvelles d'une économie de combustible, assure une sécurité plus grande et une meilleure diffusion de la chaleur, enfin il apporte une autre manière de faire la cuisine. Toutefois, la pénétration des fourneaux dans les demeures, surtout au village, s'est faite assez lentement, elle a été cependant plus précoce que l'on avait pu le croire. La période décisive, au moins pour la Franche Comté, se situe entre 1750 et 1850, passé ce cap, le fourneau est devenu d'un usage tout à fait commun. »²

¹ Le feu de la forge, les poêles à inertie thermique comme en Europe centrale, les fourneaux.

² <http://jeanmichel.guyon.free.fr/monsite/histoire/metiers/fourneau.htm>

Chronogramme fictif d'une yourte

Hypothèses

Le feu coïncide avec l'apparition de spatialités orientées, avec un rapport univoque avec l'extérieur, et sans doute des problèmes critiques vis-à-vis de la bonne ventilation et notamment des fumées du feu. Singh établit aussi une filiation historique entre la yourte des nomades de l'Asie Centrale, ces tentes circulaires démontables faites de laine, de cuir et de bois [7] (Fig. 99). Elles disposent d'une ouverture en partie haute¹ permettant de faire pénétrer la lumière (les fameux cent lux, cette toise nominale d'une bonne perception spatiale par l'œil humain²) et l'évacuation des fumées. Pour Singh, le Panthéon d'Hadrien à Rome avec sa rotonde (117-126 après J.-C.) en est selon lui la descendante [7]. Nous verrons qu'avec la maîtrise du feu, et plus tard l'invention du poêle (#12), la yourte se prête très bien à l'intégration de ce dispositif : les poêles couvrant en général des gammes de puissance compatibles avec les besoins typiques de la yourte, plusieurs kilowatts, tels que figurant dans les calculs en marge de ce chapitre (Fig. 100).

Fig. 99. Une yourte



Fig. 100. Le bilan de puissance pour une yourte complètement calfeutrée (aucune perte convective, ce qui correspond à un cas idéal) et dont la « température de consigne » serait réduite à 10°C.

Diamètre	5 m
Périmètre	16 m
Surface au sol	20 m ²
Surface déperditive	53 m ²
Isolation moyenne de l'enveloppe	2 W/m ² .°C
Apports internes (8 personnes)	560 W

Flux thermique nécessaire pour maintenir 10°C intérieur

par -20 °C	2600 W	soit	350 W par personne
par -10 °C	1600 W	soit	200 W par personne
par 0 °C	500 W	soit	50 W par personne
par 5 °C	0 W	soit	0 W par personne

Energie-matière

La yourte est aussi l'expression parfaite de l'aboutissement d'un design parfait, d'une phylogénèse concourant à une optimisation géométrique³, constructive. La yourte présente assurément un bilan énergie-matière absolument remarquable eu égard sa dimension. Le feutre des laines de mouton fabrique son isolation. Une analyse plus documentée permettrait d'évaluer la performance de sa masse, de sa légèreté et de sa capacité à endurer les climats rigoureux. Avec les hypothèses mentionnées ci-contre, par -20°C, l'apport de 350 watts thermiques pour chacun des huit personnes logées dans la yourte permet d'assurer une température intérieure

¹ Notons que le diamètre de l'ouverture zénithale est de l'ordre du mètre, tandis que le diamètre d'une grande yourte est de six mètres : soit un rapport de surface de 3%. Ainsi sous un ciel couvert à 10000lux, une yourte assure un éclairage suffisant de l'ordre de 300lux.

² Notons que les réglementations contemporaines réclament 200 à 300 lux sur un poste de travail dans un bureau.

³ La limitation savante de la surface déperditive

d'environ 10°C, en négligeant les pertes convectives dans ce bref calcul. Il montre néanmoins la très grande efficacité de cette architecture, de besoins thermiques exosomatiques qui restent à l'échelle de l'individu, et de la centaine de watts de son activité basale. L'estimation des flux de besoin de biomasse autoriserait la correspondance avec son empreinte énergétique, comme nous le ferons plus loin, pour une chaumière au cours du temps III (#9).

Les limites des énergies humaines et nouvelles matières

L'énergie mécanique avant les esclaves énergétiques

« Au fil du temps, les populations les plus favorisées par la géographie et le climat évoluèrent, passant graduellement de la chasse à un mode de vie plus sédentaire, basé sur la domestication des animaux et de l'agriculture. Ce déploiement d'énergie supplémentaire, nécessaire à la transition du paléolithique au néolithique ou nouvel âge de la pierre (environ 8500 avant J.-C.) fut déterminé par les outils rudimentaires dont disposaient ces populations ainsi que par les matières premières avec lesquelles ils étaient fabriqués. »¹ [7]

Singh insiste sur le surcoût énergétique de cette amélioration de confort de vie. De fait, que peut-on construire avec l'énergie humaine et le petit kilowattheure d'énergie mécanique journalier ? Dans leur ouvrage, *Le plein s'il vous plaît* (2006), Alain Grandjean et Jean-Marc Jancovici [13] reprennent la métaphore de John Mc Neill évoquée dans *Something new under the sun* [14] et ses « esclaves énergétiques ». Comme nous le verrons à partir du quatrième épisode de cette épopée de l'énergie-matière-architecture, au temps IV (chapitres #12 et #14), la généralisation de l'usage des énergies fossiles permettra de décupler les capacités énergétiques métaboliques, pour passer à l'énergie exosomatique, littéralement l'énergie en dehors du corps (Fig. 107).

L'énergie est une expérience physique

Mais à cette époque qui précède l'invention de la roue, et qui nous replonge quatre mille ans avant notre ère, les seules forces mécaniques disponibles étaient musculaires. En une heure, il était possible de remonter un lourd fardeau de quarante kilos sur trois cents mètres de dénivelé, un exemple parmi d'autres de cette « dimension énergétique »². L'architecte Anna Heringer, née en 1977, rappelle les vertus de la « *hand made architecture* » (Fig. 101), du rapport d'échelle en la physiologie et l'architecture, qui sera plus largement développé au temps VI (chapitre #17), autour de la « crise de la matière » et des tensions engendrées par la disponibilité de certains ingrédients d'architectures.

Fig. 101. *Architectures contemporaines de terre, Anna Heringer*



¹ Madanjeet Singh, *L'énergie solaire, Comment vivre en paix avec la nature*, p17

² 0,1kWh correspond à 360 000J soit l'équivalent de l'énergie potentiel de pesanteur de 110 kilos (les 70 kilos du travailleur et les 40 kilos de son fardeau) sur 300m de hauteur.

Fig. 102. *Pyramide de Kheops*

De l'énergie mécanique par la violence

À l'époque de l'ancien empire d'Égypte¹, les Babyloniens seront les premiers à pratiquer l'esclavage [7]. Mathieu Auzanneau, dans *l'Or Noir, la grande histoire du pétrole* [15], oppose le bannissement progressif de l'esclavage et la découverte d'énergies de substitution au travers du binôme « énergie-matière », énergies fossiles et machines thermiques. Bien avant, l'une des sept merveilles du monde, la pyramide de Kheops sur le site de Gizeh sublime le cumul colossal des énergies humaines qui ont été nécessaire pour concrétiser cette topographie artificielle. Avec six millions de tonnes de pierre² [10] disposées en pyramide, dont le sommet culmine à 146 mètres, l'énergie potentielle de gravité d'une telle structure est de 2TJ d'énergie³, soit environ 600 000 kWh, soit l'énergie mécanique dispensée par un million de journée-homme. Sans prendre en compte les pertes liées à leur acheminement (les frottements par exemple), en omettant aussi toute l'énergie nécessaire à la taille des blocs de pierre, le simple fait de hisser toute cette matière à sans doute réclamer *a minima* le travail de mille personnes pendant mille jours sans discontinuer. L'Antiquité avait déjà soif de « hors d'échelle » (Fig. 102).

Les premiers champs solaires

L'Égypte a été le royaume de la révolution néolithique, à la convergence de conditions parfaites pour le développement massif et à haut rendement de la connaissance agricole en densifiant massivement les rives du Nil. Le néolithique est aussi l'âge de la domestication animale et de la capacité d'asservir une partie du vivant pour sa capacité à délivrer de l'énergie de très haute qualité, *le travail*, complément indispensable à la basse qualité énergétique du feu, que l'on ne savait pas encore transformer en mouvement. Le travail mécanique des bêtes catalyse la production végétale. Le néolithique est ainsi le premier âge d'une « solarisation du monde » par l'homme, de la capacité à optimiser les rendements de conversion de l'énergie du soleil, en l'occurrence la photosynthèse de l'agriculture, tout en asservissant une partie du vivant (bœufs, mules etc.)⁴ (Fig. 103).

Fig. 103. *Puissance de quelques animaux comparées à l'homme et évaluation de leur rendement de conversion de l'énergie ingérée.*

Cheval de trait	500W - 1000W
Mule	300W - 600W
Âne	75W - 200W
Vache	200W - 400W
Chameau	400W - 700W
Buffle	600W - 1000W

¹ Tous deux vers -2000 et -3000 avant notre ère

² 5,2Mt pour Salvadori dans *Comment ça tient ?* p19

³ Hypothèse d'un barycentre à 35m au niveau du sol.

⁴ <http://www.fao.org/docrep/010/ah810f/AH810F09.htm>

Le début des machines

L'apparition du fer et les outils

Sans doute que la révolution agraire n'eut été pas possible sans l'invention d'outils facilitant le travail des hommes et des bêtes. La résistance et la rigidité du fer a favorisé la genèse d'instruments augmentant la productivité du travail de la terre : le labour, le semis, le fauchage... Un nouveau matériau permettait ainsi d'accroître l'efficacité énergétique du travail du corps, un peu comme le vélo permettra plusieurs siècles plus tard de décupler les capacités de vitesse du corps humain selon sa propre énergie.

La roue n'est pas encore née, mais la transmission de ces outils fournit aussi une « mémoire », un actif autonome par sa constitution forme-matière. En résumé, le déroulement serait en quelque sorte le suivant : le savoir de la matière a permis le feu, qui à son tour, engendre des matériaux nouveaux, qui eux-mêmes autorisent un accroissement des rendements énergétiques... Roddier [6] dirait que dans un système ouvert, les structures s'auto-organisent pour dissiper un maximum d'énergie...

« L'utilisation du feu pour la production d'oxydes métalliques est une découverte fondamentale en matière d'énergie puisqu'elle va permettre la transition de l'âge de pierre à l'âge du métal. Dès le troisième millénaire, on façonnait déjà le fer au Moyen-Orient. » [7]

Se déplacer dans l'eau

Avant la roue, les embarcations sur l'eau commencent à se doter de voiles pour tenter de domestiquer la puissance du vent. L'énergie sous-jacente au mouvement, l'énergie cinétique, diffère des besoins thermiques. Le déplacement réclame de l'énergie de haute qualité, à haute exergie telle que nous l'avions introduit dans l'introduction. L'art des transports, l'habilité à se mouvoir rapidement, réclamera des efforts de savoir et de technique qui ne trouveront leur essor que finalement assez récemment, avec l'apparition de la locomotive à vapeur.

Avant cette conquête, il y a plus cinq mille ans, le déplacement d'une petite embarcation dans l'eau à une vitesse comparable à celle de la marche¹ suppose une bonne centaine de watts pour s'opposer à la résistance de l'eau. Le calcul ci-contre indique les hypothèses. On comprend donc la difficulté à atteindre une vitesse supérieure à celle de la marche lorsque l'on se trouve seul avec deux rames (Fig. 104). En optimisant la section mouillée et le profil hydrodynamique du bateau, les kayaks contemporains peuvent atteindre 8km/h soit environ 2m/s, mais difficilement davantage.

Fig. 104. *Puissance nécessaire d'un bateau de petite dimension et bien profilé se déplaçant à 5km/h par rapport à l'eau*

Maître-couple	0,5 m ²
Cd	0,3
Vitesse	5 km/h
Puissance nécessaire	200 W

¹ $P \sim 0,5 \cdot \rho S C_x A v^3$

Les premières voiles

La découverte de la voile va pendant un temps permettre l'essor des déplacements et des échanges marchands. Par brise légère¹, une section d'un mètre-carré perpendiculaire à la direction du vent est traversée par un flux d'énergie comparable à la puissance délivrée par un homme en plein effort ; par vent fort², ce même mètre-carré reçoit l'équivalent d'un flux d'énergie équivalent à dix hommes ! Aussi, la présence de l'eau favorise le gisement éolien : la surface lisse, sans rugosité au vent, prédispose les plans d'eau, les mers et les océans aux gisements éoliens intéressants (Fig. 105).

Fig. 105. Flux d'air et poussée sur une voile. Équivalence entre la vitesse du vent et la quantité de personnes

Flux de puissance

à 10 km/h	13 W/m ²
à 20 km/h	100 W/m ²
à 30 km/h	350 W/m ²
à 40 km/h	820 W/m ²
à 50 km/h	1600 W/m ²

Les fées de la nature étaient là pour voir naître ces premières machines, ces premiers outils à déplacement sans force musculaire humaine (les rames) ou animale (le halage) : la voile, la bonne proportion entre la surface ouverte au vent et la taille de l'embarcation. Cette relation entre le produit et la charge fait écho à ce nous verrons plus tard autour du bâtiment à énergie positive, au moment du temps V (#16) : parvenir d'un côté à réduire la demande énergétique (l'équivalent de la trainée de la coque d'un bateau ou de l'efficacité énergétique du bâtiment) tout en intégrant la bonne dimension de la production locale et les enjeux d'intégration qu'elle réclame (la voile pour le bateau ou les systèmes d'énergies renouvelables adaptés à l'architecture autonome).

L'efficacité naissante et le début des machines architecturale

Dans *L'extinction des technosaures* (2010) [16], Nicola Nosengo cite Basalla³ et rappelle l'invention de la roue vers moins 4000 avant notre ère dans une zone géographique située entre le Tibre et le Rhin. Seulement mille ans plus tard, la roue quitte son usage rituel pour les cérémonies pour enfin servir à transporter les marchandises. À la fin de son ouvrage [16], Nosengo précise :

« Le cas le plus documenté et le plus évident de techno-extinction de masse de l'histoire humaine, de l'histoire occidentale en particulier » : « la splendeur de l'époque de Ctésibios et de Héron laisse place à la décadence technologique, avec le Bas-Empire et le Moyen-Âge. Et l'Europe attendra la fin du 16^{ème} siècle

¹ 20km/h

² Un peu plus de 40km/h

³ George Basalla, *The evolution of technology*

pour redécouvrir des technologies utilisées couramment plusieurs siècles auparavant. ».

Ensuite, la roue favorisera l'essor du transport de marchandises en fluidifiant le déplacement de la matière par voies terrestres. La roue est l'équivalent de la sustentation hydraulique : sur terrain plat, le transport devient autoportant du point de vue de son poids propre. La puissance nécessaire à la motion du charriot ou de la brouette doit compenser la dissipation due aux différents frottements : au niveau du moyeu de la roue ou encore au niveau du contact de la roue avec le sol.

D'un point de vue énergétique, la voie romaine sera alors une révolution pour l'efficacité énergétique de la roue, la généralisation à grande échelle de ses vertus en réduisant fortement les dissipations énergétiques courantes d'une voie non apprêtée. Se déplacer à même vitesse réclame moins de puissance ; en conservant la même puissance, on peut se déplacer encore plus vite. Comme nous l'avons le découvrir dans les chapitres suivants, le mouvement circulaire, la roue et l'engrenage seront aussi des inspirations décisives pour la genèse de nouvelles architectures permettant la conversion du vent et du courant des rivières avec les premières éoliennes et les moulins à eau.

*

Bibliographie

1. THOMPSON D'Arcy, *On Growth and Form* (en français *Forme et Croissance*), 1917
2. COOK Earl, "The Flow of Energy in an Industrial Society." *Scientific American*, vol. 225, no. 3, 1971, pp. 134–147., www.jstor.org/stable/24923122
3. MENARD Raphaël et al., *Reforme, rapport final de recherche*, programme Ignis Mutat Res, 2014
4. CHOPPIN Julien, DELON Nicola (direction de l'ouvrage), *Matière Grise*, Pavillon de l'Arsenal, 2014
5. BIHOUIX Philippe. *L'âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable*, Seuil, Anthropocène, 2014. 330 p.
6. RODDIER François, *Thermodynamique de l'évolution, un essai de thermo-bio-sociologie*, Parole Éditions, 2012
7. SINGH Madanjeet, *L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature*, Unesco France Loisirs, 1998
8. ALEXEANDROFF Georges et Jeanne-Marie, *Architectures et Climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, Berger-Levrault, 1982
9. ANNAUD Jean-Jacques, *La guerre du feu*, film adapté du roman éponyme de J.-H. Rosny aîné (1909), 1981
10. SALVADORI Mario, *Comment ça tient ?* Parenthèses, 2005
11. DEPLAZES Andrea, *Construire l'architecture. Du matériau brut à l'édifice. Un manuel*, Birkhäuser, 2013
12. HESCHONG Lisa, *Architecture et Volupté thermique*, Marseille, Parenthèses, 1981
13. GRANDJEAN Alain, JANCOVICI, Jean-Marc, *Le plein s'il vous plait*, Seuil, 2006
14. MAC NEILL, John R., *Du nouveau sous le soleil. Une histoire de l'environnement mondial au 20^{ème} siècle*, Seyssel, Éditions Champ Vallon, 2010. Titre original *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*, 2000
15. AUZANNEAU, Mathieu, *L'or noir, la grande histoire du pétrole*, La Découverte, 2015
16. KRAUTHEIM, Mareike, PASEL Ralf, PFEIFFER Sven, SCHULTZ-GRANBERG Joachim. *City and Wind Climate as an Architectural Instrument*. Berlin: Dom, 2014
17. NOSENGO Nicola, *L'extension des technosaures. Histoire de technologies oubliées*. Belin, 2010

Fig. 106. D'après Vaclav Smil, Science, energy, ethics, and civilization

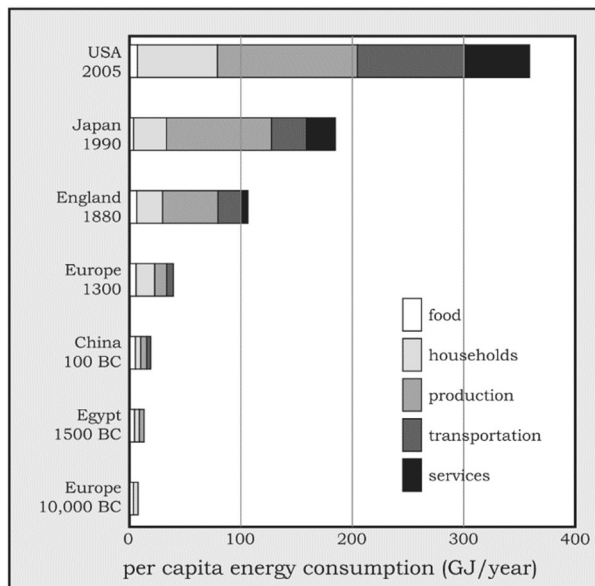
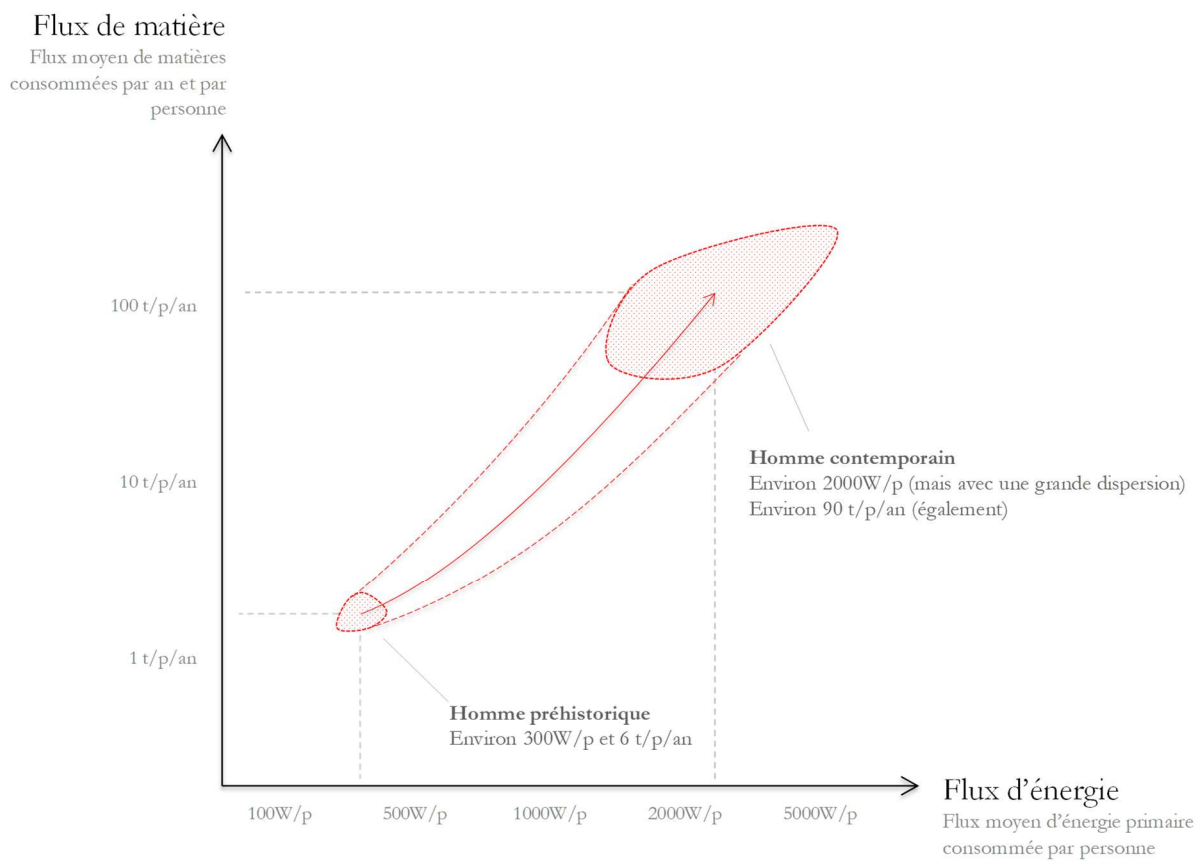


Fig. 107. *Évolutions des flux de matière et d'énergie entre le temps I et le temps IV.4*



#8 Chasser les courants

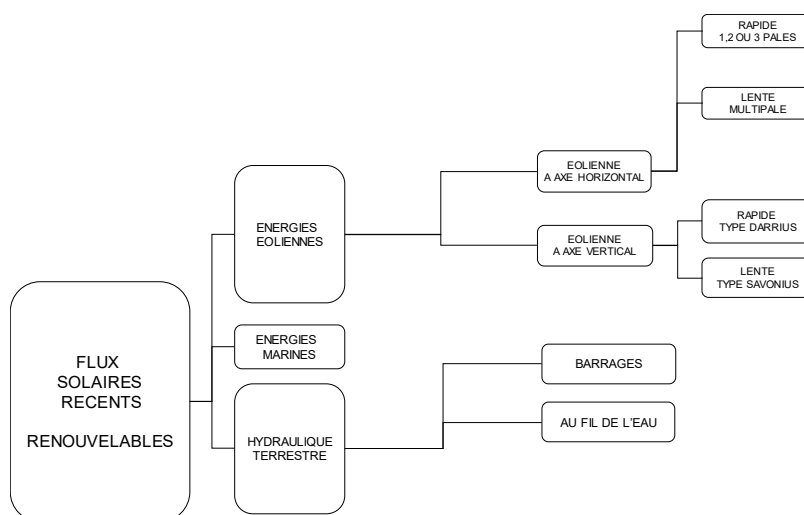
Première plongée dans les énergies renouvelables : énergie éolienne et énergie hydraulique. La Terre, machine thermodynamique. Le point sur ce zoo de machines qui convertissent les courants aériens et hydrauliques en énergie mécanique. La créativité architecturale que ces machines peuvent susciter.

Courants solaires

Wind, Water, Sun

Chasser les courants : ce chapitre décrit deux formes dérivées de l'énergie solaire, les courants d'air et les courants d'eau. Avant d'évoquer l'apparition des formes architecturales aptes à récolter une fraction de leur flux d'énergie, ce chapitre décrit d'abord succinctement la physique qui est à l'œuvre. De fait, les énergies renouvelables peuvent être parfois résumées par le trio *wind, water, sun*, avec le soleil en amont des ressources énergétiques éoliennes et hydrauliques. L'énergie solaire¹ est le principal moteur des phénomènes météorologiques, dont les déplacements de masses d'air à l'intérieur de l'atmosphère (le vent), ou encore des courants marins dans les mers et les océans, ou encore du cycle de l'eau et ainsi des flux des rivières et des fleuves (Fig. 108). C'est l'énergie mécanique (ou l'énergie cinétique) des déplacements de masses d'air qui est à la base de l'énergie éolienne ; et de façon analogue pour l'eau avec les énergies marines et hydrauliques.

Fig. 108. Une sous-branche de la taxinomie des énergies renouvelables : les dérivées d'énergie solaire mettant de la matière en mouvement : atmosphère et aquasphère déplacées par le couple « feu solaire et froid intersidéral ».



¹ Et la variation de sa distribution dans l'espace et dans le temps

La planète fonctionne comme un moteur, système thermodynamique pris en sandwich entre une source chaude et une source froide. Les courants solaires sont de l'énergie en mouvement, puisant leur haute qualité énergétique du contraste de température régnant entre la source chaude solaire (à plus de 5000°C) et le grand froid de l'espace intersidéral (à 3 kelvins soit environ -270°C).

Sources chaudes et sources froides

Notre environnement est composé d'une cascade de cycles thermodynamiques, enserrés dans une diversité géographique de sources chaudes et froides, variables dans le temps. Sous ce régime, selon les lois de la thermodynamique, les transferts d'énergie homogénéisent ces contrastes thermiques et ces gradients de température. Les matières s'animent alors dans une cascade de boucles convectives : courants marins et circulations atmosphériques tentent de répartir plus uniformément les températures sur la surface du globe (Fig. 109). François Roddier énoncerait que les matières terrestres s'auto-organisent pour maximiser leur dissipation d'énergie, selon l'axiome du troisième principe de la thermodynamique, introduit dans *Thermodynamique de l'évolution* (2012) [1].

Des potentiels très locaux

À la différence du flux solaire, les courants solaires (vent et eau) ont pour particularité une densité très contrastée de leur gisement : certaines zones du monde n'ont presque pas de vent alors que d'autres sont très venteuses. À l'inverse, le rapport entre le maximum et le minimum mondial pour l'irradiation solaire horizontale est sans doute d'environ quatre¹ ; pour le vent, et la densité du gisement annuel moyen, ce rapport est sans doute supérieur à cent². Idem pour les ressources hydrauliques et évidemment de même pour les énergies marines. De fait, la densité de puissance d'un flux d'air ou d'eau croît avec le cube de la vitesse. Autrement dit, la densité de puissance éolienne est huit fois plus importante lorsque le vent passe de 10 à 20km/h. Un cours d'eau dont la vitesse moyenne passerait de 1 à 2m/s disposerait aussi d'une densité de puissance augmentée d'un facteur huit.

Topographies et altitude

Les courants solaires sont donc des flux très locaux. Ils sont corrélés aux reliefs, à la topographie de grande échelle, pour l'hydrographie et donc le gisement hydraulique notamment, et à petite échelle également, pour le gisement éolien qui est sensible à des effets de relief locaux ou à des variations de rugosité des sols par exemple. La ressource éolienne augmente

Fig. 109. Cette très belle animation de Camera Beccario sur son site *Earth Wind Map* illustre la richesse des mouvements convectifs des masses d'air terrestre, qui agissent telles des pompes de transfert d'énergie thermique.



¹ Vraisemblablement 250 watts par m² dans les déserts les plus irradiés contre une soixante de watts par m² vers les pôles. Mais dans les zones majoritairement habitées par l'homme, cet écart relatif est plus faible et davantage l'ordre de 1 à 3.

² Au premier ordre, il suffit que le rapport des vitesses moyennes de vent soit d'environ 5, étant vu que la densité de flux est proportionnelle au cube de la vitesse de vent.

considérablement avec l'altitude par rapport au sol. On comprend la course au gigantisme pour les turbines contemporaines : des nacelles de plus en plus hautes pour aller chercher la ressource plus haut dans le ciel (chapitre #26). Et puis, nous le verrons, l'estimation de leur productible n'est pas directement associée à une surface en plan (quoique cela puisse être le cas pour les fermes éoliennes, mais nous le verrons un peu plus loin).

Sensibilités au changement climatique

Autre singularité de cette famille de flux d'énergie, une sensibilité possible au changement climatique. Au cours des prochaines décades, sous l'effet du dérèglement, des courants marins pourront être modifiés, des glaciers fonderont probablement, quelques régimes hydriques seront sans doute bouleversés (chapitres #18 et #19). Pour Éole, certains vents typiques seront modifiés dans leur orientation, leur puissance et leur occurrence. Cette sensibilité est un symptôme de flux gouvernés par la mécanique des fluides. Les équations qui la régissent sont fortement non-linéaires, c'est-à-dire qu'une légère modification du système est susceptible de générer de grandes divergences dans les comportements et dans les trajectoires.

À l'inverse, les formes plus directes de conversion de l'énergie solaire, telles qu'elles seront abordées ensuite, comme le solaire thermique ou le solaire photovoltaïque (#13), seront moins concernées par le réchauffement global : pas de modifications attendues sur les cartographies d'irradiation solaire horizontale, à savoir la quantité d'énergie solaire reçue par an sur un plan horizontal¹. Seul le flux direct d'énergie solaire pourrait être concerné selon la modification locale des couvertures nuageuses typiques et pourrait avoir éventuellement des impacts pour les technologies de solaire à concentration (#13). Concernant les architectures chargées de récupérer les courants solaires, telles les éoliennes ou les grands barrages, ce risque de production lié au changement climatique est donc à retenir. Il devrait encourager à questionner la durée de vie de l'infrastructure et à rebours, ses choix de conception : viser donc des temps de retour énergétique plutôt relativement brefs (chapitres #5 et #20).

Résister aux forces

Capter les flux -d'air ou d'eau- suppose de résister, de s'opposer à la pression qu'ils exercent sur tout obstacle. Nous avons l'expérience de la force du courant lorsque nous nous baignons dans une rivière ou d'une marche perturbée par un grand vent. À l'inverse, les formes directes de l'énergie solaire ne réclament pas la même capacité de résistance : l'interception énergétique des photons solaires engendre une pression perceptible uniquement dans le vide intersidéral et les voiles solaires utilisent ce principe.

¹ En kWh par m² et par an ou en W moyens par m²

Dans la troisième partie, en auscultant le cas de *Wind-it* (chapitre #26), nous verrons qu'une éolienne moderne doit résister à des efforts importants et en particulier son fut. La nacelle de la turbine concentre les forces du vent appliquées sur les pales en tête de ce grand tube encastré dans le sol (Fig. 110).

Pression dynamique

à 10 km/h	5 N/m ²
à 20 km/h	20 N/m ²
à 30 km/h	40 N/m ²
à 40 km/h	75 N/m ²
à 50 km/h	115 N/m ²
à 60 km/h	165 N/m ²
à 70 km/h	225 N/m ²
à 80 km/h	295 N/m ²

À charge de ce dernier de résister à la flexion de ces efforts gigantesques, à l'échelle du disque balayée par les pales lors de leur rotation. Nous verrons comment la quantité de matière nécessaire pour cette architecture de récolte croît plus rapidement que la quantité d'énergie récupérée (#26). Avec l'eau, du fait d'une densité huit cent fois supérieur à l'air, les efforts sont très rapidement importants (Fig. 111).

Pression dynamique

à 1 km/h	39 N/m ²
à 2 km/h	154 N/m ²
à 3 km/h	347 N/m ²
à 4 km/h	617 N/m ²
à 5 km/h	965 N/m ²
à 6 km/h	1389 N/m ²
à 7 km/h	1890 N/m ²

Une retenue d'eau devra elle résister à une pression hydrostatique croissante avec la hauteur du volume stocké. À un mètre de profondeur, la pression qui s'exerce est déjà d'une tonne par mètre-carré. La captation énergétique des courants d'eau réclame des quantités importantes de matière pour contenir le poids des retenues et la pression de l'eau.

« On voit dans cette formule que la poussée exercée par l'eau sur un barrage augmente avec le carré de la hauteur de la retenue (ce qui est vrai pour tout type de barrage). Elle ne dépend bien sûr pas du volume d'eau stocké dans la retenue. Le point d'application de cette force se situe au barycentre du diagramme des pressions, soit généralement au tiers de la hauteur de retenue. Les calculs ci-dessus ne concernent que les barrages en matériaux rigides (béton, maçonnerie...), quel que soit leur type (poids, voûte, contreforts...). En revanche l'intégration par plots n'intéresse que les barrages de type poids ou contreforts, qui sont régis par la statique du solide. Pour les voûtes, les efforts étant reportés

Fig. 110. Quelques valeurs de pression dynamique du vent pour plusieurs vitesses. À 50km/h, elle dépasse déjà 10kg par unité de surface. Pour une grande éolienne contemporaine, disposant d'une surface balayée d'environ un hectare, l'effort de vent en tête de nacelle peut être de l'ordre de 50 tonnes par un vent de 50km/h.

Fig. 111. La contrepartie de la densité de puissance à basse vitesse de l'eau : des pressions dynamiques absolues considérables. La pression d'eau à 5km/h atteint environ 100 kilos par mètre-carré : un enjeu important pour la fabrication de digues.

latéralement par des mécanismes de flexion et de compression, un calcul par plots ne prenant en compte que les forces verticales n'est pas suffisant et il est nécessaire de recourir à la résistance des matériaux (déformation élastique) et souvent à des méthodes numériques avancées (méthode des éléments finis linéaires voire non-linéaires). En revanche, en ce qui concerne les barrages en matériaux meubles (sol, terre, enrochements, remblais...), les calculs sont apparentés à des calculs de stabilité de pente des talus qui doivent prendre en compte l'état saturé ou non de ces remblais. »

Dans la suite de ce chapitre, nous allons successivement introduire l'émergence des architectures de captation des courants, d'abord les moulins à vent et les éoliennes, nés selon Smil il y a 1200 ans [2], puis ensuite les roues à eau et les architectures hydrauliques plus anciennes et datant de plus de 2000 ans.

Fig. 112. *La Colline de Montmartre avec une carrière de pierres par Van Gogh, 1886*

*



Courants d'air

- 3300 Premières embarcations à voile
- 800 Moulins verticaux en Perse
- 800 Apparition des premiers moulins
- 2006 Premières esquisses de Wind-it

L'énergie éolienne en quelques mots

Le gisement total disponible

Que représente le flot d'énergie éolienne disponible ? Archer et Jacobson (2005) ont évalué ce gisement à 72TW¹ [2], soit près de cinq fois les besoins énergétiques totaux de l'humanité en 2017. Dans leur article, *Energie, effet de serre et changement climatique*, Valérie Masson-Delmotte, Hervé Le Treut et Didier Paillard précisent que 35TW sont disponibles sur les continents à quelques dizaines de mètres du sol, soit un flux encore très largement supérieur aux besoins de l'humanité [3].

Comment récolter ce flot ? Quelles architectures, quelles organisations savantes et durables de la matière permettraient de récupérer les bonnes miettes de ce gisement fabuleux ? Dans la suite de cette partie, nous allons parcourir cette typologie d'architectures, en distinguant comme dans l'arbre ci-contre les types et les sous-types, et les spécificités énergie et matière propres à chacun (Fig. 113).

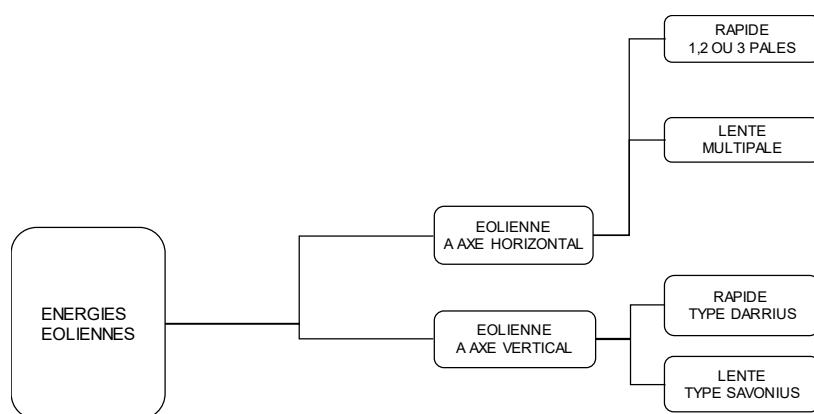


Fig. 113. Famille des éoliennes (ou aérogénérateurs)

¹ Cité par Smil, p62

Les moulins à vent

Premières géométries

Fig. 114. *Marine à voile*



Les voiles des bateaux égyptiens commencèrent à dompter la pression du vent vers -3300 avant notre ère sur les rives du Nil [4]. Les premières éoliennes ont tiré les enseignements sur l'art et la manière de faire travailler le mieux possible la pression du vent. Les techniques de la toile tendue, l'expérience des efforts engendrés par le souffle d'Éole ont inspiré la fabrication des premières machines éoliennes, premières architectures issues de l'énergie solaire. À l'heure où la quasi-totalité du fret mondial est assurée par la combustion d'hydrocarbures¹, Fressoz et Bonneuil rappellent² qu'en 1868 [5], 92% du tonnage de la marine marchande britannique était encore mû par le vent, par l'efficacité des bateaux à voile. L'inflexion contemporaine est encore bien timide, quelques start-ups technologiques proposant à l'état souvent de prototypes de grands cerfs-volants pour aider à la traction des porte-containers.

Les premières machines

L'histoire des éoliennes a presque deux mille ans, elle débute en Chine, en Afghanistan et en Perse, essentiellement pour l'irrigation et pour broyer le grain [4]. Smil date les premiers moulins vers les années 800 [2], tandis que d'autres mentionnent leur apparition en Perse au 7^{ème} siècle. Ces premières machines seront d'abord des éoliennes « lentes », à axe horizontal et aussi parfois à axe vertical. Les moulins à vent, ces aérogénérateurs d'antan, pouvaient également servir à pomper de l'eau. Ils étaient des machines rudimentaires, disposant de rendement aérodynamique assez faible comparé aux turbines contemporaines et leurs cascades d'engrenages en bois, après de savants renvois, occasionnaient des pertes importantes.

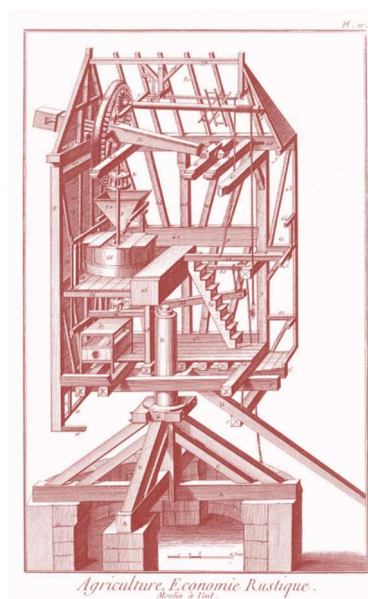
Les moulins à vent usuels, souvent représentés dans les gravures ou les peintures, sont pour la plupart des éoliennes à axe horizontal de type « lent ». Leur architecture réclame alors un dispositif pour pouvoir s'orienter en suivant la direction du vent (Fig. 115). Mathieu Arnoux dans *Mille ans de lutte par-dessus les moulins* nous précise l'origine et la diffusion de ces architectures dédiées à la récolte de l'énergie du vent :

« La diffusion des moulins à vent, à partir de 1200, vient augmenter la fiabilité du système : peu chers, souvent mieux protégés et insensibles aux variations des cours d'eau, ils peuvent pallier l'intermittence des moulins à eau. En France, pour l'essentiel, ils sont réservés à la meunerie, mais le monde méditerranéen et les Pays-Bas développeront par la suite leur contribution au fonctionnement des salines ou à l'exhaure des polders. Leur installation, le plus souvent très bien documentée dans les sources, présente aujourd'hui un intérêt spécial : elle implique une réorganisation profonde des marchés très réglementés de la meunerie et de l'énergie. C'est un exemple particulièrement précoce de réaction positive à l'innovation technologique. [...] Pour le royaume d'Angleterre, la seule région véritablement couverte par les archives, le Domesday Book, inventaire des droits du roi dressé en 1086, fait état d'au moins six mille moulins. On ne peut

¹ Le fioul lourd des moteurs des porte-containers.

² p126, *L'événement Anthropocène*.

Fig. 115. *Axonométrie éclatée d'un moulin à vent.*



Agriculture, Économie Rustique.
M. Arnoux

donner de chiffres comparables pour la France, l'Italie ou l'Empire, mais les sources locales conservées dans les archives (ventes, donations, conflits, contrats) sont considérables et nous permettent d'en comprendre mieux le fonctionnement à mesure que le temps avance. [...] La meunerie fut le premier but de ces installations, qui permettaient, en produisant sans effort des quantités importantes de farine, d'épargner aux familles paysannes un travail long et fastidieux, qui pouvait dès lors être employé à d'autres tâches : l'installation d'un moulin était une condition essentielle à la pluriactivité des paysans, et partant, à la naissance d'une division du travail dans les villages. »

Une très large diffusion

Bonneuil et Fressoz précisent qu'à la fin du 19^{ème} siècle, six millions d'éoliennes se dressaient dans les plaines du Midwest américain [5] ; elles permettaient le pompage et l'irrigation nécessaire à l'activation des champs et de l'élevage. Pour Singh, en 1850, il y avait en Europe plus de 50 000 moulins à vent [4]. D'autres sources comme Kris De Decker¹ avancent le nombre de 200 000 moulins en Europe au plus fort de leur activité. En 1847, la France en comptait presque 9 000. Comme nous le verrons après, leur puissance mécanique était considérable, surtout comparée à la puissance musculaire humaine ou animale. Ce large déploiement était la rançon d'un temps de retour énergétique sans aucun doute bref : il devait assurément être intéressant d'investir de l'intelligence, de la force humaine et animale et quelques matériaux pour édifier une architecture susceptible de rembourser très rapidement cet investissement.

Loi de production

Hier comme aujourd'hui, la puissance de ces machines est proportionnelle à la surface balayée par les pales, soit la surface du disque parcourue lors de leur rotation (Fig. 116). Comme nous l'avons vu, le flux de puissance éolien est proportionnel au cube de la vitesse du vent². Ainsi, dès que la vitesse de vent est doublée, la puissance produite par éolienne est en général multipliée par huit (en général, parce que le rendement de l'éolienne peut changer selon la vitesse de vent). Cette production était directement mécanique et servait au meulage ou au pompage, ou bien, comme aujourd'hui, elle est généralement convertie directement en électricité, via la génératrice située dans la nacelle, en tête du mat de la turbine.

Cette loi physique, définie notamment par une extrême sensibilité au régime de vent du fait de la relation cubique à la vitesse, révèle l'intermittence intrinsèque de cette production d'énergie. Évidemment, avec une telle non-linéarité, on comprend que la production puisse être erratique. Lorsqu'on pompe de l'eau ou lorsqu'on moule du grain, la matière peut cependant juguler cette intermittence et opérer comme une sorte de tampon de production. Avec l'électricité, cela est souvent plus compliqué si

Fig. 116. *Projet de Frank Lloyd Wright. Roméo et Juliette, 1897. Estimation de la production générée par l'éolienne multipale à axe horizontal.*

$C_p \sim 15\%$, $S_{balayée} \sim 4m^2$
 $v=3m/s$, ($\sim 10km/h$), $P \sim 10W$
 $v=6m/s$, ($\sim 20km/h$), $P \sim 80W$
 $v=9m/s$ ($\sim 35km/h$), $P \sim 400W$



¹ Low-Tech Magazine, octobre 2009. <http://bit.ly/2ltCTBv>

² $f_e \propto -\rho S v^3$: le flux disponible en W est proportionnel à la densité du fluide (environ 1,2kg/m³ pour l'air et 1000kg/m³ pour l'eau) et la vitesse du fluide.

Pour mémoire, et par convention dans ce mémoire, un signe négatif correspond à une production de l'objet donné à l'extérieur : elle correspond à un débit de son point de vue.

l'on ne dispose pas d'un stockage efficace. Mais quelques siècles auparavant, pour un moulin hollandais, le tableau ci-contre détaille ce à quoi pouvait ressembler la production mécanique selon plusieurs vitesses de vent, en supposant que le rendement moyen équivalent de l'époque pouvait être de 15%, soit le quart du rendement maximum atteignable. Par vent de 20km/h, la puissance mécanique disponible était équivalente à près de cinquante personnes ou à dix chevaux travaillant de concert. Si le vent forçissait à 30km/h, c'était alors l'équivalent de la puissance d'un attelage de trente chevaux (Fig. 117).

Fig. 117. Courbe typique de production selon la vitesse du vent. Estimation des puissances mécaniques générées par un moulin hollandais selon différentes vitesses de vent. Par vent de 15km/h, le moulin produisait l'équivalent de la puissance musculaire de 20 personnes. L'investissement de sa construction valait sans aucun doute par un temps de retour extrêmement bref vu les services énergétiques rendus (#20)

Diamètre des pales	20 m
Surface balayée	314 m ²
Cp moyen	0,15
Flux de puissance	
à 10 km/h soit 3 m/s	1 kW
à 15 km/h soit 4 m/s	2 kW
à 20 km/h soit 6 m/s	5 kW
à 25 km/h soit 7 m/s	9 kW
à 30 km/h soit 8 m/s	16 kW

Les éoliennes modernes à axe horizontal

Des machines presque parfaites

Les éoliennes contemporaines diffèrent énormément de leurs aïeuls. La première éolienne utilisée pour produire de l'électricité date de 1888. Depuis près d'un siècle et demi, des progrès incroyables ont été réalisés permettant à la fois d'accroître rendement, capacité de puissance et fiabilité de production (Fig. 118). Comme les moulins à vent d'antan, les éoliennes modernes à axe horizontal doivent aussi être placées dans le sens du vent et disposent ainsi d'un système leur permettant d'offrir un plan de récolte énergétique perpendiculaire à la direction du vent¹ [6]. Basé au Danemark, le physicien et météorologue Paul La Cour est le père des éoliennes modernes et Singh précise qu'il est à l'origine d'une première envolée de la puissance des turbines, celles-ci ayant rapidement progressé de 15 à 500kW. Ces machines ne sont pas loin d'être au maximum de leur achèvement technique : elles s'approchent du rendement maximum physique possible, appelée limite de Betz.

La limite de Betz

Ce « mur du son énergétique » oppose une limite, l'impossibilité mathématique de soutirer plus de 60% de puissance au flux éolien. Les turbines d'aujourd'hui sont très proches de cette asymptote. Cette perfection évoque celle des records des sports à voile avec des embarcations capables d'aller plus vite que le vent, comme des chars à voile de compétition susceptibles de se déplacer deux à trois fois plus rapidement que le vent par

Fig. 118. Parc éolien de San Giorgio Pass en Californie, vu dans le film de Barry Levinson, Rain Man de 1988 : la route traverse un champ d'éoliennes d'ancienne génération. Les turbines sont bien plus petites que celles que nous croisons aujourd'hui sur le bord de nos routes ; elles sont aussi plus densément implantées. Un paysage moins familier de nos jours. Il semblerait cependant que les éoliennes de dimension plus réduites puissent être plus efficaces du point de vue du bilan écologique, voir le chapitre correspondant #26.



¹ Soit par une nacelle motorisée pour une grande éolienne ou sinon par un gouvernail pour les petites éoliennes à axe horizontal

la grâce des progrès inouïs en aérodynamique et aux exploits de fabrication de géométries sophistiquées, composées de matériaux aux capacités mécaniques hors-pair. L'éolien est devenu le royaume des matériaux composites, les pales devant presque épouser l'adage de Le Ricolais : « portée infinie pour masse nulle ».

La course au gigantisme

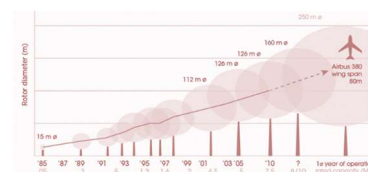
Ainsi pour accroître la récolte globale, il n'y a pas d'autres options que d'augmenter la surface balayée par les pales. Depuis ces dernières années, on assiste à une véritable course au gigantisme. Les pales sont de plus en plus grandes ; les futs juchent les nacelles à des records de hauteur (Fig. 119).

Diamètre des pales	100 m
Surface balayée	7854 m ²
Cp moyen	0,50
Flux de puissance	
à 10 km/h soit 3 m/s	0,05 MW
à 20 km/h soit 6 m/s	0,4 MW
à 30 km/h soit 8 m/s	1 MW
à 40 km/h soit 11 m/s	3 MW
à 50 km/h soit 14 m/s	6 MW

Les grandes éoliennes *offshores* tutoient maintenant des capacités de 10MW sous vent nominal (Fig. 120). Ainsi une grande ferme *offshore*, composée de cent turbines de ce type, délivrerait une puissance analogue à celle d'une tranche nucléaire ou d'un grand barrage. Comme « règle du pouce », on peut retenir que l'éolienne « débite » en moyenne sur une année 20 à 30% de sa capacité nominale lorsqu'elle est installée dans un bon site. Une éolienne *offshore* de 10MW produira 20 à 30GWh d'électricité par an. Son équivalent solaire serait un champ photovoltaïque d'environ vingt hectares pour la production annuelle d'électricité.

Fig. 119. Ordre de grandeur typique des puissances générées par une éolienne contemporaine. Sur un bon site, son flux moyen annuel de production sera d'environ 2MW, soit une production annuelle d'électricité d'environ 20GWh de quoi faire rouler 1000 voitures électriques chacune 10 000km sur une année¹.

Fig. 120. Diagramme de l'évolution des dimensions et surfaces balayées. À droite, les éoliennes récentes, et celles dédiées à la production en mer tutoient les 10MW de puissance nominale avec des rotors dont les diamètres dépassent 150 mètres.

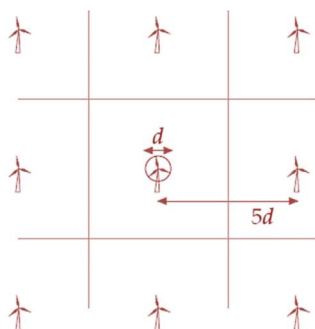


¹ Soit 20MWh par an par véhicule.

Fig. 121. Un champ d'éoliennes offshore



Fig. 122. Règles de prospect aérodynamique pour une ferme éolienne [7]



Un record récent

Début 2017, *Le journal de l'éolien onshore & offshore*¹ relatait le record de production *offshore* enregistré à Osterild au Danemark pour une turbine de marque MHI Vestas Offshore Wind, modèle V164-8.0², d'une capacité de 8MW poussée à 9MW. Le 1^{er} décembre 2016, une production de 216 000 kWh était constatée sur une seule journée, soit l'équivalent d'un flux moyen de 9MW, autrement dit une disponibilité de 100%. Il faut relever que cette bête de course s'élève à 220 mètres de haut, qu'elle dispose de 21 124 m² balayés, soit un champ vertical de plus de deux hectares, que ces trois pales font 80 mètres chacune et pèse 35 tonnes. Nous pourrions nous interroger : combien coûte écologiquement une telle architecture ? Nous aborderons plus loin cet important enjeu énergie-matière avec cette quête récurrente : *le moins de matières non renouvelables pour un maximum de production renouvelable* (notamment aux chapitres #20, #25 et #26)

L'urbanisme des éoliennes et quelques valeurs typiques de flux produit

Cette « sylviculture du vent » obéit à un « urbanisme des énergies renouvelables » (Fig. 121). L'implantation des éoliennes suit des règles nécessaires afin d'optimiser les rendements de production. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard que le mot « champ » soit utilisé. Ainsi les turbines ne peuvent être situées à trop grande proximité les unes des autres : leur interaction avec le flux éolien génère des turbulences à proximité. Tout comme le prospect solaire dans le cas du bioclimatisme (et nous l'étudierons aussi plus loin dans le chapitre consacré au solaire passif), les champs éoliens obéissent à des règles de prospects aérodynamiques (Fig. 122). Aussi plus l'éolienne est grande, plus l'interdistance avec ses congénères doit être élevée. Alors, en plan, la densité de production stagne et plafonne d'après Mac Kay [7] à une densité de flux moyen d'environ³ 2 à 3 watts par m² de sol, soit une production annuelle de l'ordre de 200MWh d'énergie mécanique⁴ par hectare de ferme éolienne. Smil évoque lui un écartement de 3 à 5 fois le diamètre en largeur et de 6 à 10 fois selon la direction principale du vent [2]. Les règles sont sensiblement les mêmes pour les éoliennes à axe vertical. Aussi vous saurez détecter les mirages vendus par les perspectives d'architecture exhibant des éoliennes à touche-touche. Selon ces principes, nous interrogerons plus loin la « bonne échelle » de ces machines, la taille optimale vis-à-vis de cette tension entre énergie et matière, et plus particulièrement dans le chapitre consacré à Wind-it, #26.

¹ p49, jan-fév.-mars 2017

² L'article rappelle également que sa durée de vie est estimée à 25 ans et que la turbine sera recyclée à 80%. Sa vitesse de démarrage est sinon établie à 4m/s (~15km/h) et sa production optimale est entre 12 et 26m/s (soit des vents compris entre 40 et 90km/h à hauteur de la nacelle)

³ À titre d'exemple, une éolienne de 10MW possède un diamètre balayé supérieur à 150m et nous avons vu que sa disponibilité sera de l'ordre de 20 à 30% : le flux moyen annuel est alors d'environ 2-3MW. *Grosso modo*, elle doit être séparée d'environ 3 fois cette distance (comme première règle du pouce) pour les éoliennes les plus proches. Elle occupe donc une surface d'environ 1km² : nous retrouvons bien 2 à 3W par mètre carré de sol comme densité de flux surfacique.

⁴ Ou d'électricité ce qui revient à la même chose du point de vue des quantités et des qualités d'énergie

Exemple pour les Etats-Unis

À la fin 2016, aux Etats-Unis, l'AWEA estimait que 52 000 turbines étaient installées et opérationnelles, soit plus de 82GW de capacité éolienne¹. Selon l'hypothèse d'une disponibilité équivalente de 25%, le flux moyen de production états-unien serait alors d'environ 20GW. Rapporté à une surface nationale de près 9,8 millions de km², la densité surfacique de ce flux est donc d'environ 2mW (milliwatt) par² m². Ramené à une population d'environ 325 millions de citoyens, ce flux ne représente plus que 50 watts électriques par habitant, soit une toute petite fraction (environ 13000 kWh annuels, soit un flux de demande d'environ 1500 watts électriques)

Densité de production avec des turbines de 1,5MW et de 3MW

Dans son ouvrage [2], Smil détaille le cas d'un champ constitué de vingt et une turbines de marque *Vestas* de 3MW, dont le diamètre est de 90m et dont le prospect aérodynamique réclame une empreinte spatiale de 486 hectares. Dans cette situation, le flux moyen de production est 13 watts par m² ; mais si l'on tient compte d'une zone tampon acoustique d'un kilomètre, la surface nécessaire est alors de 1786 hectares et le flux descend alors à 3,5 watts par m². Les exemples dans les tableaux ci-contre synthétisent les quantités « espace-temps » et « matière-énergie » pour des éoliennes récentes de 1,5MW.

Quelles durées de vie ?

Après cette mise à l'échelle spatiale puis citoyenne, nous pourrions également nous interroger sur la durée de vie de ces architectures. Le constructeur de la turbine offshore mentionnée précédemment annonce une durée de vie estimée à 25 ans. Un article récent³ annonçait par ailleurs le démantèlement récent de la première ferme éolienne offshore au Danemark, vieille de 26 ans. Les éoliennes en mer sont en effet soumises à un environnement plus agressif. Toutefois le risque d'obsolescence anticipée peut davantage survenir de la course à la performance. Le *repower*, la re-motorisation, de certains sites ayant pour effet d'une obsolescence forcée de machines de moins de dix ans. Autre enjeu prégnant, l'impact paysager de ces machines culminant souvent à plus de cent mètres. Vis-à-vis des détracteurs, j'oppose en général l'argument d'un démantèlement bien plus simple que d'autres utilités énergétiques comme une centrale nucléaire voire même une centrale thermique classique. Dans cette perspective, la question de l'impact paysager peut aussi être abordé selon un prisme temporaire, les éoliennes n'étant que des architectures éphémères, transitoires, et qui seront démontées lorsque l'humanité aura finalement découvert son *graal* énergétique et que le réchauffement climatique ne sera plus qu'une vieille angoisse (intentions fondatrices pour les chapitres #25 et #26).

¹ Soit des puissances moyennes nominales par turbine de près de 1,6MW

² Mais rappelons-nous qu'il y a une turbine en moyenne pour 188km² et si elles étaient disposées sur un réseau régulier, elles seraient interdistantes de 14km

³ <http://www.windpoweroffshore.com/article/1427436/dong-begins-vindeby-decommissioning-pictures>

Fig. 123. *L'éolien, c'est simple : une belle forme aérodynamique pour chasser l'énergie cinétique du vent et une grosse dynamo ! Photo de Nicky Bonne sur l'île de Samsø au Danemark*



Fig. 124. *Éolienne Enercon dessinée par Norman Foster en 1993, avec sa nacelle profilée et le dégradé vert en pied de fut.*

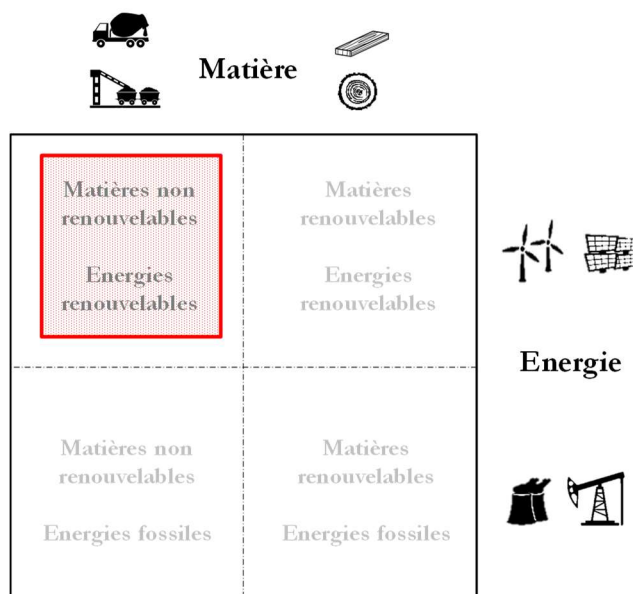


Matières des grandes turbines

Les éoliennes modernes réclament des matériaux composites pour leurs pales, de l'acier pour leur fût et du béton pour leur ancrage. Évidemment, derrière cette composition grossière, des matières précises et parfois rares sont nécessaires pour la partie mécanique et électromécanique de ces « avions statiques ». L'exemple de la turbine *Vestas* de 1,5MW précise les 1122 tonnes nécessaires. Amortis sur une durée de vie de trente ans, cette architecture consommera l'équivalent de 38 tonnes par an. Positionnée sur un site venté, sa production électrique au cours de sa vie sera d'environ 112 GWh. Aussi chaque kilowattheure produit aura nécessité 10 grammes de matière.

Comme d'autres énergies renouvelables, les turbines contemporaines sont fréquemment dans le viseur de polémique autour des matières rares qui seraient nécessaires à leur construction comme le néodyme de leurs aimants [8] (Fig. 125). Posons les mêmes questions aussi aux utilités classiques, comme une centrale à gaz réclamant sans aucun doute des matières semblables pour sa partie électromécanique. Cela n'exclue aucunement une recherche de durabilité, sinon d'usage de matières renouvelables pour la fabrication de ces architectures.

Fig. 125. *La situation énergie-matière d'une grande éolienne contemporaine.*



Amortissement carbone gris et émissions de CO₂ équivalentes en production

Dans un document de 2015 [9], l'Ademe pointait les valeurs suivantes pour les grandes turbines contemporaines : un temps de retour énergétique de douze mois pour l'éolien terrestre et de quatorze mois en *offshore*, tandis que l'amortissement du carbone gris sur la production totale correspondait à 12,7grCO₂ pour chaque kilowattheure produit et 14,8 dans le cas de l'*offshore*. Un article plus récent fait état d'un temps de retour de six mois pour une éolienne de 2MW¹. Du point de vue énergie et carbone, les éoliennes semblent être tout à fait pertinentes d'autant que le ratio équivalent d'émissions devrait tendanciellement diminuer au fur et à mesure d'un verdissement des capacités mondiales (Fig. 126).

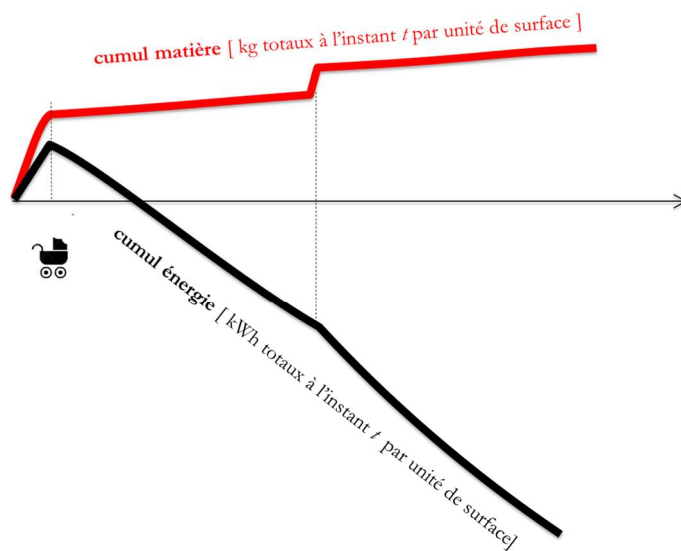


Fig. 126. Diagramme énergie-matière d'une éolienne contemporaine avec l'hypothèse d'un changement d'un composant à mi-vie (électronique de puissance) concourant à améliorer le rendement de production énergétique

Les matières nécessaires des petites éoliennes

Comme nous le verrons en troisième partie autour de l'étude de cas de *Wind-it* (#26), les éoliennes de dimensions réduites offrent un territoire de recherche extrêmement enthousiasmant, notamment vis-à-vis de la tension énergie-matière, qui reste sans doute le point délicat pour les grandes turbines. Avec des sollicitations mécaniques moindres, le bois redevient une matière possible. La force des machines éoliennes (et par extension hydrauliques) est qu'elles sont bricolables à partir de matériaux locaux ou de composants réemployés (comme les roulements à bille par exemple). Dans son documentaire, *Qu'est-ce qu'on attend ?* [10], Marie-Monique Robin filme l'exemple de l'éolienne à axe horizontal fabriquée par l'ensemble des villageois de Ungersheim.

¹ <https://www.sciencedaily.com/releases/2014/06/140616093317.htm>

Les éoliennes à axe vertical

Les autres turbines : un ouvrage à architecture potentielle

Fig. 127. *Éolienne de Blyth (de type Savonius)*

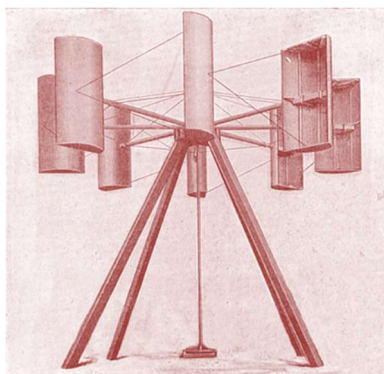


Fig. 128. *Éolienne à axe vertical de type Darrius, à Cap Chat, au Québec. 110 m de haut et capacité de 4MW*



L'éolien à axe vertical offre des perspectives d'autoconstruction analogue à l'exemple précédent. Il serait d'ailleurs opportun de porter un autre regard sur les possibilités d'intégration du petit éolien dans l'architecture. En particulier, par les potentialités offertes par ce sous-type d'éolien, dit à axe vertical. Leur aïeule est l'éolienne de Blyth datant de la fin du 19^{ème} siècle (Fig. 127). Avant cette mention, Singh [4] précise que les Perses au 7^{ème} siècle avaient commencé l'utilisation de la puissance éolienne par un système à axe vertical.

L'intérêt de ces architectures est qu'elles ne réclament pas de système d'orientation en fonction de la direction du vent. La dissymétrie de la forme aérodynamique permet la conversion du flux éolien en mouvement de rotation. Ces éoliennes lentes, de type Savonius, sont l'équivalent d'un grand anémomètre (Fig. 127). Elles sont très rudimentaires mais efficaces pour convertir un vent faible en énergie mécanique des vitesses. Leur rendement de conversion¹ est plus faible environ² 15% contre 50% pour les cousines à axe horizontal³.

Les éoliennes verticales de type Darrius

Ces éoliennes se présentent généralement sous la forme de deux ou trois pales connectées par l'intermédiaire de bras à un axe vertical. L'ensemble tourne comme un tourniquet sous l'action du vent. Les éoliennes Darrius sont également moins bruyantes car elles ne génèrent pas d'effet de sifflement d'extrémité de pales. Du point de vue économique, les coûts d'investissement à puissance égale sont généralement supérieurs à ceux d'une éolienne à axe horizontal du fait d'un moindre développement industriel.

Cette typologie est adaptable à différentes échelles, de l'aérogénérateur de petites tailles d'une centaine de watts à l'éolienne de grande puissance comme la Darrius de 4MW construite au Québec, à Cap Chat (Fig. 128). Les éoliennes de type Darrius⁴, permettent d'atteindre des rendements compris entre 20 et 40% du fait notamment qu'elles soient des éoliennes à portance et non à trainée comme les Savonius : elles exploitent les effets de portance d'un profil d'aile sous incidence variable de vent (Fig. 129).

¹ Le C_p , pour coefficient de performance

² L'exemple du travail optimal d'une pression dynamique et le calcul associé.

³ Qui doivent, elles disposer d'un système d'orientation de leur nacelle afin que le plan de rotation de leurs pales soit tout le temps perpendiculaire au flux venteux

⁴ Qui sont des éoliennes à portance et non à trainée comme les précédentes (de type Savonius)

Eolienne à axe verticale de type Darrieus

Hauteur des pales	5 m
Diamètre	5 m
Surface balayée	25 m ²
Cp moyen	0,30
Flux de puissance	
à 10 km/h soit 3 m/s	0,1 kW
à 20 km/h soit 6 m/s	1 kW
à 30 km/h soit 8 m/s	3 kW
à 40 km/h soit 11 m/s	6 kW
à 50 km/h soit 14 m/s	12 kW

Fig. 129. Puissances typiques générées par une éolienne à axe vertical de type Darrieus

Plus de matières pour une même récolte

D'un point de vue purement géométrique, les éoliennes à axe vertical réclament une plus grande quantité de matière que celles à axe horizontal (Fig. 130). Si l'on prend l'exemple d'une éolienne à axe vertical, de section carrée en élévation et disposant de trois pales, elle suppose une longueur totale de pale supérieure de 77% à sa cousine à axe horizontale et sans prendre en compte les bras.

Rendement surfacique potentielle

Smil évoque les études menées (Dabiri, 2011) autour d'un champ d'éolienne de type *Windspire* (de 10m de haut et de 1,2m de diamètre) [2]. Les flux moyens constatés sur une période de trois mois étaient compris entre 6 et 30 watts par m², soit des résultats plus intéressants que les fermes de turbines à axe horizontal. Notons aussi que la hauteur est bien plus faible et que la quantité de matière nécessaire à la production de ce flux devait donc aussi être normalement plus réduite.

La tour Wind-it avec son exostructure exploite cette architecture éolienne

Cette invention d'une nouvelle architecture pour l'éolien à axe vertical fait l'objet d'un chapitre dédié en troisième partie de ce mémoire (chapitre #26). N'hésitez pas à vous y rendre pour continuer les investigations énergie-matière-architecture sur la question spécifique de l'éolien. Les chiffres dessous résumant quelques valeurs énergie-matière à comparer à d'autres architectures :

1 kilo	1,2W de capacité
1 kilo	11kWh élec. produits sur la durée de vie
Durée de vie	30 ans (estimation)
Facteur de charge	25%

Fig. 130. Un bestiaire des différentes architectures de récolte énergétique du vent Des éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Affiche du second semestre de 2050, sous le soleil exactement.

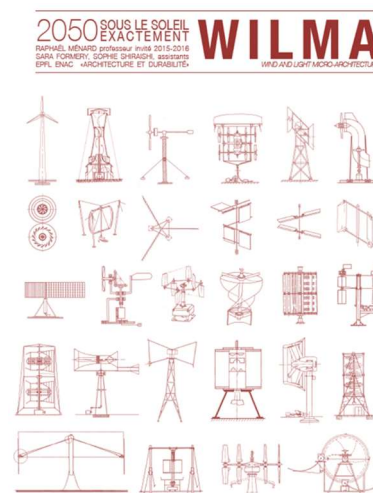
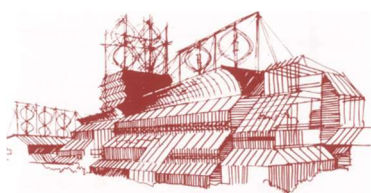


Fig. 131. L'une des maquettes des quatre rendus de *Wilma*, second semestre de l'atelier de master à l'EPFL, « 2050, sous le soleil exactement ». Recherches autour de l'intégration de l'éolien dans l'architecture. Projet à Matro de séchoir pour plantes médicinales. Prix de la durabilité. Éolienne de type Darrieus.



Fig. 132. Comment articuler l'opacité aérodynamique de l'architecture avec des machines capables de récupérer l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement ? Les recherches autour de l'urbanisme de l'autonomie énergétique, en intégrant l'éolien en complément des énergies solaires, Georges Alexandroff, source [11]



Wilma

Ces recherches tant opérationnelles que théoriques sur l'éolien ont aussi donné lieu à des expérimentations pédagogiques. Pour le semestre de printemps 2016, je demandais à mes étudiants en master d'architecture à l'EPFL (avec Sara Formery et Sophie Shiraishi) de concevoir une microarchitecture des montagnes, uniquement alimentée par le vent [12]. C'est l'histoire du projet *Wilma*. Les quatre groupes d'étudiants avaient exploré des architectures absolument magnifiques, fabriqué des maquettes fonctionnelles (Fig. 132). L'idée était d'investiguer le vocabulaire formelle et constructif (dans un contexte de rareté des ressources locales de matériaux) de moulins à vent contemporains. D'autres problématiques enfin et des idées relatives à la gestion de l'intermittence de production de la ressource éolienne : les hypothèses de mobiliers urbains pour Lyon Part-Dieu, l'addition d'éolienne sur les châteaux d'énergie et autres Démon de Maxwell...

Type de production énergétique : synthèse pour les éoliennes

Energie mécanique	100% d'exergie
Rendement maximum inférieur à limite de Betz	59%
Rendement typique des éoliennes lentes	10-20%
Rendement typique des éoliennes rapides	25-50%

Les courants d'air

Aérodynamique des édifices

En traitant la question des courants, et dans cette partie ceux relatifs à l'air, je me suis interrogé quant à la pertinence d'inclure les questions relatives à l'aérodynamique des constructions, à leur rapport à l'air, à la ventilation naturelle ou à la protection vis-à-vis d'une exposition néfaste aux vents dominants. La bonne gestion des courants d'air dans une architecture est-elle à sa façon une énergie renouvelable ? Je prends ici le pari de répondre par l'affirmative, en le justifiant notamment par les efforts de certaines constructions contemporaines à limiter leur recours à la ventilation mécanique, climat mécanique théorisé du *well tempered environment* de Reyner Banham [13], et limiter ainsi leur consommation d'énergie. Cette non-consommation s'apparente à une énergie renouvelable, au même titre qu'une fenêtre bien positionnée qui renforcerait le bioclimatisme d'une architecture. Par la finesse de leur conception, par l'élégance de leur forme, ces édifices se comportent comme des machines naturelles, gérant à la perfection leurs courants intérieurs [14].

Un exemple : la rénovation de la tour Montparnasse

En 2017, Elioth était intégré à l'équipe d'architectes de la Nouvelle AOM pour la compétition internationale de la rénovation de la tour Montparnasse à Paris. En septembre 2017, notre équipe était désignée lauréate et le jury nous confirma que l'attention dévolue aux questions environnementales avait été un critère très important. Chez Elioth, nous devons notamment beaucoup insister et inspiré le rapport singulier que cette tour devait entretenir avec le vent. Sur le fût de la tour, la façade « éolienne » que nous avons imaginée permet de faire du vent un allié. Grâce à l'utilisation de sa géométrie et à son alignement parfait avec les vents dominants du Grand Paris et de sa région, et parce que nous avons bien voulu considérer ce gisement éolien comme un potentiel (un *aeolicus genius loci*), nous précisions que la tour sera autonome 70% de son temps d'utilisation et qu'elle n'aura recours à aucun système actif, à la manière d'un planeur. Pour aller un peu plus loin dans la technicité de la façade, à la fois sophistiquée et d'une grande simplicité, la subtile modénature architecturale en damier génère une trame régulière de petits gradients de pression, exploités ensuite par une peau révolutionnaire, capable de transmettre la ressource en air de façon adaptée et confortable pour les occupants pour la grande majorité des situations climatiques. Puisque la vitesse du vent augmente avec l'altitude, le « grain de la peau » de notre tour relief diminue en hauteur pour s'adapter et produire un gradient de pression constant, quel que soit l'étage.

Vertus et inconvénients

La tour Montparnasse fournit un exemple intéressant d'une forme architecturale qui pourrait être aussi décrite comme un « moteur à courants d'air ». Le rapport entre la forme architecturale et le flux d'air est fécond dans sa capacité à générer des situations de pression et de dépression sur le pourtour de l'interface entre l'extérieur et l'intérieur (Fig. 134). Ces gradients potentiels peuvent être alors utilisés pour engendrer des courants d'air internes, favorable au confort hygrothermique, à la volupté d'une brise ou encore au sain renouvellement de l'air intérieur [15]. Toutefois, cette vertu a son revers et le vent peut aussi rendre fou ou tout au moins se transformer en facteur aggravant de l'inconfort en situation hivernale et participer aussi à l'augmentation des besoins thermiques. Dans cette situation, la forme architecturale peut à aider à minimiser ses effets, en réduisant par exemple les pressions caractéristiques d'exposition de son enveloppe, comme l'igloo dans le blizzard du froid polaire.

Aérologie des villes et des quartiers

La forme architecturale a également un impact en négatif, non pas sur la bonne gestion de son climat intérieur mais sur l'effet convexe sur l'aérologie du site au sein duquel il s'implante [14]. La morphologie crée un sillage impactant les courants d'air dans les espaces extérieurs et peut par exemple concourir à réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain, ou dans le cas de plantation, permettre de protéger les cultures.

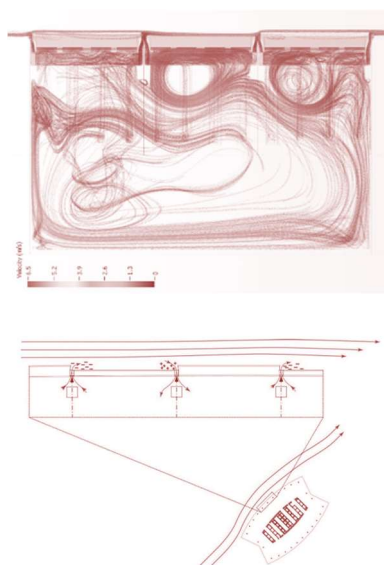
Fig. 133. L'architecte Alexander Pike et la maquette de son projet de maison autonome, surmontée d'une éolienne de type Darriens en 1973 [11]



Fig. 134. La rénovation de la tour Montparnasse (image, nouvelle AOM)



Fig. 135. Une modénature architecturale pour chasser les courants d'air, créer des gradients réguliers de pression – dépression afin de favoriser la ventilation naturelle dans des locaux mono-orientés. Extrait d'une simulation aérodynamique préliminaire sur un local d'environ 15m de longueur et 7m de profondeur (source, Elioth)



Ce point de vue « retourné » gouvernait aussi nos intentions pour le projet de rénovation de la tour Montparnasse. L'autre élément qui permet d'améliorer la pratique de l'espace public en modifiant à la marge la morphologie de la tour est le creusement de grands patios arborés aux quatre angles de la tour. Ancrant plus profondément la tour dans le sol parisien, ils diminuent l'effet *down wash* du vent sur la dalle et participent à l'orientation du piéton entre la rue de Rennes et la future gare. La tour éolienne, cette tour « Éole-Montparnasse », est une tour qui prend soin de nous, à l'intérieur, mais aussi à ses abords. Le projet nous permet d'imaginer le redéploiement d'usages attractifs qui vont complètement radicalement changer la perception du quartier.

Du tirage thermique

Enfin, ultime atout de l'architecture comme machine à courants d'air, parvenir à en créer sans vent. Outre-manche, le bâtiment des parlementaires « Portcullis » construit en 1992, à côté de Big Ben à Londres développe une morphologie de la ventilation naturelle et du tirage thermique, avec la force architectonique exubérante de ces cheminées par l'architecte Bill Dunster de chez Michael Hopkins & Partners, qui récidivera plus tard avec les cheminées baroques du quartier BedZed, icône de l'écoquartier des années 2000. Plus récemment, au Japon, le Naoshima Hall par Sambuichi a développé une architecture splendide du tirage thermique. Chez Elioth, ces questions ont été exploré pour le projet du lycée Gallieni à Toulouse avec Vasconi ou encore les bureaux N2 Office à Bordeaux avec l'agence Nicolas Michelin et associés.

Fig. 136. *Roue hydraulique syrienne de 64 pieds sur la rivière Orontes qui permettait d'assurer la livraison d'eau dans les maisons et jardins de Hama. D'après Rudolfsky [16].*



Courants d'eau

En quelques mots

Seconde partie de ce chapitre dédié aux « courants solaires », elle présentera de façon rapide un courant pourtant l'essentiel. Vue de la géographie, les océans et mers couvrent 71% de la surface du globe ; lacs, fleuves et rivières sont extrêmement structurants sur nos continents. Les courants d'eau sont primordiaux aussi car ils constituent encore aujourd'hui encore la première production électrique renouvelable à l'échelle mondiale avec les grands barrages hydrauliques.

Les énergies marines

Dérivées de l'énergie solaire

Dans *Energie, effet de serre et changement climatique*, Valérie Masson-Delmotte, Hervé Le Treut et Didier Paillard estiment que le flux de puissance des océans est de 67,5TW, soit le quadruple de la demande énergétique de l'humanité. Rien que sur les côtes, ce potentiel serait de 2TW [3], soit 200W par personne pour une humanité qui aurait atteint les neuf milliards d'individus. À l'échelle nationale, la France jouit d'une situation exceptionnelle tant par le linéaire et la diversité de ses côtes, que la part l'importance de son territoire maritime. Ce potentiel est assurément sous-exploité et ce constat fait l'objet d'une recommandation d'actions dans la deuxième partie, autour des programmes pour le temps VII (chapitre #21).

Energie de la lune

Flux qui n'est pas d'origine solaire, le potentiel des marées est évalué à 3,5TW, soit le cinquante-millième du gisement solaire [3]. L'énergie marémotrice est liée au travail des forces de gravité issues de l'interaction entre la Terre et la Lune, en déformant de façon périodique les volumes d'eau océaniques. L'usine marémotrice de la Rance, à quelques encablures de Saint-Malo exploitent cet effet depuis 1966, avec une capacité installée de 240MW (Fig. 137). Une équipe de recherche dans le cadre de *Ignis Mutat Res* avait d'ailleurs jeté leur dévolu sur une étude spécifique sur ce thème¹.

Fig. 137. Usine marémotrice de la Rance



Le petit hydraulique terrestre

La qualité énergétique du mouvement

Avant notre future conquête des océans et de leurs côtes comme grands territoires de récolte énergétique (voire de matières renouvelables), l'humanité a d'abord appris à domestiquer l'énergie de l'eau des continents. Vaclav Smil date l'invention des premières roues hydrauliques quelques deux millénaires avant notre ère, un ou deux millénaires après l'invention proprement dite de la roue [2]. À l'époque, la qualité énergétique du travail mécanique est exclusivement fournie par la force animale et humaine. Et

¹ Marie-Pascale Corcuff. *L'énergie marémotrice dans le paysage*.

ces derniers ne font d'ailleurs que convertir l'énergie solaire qu'ils ingurgitent en force mécanique (et avec un faible rendement d'ailleurs). Singh [4] rappelle : « on attribue au général byzantin Bélisaire l'invention du premier moulin à eau flottant. Les Grecs et les Romains commencèrent, eux aussi, à utiliser la force hydraulique, ainsi qu'en témoignent les textes d'historiens grecs du 1^{er} siècle av. JC qui décrivent comment les roues hydrauliques étaient utilisées pour moudre le maïs. »

L'hydraulique au fil de l'eau

Le petit hydraulique¹ est également une énergie de flux, dont le gisement est gouverné par une loi analogue à celle de l'éolien. La différence principale réside dans la masse volume de l'eau lorsque comparée à celle de l'air. Elle est environ 800 fois plus élevée, la densité de l'air étant de l'ordre de 1,2kg par mètre-cube, tandis que pour l'eau est de 1000 kilos [7]. Les machines hydrauliques fonctionnent avec des vitesses de flux plus modérées, et avec des surfaces exposées aux courants plus réduites (Fig. 138).

Flux de puissance

à 1 km/h	11 W/m ²
à 2 km/h	90 W/m ²
à 3 km/h	290 W/m ²
à 4 km/h	690 W/m ²
à 5 km/h	1300 W/m ²

Fig. 138. Densité de puissance d'un courant d'eau selon la vitesse moyenne du courant. À 5km/h, un cours d'eau présente un flux de puissance au maximum atteignable par le flux solaire, à peine plus de 1000W par m².

De fait, une vitesse dix fois plus faible correspondra à la même densité de puissance qu'un courant d'air. Historiquement, Mathieu Arnoux dans *Mille ans de lutte par-dessus les moulins* insiste sur le rôle de cette production énergétique :

« Des études récentes ont montré que l'énergie hydraulique avait joué un rôle essentiel dans la première industrialisation en France ou aux États-Unis, en particulier via la mise au point de la turbine hydraulique.² [...] La machinerie hydraulique, simple dans son principe, connut des progrès constants, qui en renforçaient l'efficacité. D'après les archéologues, dans une bonne partie de l'Europe, la fin du 10^{ème} siècle est marqué par la généralisation des moulins à roue verticale et par une augmentation significative des dimensions des roues hydrauliques et des meules, signes d'une croissance du rendement énergétique des moulins. [...] Ainsi s'expliquent l'apparition et la diffusion, à partir du milieu du siècle suivant, de moulins à tan et à foulon, utilisés pour le traitement du cuir et des tissus de laine. La roue hydraulique cesse alors d'être utilisée seulement pour faire tourner les meules, et des dispositifs à came ou à bielle permettent de transformer le mouvement rotatif en mouvement alternatif : elle devient un dispositif

¹ Situation d'opportunité mais gisement en général faible du fait de la canalisation des rivières et fleuves urbains. Le gisement de la Seine à Paris est par exemple extrêmement faible du fait d'un courant très mesuré.

² Mathieu Arnoux, *Mille ans de lutte par-dessus les moulins*. Mathieu Arnoux, Le Temps des laboureurs. Travail, ordre social et croissance en Europe, Xe-XIV^e siècle, Paris, Albin Michel, 2012.

Fig. 140. *Vittorio Zonca, Novo Teatro di Machine et Edificii, 1607*

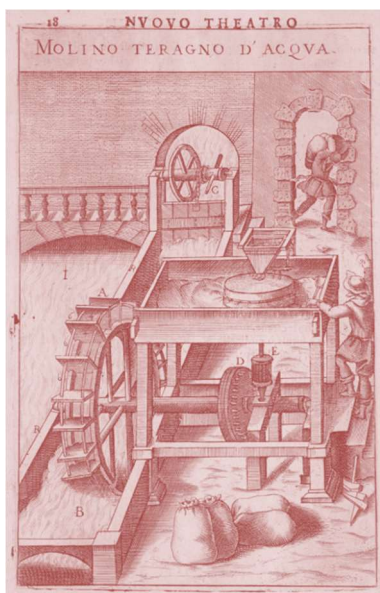


Fig. 139. *John Constable, Parham's Mill, Gillingham, Dorset.*



de récupération de l'énergie hydraulique susceptible de multiples usages. [...] Des forges équipées de marteaux hydrauliques apparaissent au 12^{ème} siècle, autorisant les forgerons à traiter des pièces de fer de grandes dimensions, celles qui, au siècle suivant, assurent la bonne tenue des édifices gothiques. Vers 1200, des roues hydrauliques sont adaptées aux soufflets des fourneaux métallurgiques, favorisant des progrès considérables, d'abord dans la production de l'argent et des métaux non ferreux puis, après 1250, dans la production du fer. »

Une architecture très diffusée

Quelques siècles plus tard, Constable prend pour sujet de peinture ce moulin à eau (Fig. 139). En effet, tout comme leurs cousins à vent, les moulins à eau sont des architectures très répandues au 18^{ème} et jusqu'à la seconde moitié du 19^{ème} siècle. Des architectures plus sophistiquées seront plus tardivement développées comme la machine de Marly (Fig. 143) qui sera analysée sous l'angle énergie-matière dans un prochain chapitre, au moment du temps III (#9).

« En Angleterre, en 1086, le *Doomsday Book*, un registre de propriétaires terriens anglais et de leurs propriétés, recense 5624 moulins dont la plupart probablement de ce modèle, bien qu'il soit fort possible qu'à cette date, la roue à aubes montée verticalement se soit déjà imposées, parce que mieux adapté aux reliefs doux de l'Angleterre. Son utilisation s'étendait du foulage du textile, aux scieries, à la minoterie, au pompage de l'eau, au broyage des graines végétales pour la fabrication de l'huile, et au fonctionnement de machines rudimentaires comme les soufflets. » [4]

Barrages hydrauliques

Flux captables

« Les barrages existent probablement depuis la préhistoire, notamment en Égypte (réserve d'eau potable, d'irrigation, viviers, piscicultures). Un barrage d'une longueur de 115 mètres fut construit dans la vallée de Garavi en Égypte vers 3000 av. J.-C. Et selon N. Schnitter-Reinhardt, le plus ancien barrage poids connu est situé près de Java, en Jordanie, vers la fin du 4^{ème} millénaire av. J.-C. Hérodote cite un barrage construit par le pharaon Ménès, fondateur de la première dynastie, à Kosbeish, pour alimenter la ville de Memphis. »

Dernière étape de ce parcours autour des courants d'eau et des flux solaires secondaires : les barrages hydrauliques et les tours (et montagnes) solaires. Tous deux exploitent le travail des forces de gravité. Les tours et cheminées solaires feront l'objet d'un chapitre dédié dans la troisième partie, autour des montagnes solaires (#25).

Tours et montagnes solaires, des « barrages à air »

Les cheminées solaires (ou leur variante les montagnes solaires, Fig. 141) fonctionnent de la même manière que les barrages hydrauliques, mais à l'envers et avec de l'air. Le volume d'air compris sous la serre en partie basse s'échauffe, l'air est alors plus léger et la cheminée génère le tirage thermique. De façon semblable à un grand barrage, le productible annuel est alors gouvernée par le produit $\varphi.A.H$ où φ est l'irradiation solaire horizontale annuelle (la même chose que la pluviométrie dans le cas précédent), A , la surface de la serre ou du collecteur solaire (l'équivalent du bassin versant hydraulique) et H , la hauteur de « chute » de l'air plus léger. Les tours ou montagnes solaires réalisent ainsi une concentration locale de la convection naturelle, bien connue le long de nos reliefs avec les ascendances thermiques.

les grands barrages

Le grand hydraulique optimise la conjugaison d'un bassin hydraulique¹ en altitude et d'une conduite forcée permettant de faire travailler les forces de gravité qui s'appliquent à des masses liquides considérables et ce, sur une grande hauteur (et selon l'équivalence énergétique mgh)². En termes de flux, le grand hydraulique réclame une très grande surface de captation pour le bassin supérieur. Pour une hauteur de chute de 500m (h) et pour des précipitations annuelles de l'ordre de 1000mm par an sur le bassin de captation, le flux³ est alors de moins de 0,01W par m² en plan masse : moins que le dix-millième du flux solaire moyen ! Il faut ainsi un bassin versant gigantesque pour parvenir à un flux énergétique tangible. Sur les mêmes hypothèses que précédemment, un bassin versant de 100 km² générerait potentiellement⁴ de l'ordre de 500kW. Le grand hydraulique (Fig. 142) correspond aux plus grandes capacités électriques installées au monde.

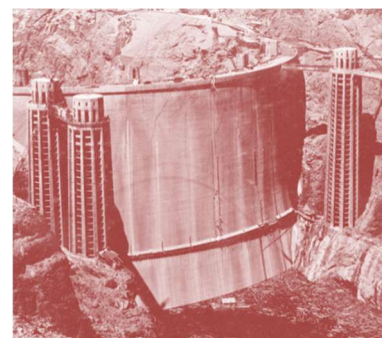
Rappel : les eaux captées en toiture ne sont d'aucun secours énergétique.

Ce point fait d'ailleurs écho à des échanges fréquents avec les étudiants en architecture : est-ce intéressant de valoriser énergétiquement l'eau de pluie récupérée en toiture ? La réponse est évidemment non. A Paris, les précipitations annuelles sont d'environ 700mm par an. Pour un bâtiment de cinq étages par exemple, chaque mètre-carré de toiture reçoit annuellement 700 kilos d'eau. Selon la formule citée précédemment, et pour une hauteur de chute de 15 mètres, l'énergie potentielle de pesanteur est de 103kJ par unité de surface de toiture ; répartie sur les cinq niveaux, ce ne sont plus que 20kJ/m² disponible annuellement, soit à peine 6Wh/m² et par an, le dix-millième des besoins énergétiques d'un bâtiment déjà sobre !

Fig. 141. Les montagnes solaires, des barrages à air (source, Elioth)



Fig. 142. Le Hoover Dam



¹ La récupération des précipitations.

² La masse (exprimée en kilo), multipliée par la constante de gravitation terrestre ($g=9,81m/s^2$) et la hauteur (exprimée en mètre)

³ $1m/an.m^2 * 1000kg/m^3 * 9,81m/s^2 * 500m \sim 4,9MJ$ par m² et par an $\sim 0,006W/m^2$

⁴ Mais il y a encore les pertes de la turbine et des conversions électriques à prendre en considération.

Matières nécessaires

Le flux généré par un barrage est directement associé à :

$$\text{Eq 2.} \quad f = -\eta\rho g Q h \quad [\text{W}]$$

Avec encore une fois, la convention d'une production comme un flux négatif « donné » à l'extérieur du système. Smil [2] rappelle les capacités incroyables installées dans le monde : le barrage des Trois Gorges, livré en 2009 en Chine, totalisant 22,5GW de capacité. Son taux de charge de 50% est cependant inférieur au 80% du barrage d'Itaipu au Brésil, disposant de 14GW. Comme le rappelle Smil [2], les plus grands barrages conjuguent à la fois des débits importants et des hauteurs de chute élevées. Les barrages les plus hauts présentent des murs hauts de 300 mètres (Nurek au Tadjikistan). Évidemment résister à la pression hydrostatique sur une hauteur aussi importante (et sur une portée colossale en plan également) a également un coût « matière » absolument gigantesque. Les barrages peuvent être alors de plusieurs types : en remblai et utiliser par exemple de la terre compacte ; ou des barrages en maçonnerie ou en béton. Cela mériterait une étude dédiée. Smil [2] rappelle aussi l'incidence des barrages sur l'environnement et notamment via les réservoirs en amont qui peuvent être créés : le plus grand étant le lac Volta, engendré par le barrage Akosombo au Ghana qui couvre 8502 km².

L'exemple du barrage KA-5

Long de 2 123 m, le barrage KA-5 est un ouvrage en enrochement de 47 mètres de hauteur qui ferme le bras Ouest de la rivière Caniapiscau, pour former le réservoir du même nom dans le nord du Québec. Il est formé d'un noyau de moraine, de plusieurs filtres en pierre tamisée, le tout étant recouvert d'une couche de blocs d'un mètre. Son volume est 5 620 000 m³. La capacité installée est 463MW. En comparant le flux énergétique potentiel (f_e) au stock construit (S_m), le rapport s'établit à 0,04 watts par kilo¹. Avec l'hypothèse d'un facteur de charge de 70%, d'une durée de vie de 70 ans, chaque kilo de matière construite sera susceptible de générer 16kWh électriques au cours de la vie de l'ouvrage.

¹ Avec l'hypothèse d'une densité moyenne de 2,2

Nous retenons donc en synthèse énergie-matière de cette architecture les échelles suivantes :

1 kilo	0,04W de capacité
1 kilo	16kWh produits sur la durée de vie ¹
Hypothèse de durée de vie	70 ans
Facteur de charge estimée	70%

*

Fig. 143. *La Machine de Marly*



¹ Pour comparaison : 1 kilo de pétrole ~ 10kWh d'énergie thermique

Bibliographie

1. RODDIER François, *Thermodynamique de l'évolution, un essai de thermo-bio-sociologie*, Parole Éditions, 2012
2. SMIL Vaclav, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015
3. MASSON-DELMOTTE Valérie, LE TREUT Hervé, PAILLARD Didier, *Energie, effet de serre et changement climatique dans L'énergie à découvrir*, sous la direction de Rémy Mosseri et Catherine Jeandel. CNRS Éditions, 2013
4. SINGH Madanjeet, *L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature*, Unesco France Loisirs, 1998
5. BONNEUIL Christophe, FRESSOZ Jean-Baptiste, *L'Événement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Seuil, 2013
6. GIPE Paul, *Le grand livre de l'Éolien*. Éditions du Moniteur, 2007
7. MAC KAY David J.C., *L'Énergie durable, pas que du vent*, Oxford, De Boeck, 2012. Titre original: *Sustainable Energy - Without the hot air*. Cambridge, UIT Cambridge, 2009
8. BIHOUIX Philippe, *L'âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable* Seuil, Anthropocène, 2014
9. ADEME, *Impacts environnementaux de l'éolien français*, 2015
10. ROBIN Marie-Monique, *Qu'est-ce qu'on attend ?* documentaire, 2016
11. LOPEZ Fanny. *Le Rêve d'une déconnexion. De la maison à la cité auto-énergétique*, La Villette, 2014
12. MENARD R. et al., *Les infrastructures solaires urbaines, 2050, sous le soleil exactement*. Cours donnés dans le cadre de l'atelier de master. Synthèse des quatre projets rendus par les équipes d'étudiants et dix fascicules des cours associés à l'atelier autour des questions de futurs, de formes et d'énergie. EPFL, décembre 2015.
13. BANHAM Reyner, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, Marseille, Parenthèses, 2011 [1969].
14. KRAUTHEIM, Mareike, PASEL Ralf, PFEIFFER Sven, SCHULTZ-GRANBERG Joachim. *City and Wind Climate as an Architectural Instrument*. Berlin: Dom, 2014
15. DEKAY Mark, BROWN G. Z., *Sun, Wind, and Light: Architectural Design Strategies*. John Wiley & Sons, 2014
16. RUDOLFSKY Bernard, *Architecture Without Architects: A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture*, University of New Mexico Press, 1987. 128 p.

Compléments bibliographiques

- GOURIERES Désiré Le, *Les éoliennes théories, conception et calcul pratique*. Goudelin, France : Éditions du Moulin Cadiou, 2008
- HILLS Richard L., *Power from wind, a history of windmill technology*. Axel Menges, 2007
- MUSGROVE Peter, *Wind Power*. Cambridge University Press, 2010

-
- MUROTANI Bunji, *Process: Architecture 40, Dialogue With Nature* Susumu Shingu. 1983
 - REYNOLDS John, *Windmills & watermills*. State Mutual Book, 1974.
 - RIVALS Claude. *Le moulin à vent et le meunier dans la société traditionnelle française*. Éditions Serg, 1976

#8

Chasser les courants

Version provisoire
Ne pas diffuser

#9 L'âge d'or de l'architecture renouvelable (temps III)

L'humanité grandit, animée à 100% par les énergies renouvelables. Des architectures de matières biosourcées ou de minéraux locaux. L'accélération du savoir, le développement des sciences et techniques, avant l'allumette des énergies fossiles.

Quelques jalons :

- 2000 *Naissance des roues hydrauliques*
- 1400 *Premières arches connues en brique*
- 1200 *Début de l'âge du fer*
- 100 *Premières fenêtres en verre*
- 50 *Premier ciment avec liant hydraulique*
- 800 *Premières éoliennes*
- 1450 *Naissance de l'imprimerie*

Énergies nouvelles :

- Moulins à vent*
- Moulins à eau*
- Charbon de bois*

Matières nouvelles :

- Fer*
- Verre*
- Colles*

Cas d'études :

- Chaumière normande*
 - La machine de Marly*
-

L'inflation du savoir et des connaissances

Presque cinq mille ans en accéléré

Le balisage dans la fresque historique

J'ai une affection particulière pour le talent de conteur d'Ernst Gombrich, et notamment pour sa très populaire histoire de l'art. Un ouvrage moins connu *Une brève histoire du monde* (1998) est un condensé en trois cents pages de l'histoire de l'humanité [1] (Fig. 144). Les ouvrages de Gombrich sont précieux, ils sont des résumés vivants et pédagogiques créant des balisages du temps, des cartes de l'histoire, des coupes chronologiques. Ils apprennent à s'orienter dans le temps. Le projet d'architecture, d'urbanisme ou de paysage devrait proposer des récits analogues de leur enracinement temporel.

Un âge renouvelable jusqu'à près d'un milliard de personne

Ce goût pour le temps et l'histoire est ancien. Mon mémoire de diplômé d'architecture s'intitulait *Le classement, mode d'emploi*, clin d'œil à Perec. Dans ce texte [2], je m'intéressais à l'histoire des classifications bibliographiques, en prélude à un projet de bibliothèque universitaire pour le campus de Jussieu. Cette recherche me conduisit à parcourir l'histoire des organisations du savoir et au cours de cette exploration, je pris conscience de l'accélération immense induite par l'invention de l'écriture d'abord sur les tablettes sumériennes, puis quelques millénaires plus tard, l'accumulation des savoirs engendrés par la révolution de l'imprimerie. Cette inflation des connaissances réclama d'urgentes typologies d'organisation du savoir, des architectures topologiques permettant de cartographier le maillage des connaissances, un « plan » pour se repérer dans la mémoire déposée. Le chapitre précédent, le temps II (#7), s'achevait avec l'apparition de l'écriture sur des tablettes d'argile, en Mésopotamie au 4^{ème} millénaire avant notre ère (Fig. 145).

« On pourrait caractériser les supports du savoir selon les dimensions de leur diffusion dans l'espace et dans le futur. La dimension de diffusion de la parole est ponctuelle : l'information orale se transmet de manière locale dans l'espace ; son étalement spatial et temporel se perpétue uniquement par la redite. L'écriture ouvre la voie à une dimension de diffusion linéaire : l'information se dépose sur un support physique. Le texte écrit est situé spatialement et se déploie sur la demi-droite du temps. La copie crée son étalement spatial (et temporel dans une moindre mesure puisque le support se dégrade). De ce point de vue, l'invention de l'imprimerie a permis un étalement accru : le savoir se démultiplie grâce à un faisceau de droite située en plusieurs points géographiques. Enfin la stratégie de diffusion de l'objet numérique est volumique dans la mesure où un document placé en réseau est instantanément virtuellement reproduit à tous les endroits et à tout moment. L'objet numérique semble toutefois perdre en « espérance de vie » ce qu'il gagne en étalement géographique (§150) »

Dans cette recherche, je réalisai la relation très étroite qu'entretenait le « substrat-matière » et l'« information-savoir ». À sa façon, ce mémoire

Fig. 144. Couverture de l'édition française du livre de Ernst Gombrich, *Brève histoire du monde*

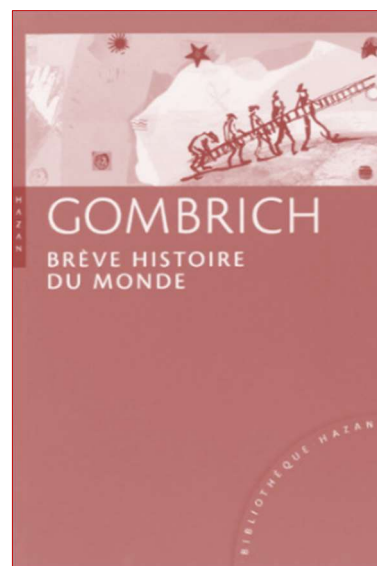


Fig. 145. Une tablette d'argile en Mésopotamie



poursuit cette hypothèse d'une correspondance initiée dans *Le classement mode d'emploi*, [2] mais transposée dans une « relation à trois », et les évolutions induites et réciproques entre l'énergie, la matière et l'architecture (#3).

Un temps III de près de 5000 ans

Ce chapitre est un défi impossible, une ineptie historique : tenter de résumer l'articulation énergie-matière-architecture sur plus de cinq mille ans. Le temps II était une révolution de l'énergie (#7), l'épisode de l'apparition du feu, du bouleversement engendré par la maîtrise d'une nouvelle forme d'énergie, la combustion de la biomasse. Au cours du temps III, les formes énergétiques évoluent peu et l'humanité continue de vivre essentiellement de la combustion de la biomasse quoi que cette époque voie naître les usages énergétiques des courants d'air et d'eau, comme évoqué au chapitre précédent (#8). Le temps III sera davantage une époque de la matière et du savoir. La singularité de cette période est aussi sa relative stabilité sur près de cinq mille ans : elle serait une sorte de « régime permanent » au sens physique du terme, un âge agricole durable, un monde essentiellement régit par une économie de flux.

Durant cette période, la population mondiale croît de quelques dizaines de millions d'humains (cinq mille ans avant notre ère), jusqu'à un petit milliard à l'orée de la révolution industrielle. La révolution copernicienne, puis l'édifice culturel et éclectique de la Renaissance (Fig. 146), l'âge classique et les Lumières (et tant d'autres choses ailleurs qu'en Europe) ont eu lieu sans les énergies fossiles, sans non plus puiser dans des stocks de matières non renouvelables. Un immense chapitre de l'histoire des hommes s'est déroulé en étant 100% renouvelable tant du point de vue de l'énergie, que de la matière. N'est-ce pas remarquable, et à retenir pour croire et espérer en un futur positif et désirable, à un avenir où le mot décroissance ou plutôt post-croissance ne soit pas associé à déclin et récession (chapitres #18 et #21) ?

Une sorte d'utopie d'un temps III qui aurait perduré...

Il serait inspirant d'imaginer un monde post-1750 qui n'aurait découvert ni le charbon, ni les autres énergies fossiles. On se figurerait une myriade de scénarios pour expliquer cette non-découverte. À quoi auraient ressemblé alors les futurs du monde ? Quel serait notre environnement construit et la vie des hommes sans le *boost* des énergies fossiles ? Ces hypothèses uchroniques font penser à l'imaginaire décrit dans *Avril et le Monde truqué*, ce film d'animation réalisé par Franck Ekinci et Christian Desmares (2015) dont l'univers graphique a été conçu par le dessinateur Tardi (Fig. 147). Ce film animé d'aventure est un récit rétro-futuriste, un monde resté à l'âge du charbon, où l'humanité n'aurait pas découvert le pétrole. Selon cette trame, les moyens de transport sont mus par le charbon et l'environnement est envahi d'une multitude de machines à vapeur.

Fig. 146. *Les Ambassadeurs par Hans Holbein le jeune (1533)*



Fig. 147. *Extrait de Avril et le Monde truqué*



Une uchronie sans les énergies fossiles

Qu'aurait été le progrès technique sans le charbon, sans le pétrole et sans le gaz ? Qu'aurait été le destin du monde, de l'humanité, de la biosphère, de la lithosphère, de l'atmosphère et donc de l'environnement au sens large ? Quelle histoire de l'environnement John Mac Neill aurait alors narré [3] ? La machine à vapeur aurait certes sans doute existé mais la tension sur la ressource en biomasse aurait assurément canalisé la croissance démographique et l'explosion des besoins énergétiques individuels. Le solaire thermique aurait connu un bel essor du fait de sa simplicité de mise en œuvre et de son temps de retour énergétique plutôt bref (chapitre #11). Le solaire à concentration aurait investi un grand nombre de procédés industriels pour produire de la chaleur à haute température. En revanche, la production de panneaux solaires photovoltaïques et le développement industriel de nos éoliennes contemporaines eurent été plus compliqués techniquement (Fig. 148).

A contrario, dans cette fiction planétaire, sans énergies fossiles, pas de révolution automobile globale, ni de transport aérien de masse et à grande vitesse. Les humains et les choses circulent un peu moins vite. Évidemment, cette uchronie positive aurait supposé un contrôle strict de la ressource en bois et éviter toute coupe excessive dans le stock en se conformant à une production annuelle de bois de l'ordre de quelques unités de tonne par hectare et par an : la permanence du flux réclame la mesure, il faut savoir fait travailler son capital à bon taux et sans entamer sa valeur. Nous serions aujourd'hui aussi sans doute moins nombreux sur notre petit vaisseau terrestre.

Chaudières à bois à Versoix

Cette uchronie n'est d'ailleurs pas très éloignée de celle développée par un groupe d'étudiants dans le cadre du premier semestre de mon atelier à Lausanne intitulé *2050, sous le soleil exactement* [4]. Le projet se déroulait au bord du Léman, à Versoix, et leur scénario 2050 était le suivant : une déplétion beaucoup plus rapide que prévu des énergies fossiles, le retour en force de l'exploitation de la biomasse : le transport ferroviaire s'effectuait alors par des chaudières à bois via une exploitation raisonnée des forêts (Fig. 149). Un wagon d'eau chaude récupérait la chaleur fatale de la locomotive pour l'offrir aux réseaux de chaleur des villes traversées¹.

Pouvoir, énergie et matière

Il faut lire *L'histoire de la ville* de Leonardo Benevolo [5] pour comprendre davantage la patiente structuration des formes urbaines. Pendant ces cinq mille ans, la complexification de l'organisation sociale voit apparaître les états, d'autres types de concentration d'autorité et de pouvoir par le clergé, toutes sortes d'institutions au sein desquelles les richesses « énergie-matière-information » se concentrent et sont stockées. Ces pouvoirs disposent généralement de capacité d'exploitation des flux d'énergie et de ma-

Fig. 148. Une maquette d'étude au cours de l'atelier Wilma d'une éolienne de type Darrieus avec une grande partie de sa structure en bois

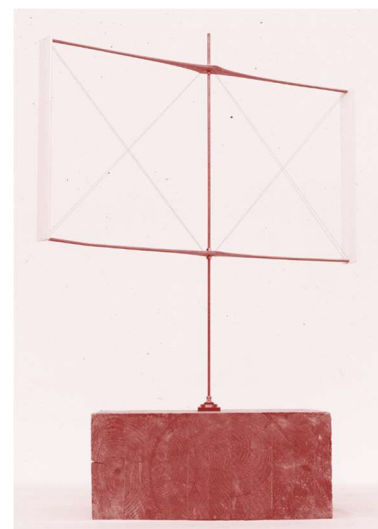
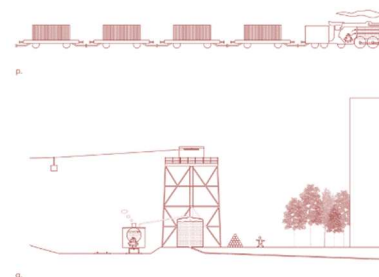


Fig. 149. Extrait du *Silvaduc*, un projet d'étudiants de l'atelier « 2050, sous le soleil exactement ». Le retour à la machine à vapeur et l'utilisation raisonnée de la biomasse pour le fret logistique.



¹ Le récit prospectif complet est accessible ici : https://issuu.com/raphael_menard/docs/112_silvaduc_issuu

Fig. 150. *Flottage du bois par Nicolas de Mirbeck, 1738*

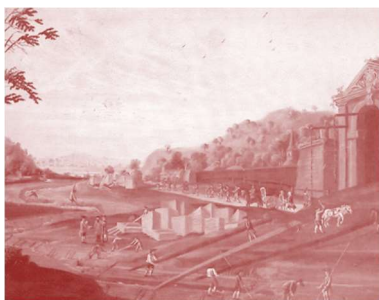


Fig. 151. *Architecture vernaculaire avec toit végétal du nord du Japon, photo tirée du Rudolsky [18]*



tière : chasses, exploitation des domaines forestiers, asservissement du travail de la terre etc. Les sommets de ces organisations captent généralement plus de flux énergie-matière qu'elles n'en retransmettent à leur « bassin versant humain ». La redistribution des richesses est souvent faible, voire inexistante. En échange, le pouvoir fournit un cadre, une structure, une autorité catalysant la production de richesses en protégeant les territoires par l'armée (ou pour en conquérir de nouveaux), organiser l'enseignement et faire évoluer les arts et les techniques, ... Ces institutions accumulent les flux, les lieux de pouvoir et leurs matérialisations architecturales sont finalement les révélateurs d'une dysmétrie métabolique entre la base et le sommet sur les flux d'énergie et de matière. Le pouvoir concentre aussi l'information en possédant une partie importante des savoirs et des arts (bibliothèques, œuvres d'art etc.) [2] (Fig. 87)

Les chefs d'œuvre architecturaux

La puissance de l'organisation sociale amplifie les effets d'échelle, elle accroît les « bassins versants de puissance humaine » permettant édifier des chefs d'œuvre architecturaux. Comme le rappelle Olivier Rey [6], à Florence, au 15^{ème} siècle, la population était d'environ 40 000 habitants. Mille personnes au travail sur un chantier développent une puissance cumulée de l'ordre de 100kW mécanique, soit l'équivalent de la puissance maximale délivrée par un moteur de voiture moyenne ! Correspond-elle à la taille critique, à la dimension du flux d'énergie nécessaire qui autorise l'érection en des temps relativement brefs (de quelques générations au maximum) des splendeurs de l'histoire de l'architecture et des villes ? L'édification des cathédrales, des mosquées, des abbayes, des villes toscanes, de Venise ont supposé l'asservissement de population laborieuse, et ce jusqu'à une certaine échelle¹ [7].

Révolution agricole

Au cours du temps III, l'accroissement démographique mondial est aussi la conséquence de l'amélioration des techniques agricoles. Entre l'an mil et le début du 19^{ème} siècle, la population mondiale triple de taille en passe d'environ 300 millions d'humain à environ un milliard². La révolution agricole du Moyen-Âge est basée sur la charrue lourde, le collier d'épaules et la stabulation, elle sera aussi la première révolution moderne sans jachère³ [9]. Vers la fin de cette période, l'homme apprend à encore mieux optimiser les rendements agricoles et donc la production de biomasse.

¹ Aujourd'hui, Nicolas Gramitz précisait dans son mémoire de HMO (2017) que trois mille cinq cents ouvriers étaient sur place pour finir les travaux du TGI de Paris par Renzo Piano. Ces derniers temps étaient par contre largement aidés par des flux exosomatiques d'énergie : perceuses, charriots élévateurs, scies, engins de chantier...

² Elle triplera pour atteindre trois milliards de terrien en 1950, mais en un temps cinq fois inférieur !

³ Bihouix, p52, citant *Histoire des agricultures du monde*, Jean Mazoyer et Laurence Roudart, Seuil, 1997.

« À la fin du 18^{ème} siècle, l'avancée des connaissances techniques et scientifiques apporte de grands progrès à l'agriculture en France. Les paysans abandonnent la jachère au profit de la rotation des cultures, en particulier des plantes fourragères qui nourrissent les animaux. Le bétail, mieux nourri, fournit aux paysans du fumier pour fertiliser les champs. La production agricole double au cours de cette période. » [10]

Deux chronogrammes fictifs

Chronogramme d'une chaumière du 17^{ème} siècle

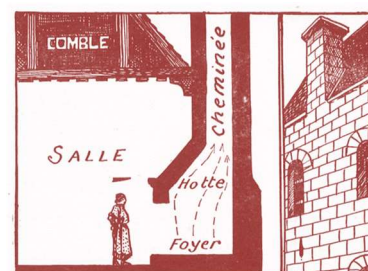
Le feu et la cheminée

Dans cette section, nous tenterons de décrire le métabolisme énergie-matière de quelques archétypes architecturaux, représentatifs du temps III. Le temps II avait conquis le feu (chapitre #7). Le temps III le dompte, en le rendant efficace et en contrôlant sa puissance comme sa température. Dans *Architecture et volupté thermique*, Lisa Heschong [11] positionne l'apparition de la cheminée vers la fin du Moyen Age. Elle rappelle le cumul d'essais et d'échecs pour caractériser les matériaux adaptés à ce nouvel usage de l'énergie du feu :

« C'est vers la fin du Moyen Age, que la notion de cheminée, de conduit favorisant l'évacuation de la fumée, commença à être saisie. Malheureusement, c'est par une suite d'essais et d'erreurs que l'on comprit que la cheminée ne pouvait être bâtie qu'avec l'aide de matériaux résistant à l'épreuve du feu. Lorsque de nombreux incendies eurent ravagés les cités, des lois furent décrétées y interdisant tout emploi du bois dans la construction des cheminées. »¹

À cette période, l'énergie et la matière dessinaient les « conditions aux limites » de l'expression architecturale. Les contraintes de disponibilité en matériaux, celles aussi induites par le feu et la cheminée définissaient un champ des possibles plutôt étroit de la construction. En Europe, l'essentiel de la production bâtie courante était constitué de bois, de torchis et de pisé [10]. La pierre, les constructions massives étaient réservées aux lieux de pouvoir et aux édifices religieux.

Fig. 152. Coupe sur une cheminée (source Histoire du chauffage, 1946)



¹ Lisa Heschong, p29

Fig. 153. Intérieur avec paysans, van Ostade (1661)



Hypothèses pour notre archétype

Pour comprendre cette tension sur la matière, de façon fictive, imaginons une chaumière en Europe de l'Ouest à la fin du 17^{ème} siècle¹. Ce modeste édifice héberge une famille de paysans, composée de six personnes. La surface de cette architecture courante est d'une cinquantaine de mètre-carrés, de plain-pied. Les murs sont constitués en partie basse de pierres maçonnées avec du pisé. Des colombages de bois contreventent le petit édifice. Sa toiture est constituée d'une charpente de bois avec des tuiles en partie haute. Ce sera notre chimère constructive, une architecture modeste (Fig. 153).

Stock matière

Évaluons le stock matière S_m selon la terminologie évoquée dans le chapitre « Les chronogrammes » (#5). Selon les hypothèses précédentes, cet édifice d'une dizaine de mètres de long par environ cinq de large dispose de murs extérieurs dont la surface totale avoisine les 150 mètres carrés. Cette chaumière pèse environ² 60 tonnes, soit un poids moyen rapporté au mètre-carré habitable d'environ 1200 kilos. Nous sommes en 1682 et le petit chantier familial a réclamé des journées de travail assidu.

Stock d'énergie grise

Comment évaluer l'énergie primaire S_e nécessaire à l'édification ? En tentant de quantifier à la fois le contenu énergétique « ingéré » par les artisans, comme l'énergie thermique éventuellement mise en œuvre pour certaines parties de la construction (peut-être pour un peu de liant hydraulique avec de la chaux pour certaines parties maçonnées). Pour apprécier une valeur, estimons un temps de travail cumulé de 1000 journées, soit l'équivalent³ de 3000 kWh d'énergie primaire : cela conduirait alors à une petite centaine de kWh d'énergie primaire par mètre-carré⁴. En fin de vie, une bonne partie des matériaux constitutifs sont réemployés ou réutilisés.

Flux d'énergie

Quantifions l'usage et le flux nécessaire, f_e . Cette maisonnette, située en Normandie, est très faiblement isolée. Elle réclamerait selon nos critères contemporains de confort thermique⁵ bien plus de 1000kWh par mètre-carré et par an, soit un flux moyen de près de 110 watts thermiques par unité de surface, soit presque autant que le gisement solaire disponible.

¹ À regarder sans doute : http://www.persee.fr/doc/annor_0003-4134_1956_num_6_2_6090

² 30 mètres pour le périmètre et les appuis de la bâtisse sur des sections de pierre d'une trentaine de centimètres, soit environ 5 tonnes. 150 mètres-carrés de façade d'une quinzaine de centimètres en moyenne, soit environ 45 tonnes. 70 mètres-carrés de toiture avec un poids moyen de 100kg par m², soit environ 7 tonnes. Enfin, l'âtre maçonné pèse environ 3 tonnes.

³ Et en considérant que les 3kWh dirigées uniquement vers la mise en œuvre

⁴ Doit-on aussi prendre en compte le rendement intrinsèque de l'énergie animale (et donc y compris humaine) ? En toute rigueur, la réponse est positive, et il convient alors de prendre en compte la part alimentaire dans le bilan.

⁵ Et d'attendre des températures intérieures de l'ordre d'une vingtaine de degrés.

Avec une ambition bien moins élevée, en se couvrant fortement¹, en se localisant à proximité de l'âtre, en dormant dans une alcôve calfeutrée, nous estimerons que les besoins thermiques finaux devaient être de l'ordre² de 500kWh par mètre-carré et par an. À l'époque, on se réfugiait à proximité de l'âtre, les lits à baldaquins, le mobilier offrait une isolation dans le clos et couvert.

La « table climatique »³ décrite dans la troisième partie de ce texte revient d'ailleurs sur les nouveaux rapports à établir entre confort et mobilier, entre efficacité énergétique et design (#28) (Fig. 154).

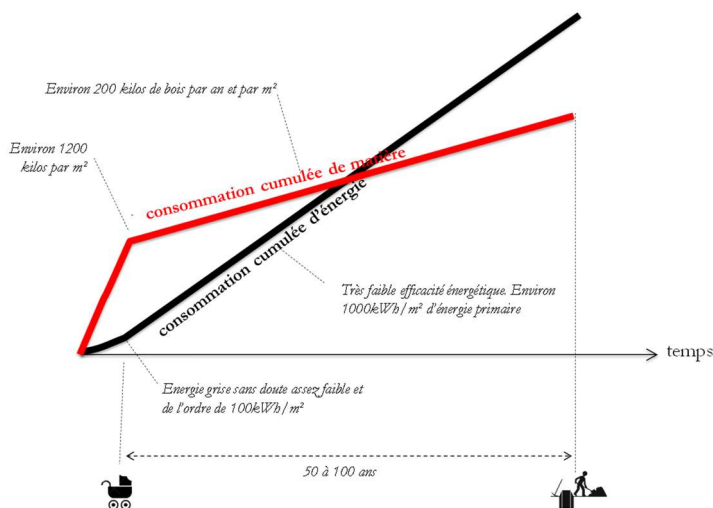
Flux de matière correspondant : 200 kilos par m² et par an de bois

Sur la base des données précédentes, la cheminée de la chaumière devait fournir environ 25 000kWh de chaleur utile, et si l'on estime que le rendement moyen pouvait peut-être atteindre 50%, il s'agissait alors de fournir 50 000kWh de bois par an, soit près de dix tonnes de bois par an (soit en moyenne 30 kilos par jour pour la corvée de bois) et donc pas loin de deux cents kilos par mètre-carré et par an : sans doute plus que le poids de la toiture chaque année ! À l'inverse, une maison contemporaine, très efficace pour ses besoins de chaleur, de type *PassivHaus* par exemple, réclamerait environ 15kWh par mètre-carré et par an et donc une quantité de combustible de l'ordre de l'ordre de trois kilos par mètre-carré et par an. Dans ce cas contemporain, la corvée de bois serait réduite à environ cinquante kilos de bois par an pour une même surface (Fig. 155).

Fig. 154. Croquis de recherche autour du lit à baldaquin, une version contemporaine, bioclimatique et dédiée au confort estival. Recherche en lien avec le mobilier climatique, chapitre #28.



Fig. 155. Bilans énergie-matière, stock et flux d'énergie et de matière d'une chaumière au 17^{ème} siècle comme archétype du temps III. Attention, les deux courbes montrent des dynamiques différentes et des quantités différentes : il ne faut pas conclure par exemple de ce graphique que la consommation cumulée de matière est inférieure à celle de l'énergie sur la totalité de vie de cet exemple.



¹ Avec environ 200 m² d'enveloppe, une isolation moyenne sans doute de l'ordre de 3 à 5W/m².°C et évidemment beaucoup d'infiltrations d'air parasites, l'élasticité thermique de cette petite maison devait alors être bien supérieure à 1kW/°C soit environ 20W/m².°C

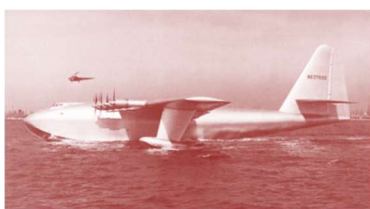
² Soit un flux moyen d'environ 60W/m²

³ Faisant partie programme ZEF, pour Zero Energy Furniture

Fig. 156. À gauche, l'emprise énergétique de la chaumière du 17^{ème} siècle : elle réclame 600 fois sa surface de forêt. À droite, une chaumière contemporaine, type PassivHaus : elle nécessite que 35 fois sa surface (et elle est sans doute bien plus confortable que son lointain aïeul)



Fig. 157. Une hypertrophie moderne : l'échec du Spruce Goose de Howard Hughes dans les années 1940 et le film *Aviator* que Scorsese a consacré (2014).



Emprise énergétique en exploitation

Les dix tonnes de bois par an de la chaumière (soit mille cinq cents kilos pour chacun de ses habitants) réclamaient environ trois hectares de forêts durablement exploitées, surface de récolte nécessaire au feu énergétique de notre maisonnette, soit 600 fois la surface de chauffe. À l'inverse, la chaumière *PassivHaus* contemporaine réclamerait de l'ordre d'un demi-hectare soit environ 35 fois sa surface. (Fig. 156)

Chronogramme de la machine de Marly

Une machine hydraulique hors d'échelle

Après un archétype architecturale courant et modeste, nous nous penchons sur une architecture exceptionnelle, une infrastructure hydraulique exceptionnelle. La machine de Marly est un gigantesque dispositif de pompage des eaux de la Seine construit sous le règne de Louis XIV à Bougival, œuvre du maître charpentier et mécanicien liégeois Rennequin Sualem (Fig. 143). Elle était destinée à alimenter en eau les jardins du château de Marly et le parc de Versailles. Construite entre 1681 et 1682, elle s'inspirait des machines d'exhaure des mines de Liège et du Harz, ce qui en faisait l'une des machines les plus complexes de son temps. Cependant, elle ne parvint jamais longtemps à fournir le débit attendu, mais fonctionna cent trente-trois ans avant d'être remplacée en 1817 par plusieurs pompes successives plus performantes, jusqu'à des électropompes en 1968.

Bilan matière

D'après Philippe Testard-Vaillant¹, la construction mobilisa 1800 ouvriers et nécessita plus de 100 000 tonnes de bois, 17 000 tonnes de fer et 800 tonnes de plomb et autant de fonte. Rapporté à la puissance théorique de cette architecture colossale, il fallait donc plus de deux cents kilos de matière pour délivrer un watt de puissance mécanique. Pour la même masse², trois hommes sont capables de générer trois cents fois plus de puissance. La machine de Marly fut en quelque sorte le *Spruce Goose* de Louis XIV : un objet hors d'échelle, tellement grand et gros que devenu inefficace (Fig. 157).

¹ « Des grands travaux en cascade », *Les Cahiers de Science & Vie*, hors-série Les Sciences au château de Versailles, octobre 2010, p. 70-71

² Ce qui serait à voir plus précisément, l'énergie contenue ou nécessaire pour 100 000 tonnes de bois, 17 000 tonnes de fer et 800 tonnes de plomb et autant de fonte afin d'évaluer *Se*.

Flux de production et durée de vie

La puissance théorique de la machine était de 700 chevaux environ¹ et son débit théorique maximal de 6 000 m³ par jour². L'article évoque une puissance réelle plus faible qui ne cessa de se détériorer (Fig. 158).

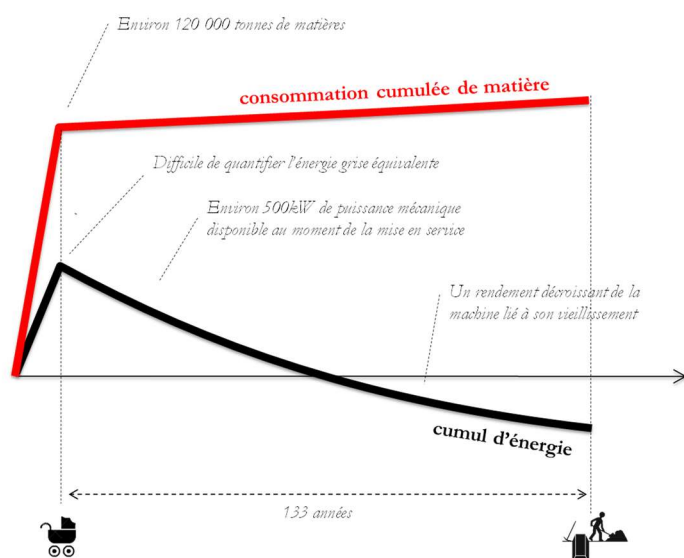


Fig. 158. Le chronogramme de la machine de Marly

1 kilo	0,004W de capacité (valeur au départ)
1 kilo	11kWh produits sur la durée de vie ³
1W	3,6kg par an
Durée de vie	133 ans ⁴
Facteur de charge estimée	25%

¹ Soit un peu de plus de 500kW de puissance mécanique.

² 6 millions de litres.

³ Soit à peu près la même équivalence matière-énergie que pour le pétrole où 1 litre contient environ 11kWh d'énergie thermique. Converti par un moteur thermique, il n'en restera plus qu'environ le tiers, soit 3kWh.

⁴ Nota : connexion avec le rapport poids puissance de l'automobile. En amortissement, cela fait environ 900 tonnes de matière par an et à comparer à un flux moyen de 250kW (en considérant une décroissance linéaire de la production au cours de la vie de la machine). Soit un flux de matière de 3,6kg par an pour 1W de flux d'énergie. Si on applique cette même règle à Wind-it avec 3 turbines (15kW). Si on suppose un taux de fonctionnement de 20%, le flux moyen est alors de 3kW. Pour 12 tonnes et une durée de vie de 20 ans, cela fait 600kg par an. Soit donc 0,2kg par an pour 1W de flux d'énergie.

Des révolutions qui s'annoncent

Tensions sur le bois

Le premier essor du bioclimatisme

Déjà, au premier siècle avant notre ère, la nécessité d'une architecture efficace d'un point énergétique devenait criante pour limiter les ponctions sur le bois. Vitruve rappelait la nécessité d'adapter les maisons et les modes de construction selon la diversité des climats du vaste empire. Au 4^{ème} siècle, les réserves de biomasse étaient ravagées. Nous évoquerons à nouveau ce sujet dans le chapitre consacré au solaire passif et à l'urbanisme solaire (chapitre #15).

L'emprise énergétique du Romain

Smil¹ [12] indique qu'au temps de l'empire romain, la consommation annuelle de bois était de l'ordre de six cents kilos par habitant. Traduit en empreinte spatiale, le bassin versant énergétique d'un Romain était de 2000 mètres-carrés de forêts. Rapportés en flux de puissance, ce flux de matière correspondait à un flux thermique d'environ 350 watts par personne. Cette surface de récolte est à ajouter aux autres dont celle assurant la production alimentaire (de l'individu lui-même comme de ces animaux domestiques). La demande moyenne énergétique devait ainsi être largement supérieure à 500 watts et sans doute bien plus élevées encore chez les riches Romains.

Londres au 14^{ème} siècle

Toujours dans *Power Density* [12], Smil cite Galloway, Keene et Murphy (1996) qui avaient estimé que la consommation de bois à Londres au début du 14^{ème} siècle était de l'ordre de 25GJ par personne et par an, soit un flux moyen près de 800 watts de chaleur. Cette valeur reste bien plus élevée que la demande primaire de nombreux pays dans le monde aujourd'hui. Le Londonien moyen était parti prenant d'une « Société à plus de 1000 watts ». En masse, chaque administré de la grande ville anglaise ingurgitait annuellement près de mille cinq cents kilos de bois par personne (Fig. 159) et traduit en termes d'emprise forestière, c'était près d'un demi-hectare de forêt par habitant, valeur comparable à la fiction de la chaumière de la partie précédente. Traduite en densité spatiale, la demande énergétique de Londres était d'environ 40 watts par m² soit plus du tiers du flux solaire incident sur la capitale anglaise : à l'époque, Londres réclamait déjà un bassin versant énergétique considérable, supposant sans doute une surface de forêts au moins cinq cents fois supérieurs à son emprise cadastrale.

Fig. 159. *Pouvoir calorifique de différents bois. Valeurs calorifiques des essences de bois (données pour du bois sec de deux ans, d'une humidité résiduelle de 15 à 17 %). D'après, Carcano Emmanuel (2008).*

Essence	Valeur calorifique (kWh/kg)	Essence	Valeur calorifique (kWh/kg)
Érable	4,1	Pin	4,4
Bouleau	4,3	Mélèze	4,4
Hêtre	4,0	Peuplier	4,1
Chêne	4,2	Robinier	4,1
Aulne	4,1	Sapin	4,5
Frêne	4,2	Orme	4,1
Épicéa	4,5	Saule	4,1

¹ *Power Density*, p83

Les démesures

Premières tensions sur le bois à l'Antiquité et premières démesures

Quelques temps avant, à Rome, la classe dominante avait le goût du luxe. Cette hypertrophie du niveau de vie de quelques nantis allait de pair avec une démesure des besoins énergétiques. Les maisons des riches Romains, qui disposaient parfois de chauffage central (les hypocaustes, Fig. 160) pouvaient consommer jusqu'à 130 kilos de bois par heure¹[13], soit une puissance équivalente de près de 650kW de chaleur, la demande de pointe en chaleur d'un édifice de 5000 m² aujourd'hui. Évidemment, cette gourmandise généra des tensions sur les ressources de la luxuriante province, qui furent vite épuisées et il fallut chercher le bois de construction jusque dans le Caucase [13].

La soif de la matière

Dans *Architecture et volupté thermique* [11], Lisa Heschang précise qu'au 16^{ème} siècle, en Angleterre, le bois de chauffe commençait à manquer du fait de la construction navale et de la production de charbon de bois pour les fourneaux métallurgiques. Un bateau de guerre réclamait par exemple trois mille chênes centenaires² [9]. Quelques siècles plus tard, Sabine Barles relate des tensions similaires concernant l'approvisionnement en bois de l'Ile-de-France, juste avant la Révolution Française [14]. Elle fait aussi état du goût du luxe et de la multiplication des âtres, signes intérieurs de richesse chez la bourgeoisie montante. En parallèle, les travaux de Fourier sur la thermique permettent d'apporter des améliorations sur l'efficacité des cheminées.

La multitude de projets XXL

Comme nos démesures contemporaines (chapitre #14), le temps III avait déjà ses *Masdar* et ses *Palm Islands*. À ce compte-là, l'Antiquité avait créé des précédents et un imaginaire architectural de l'expression du pouvoir. Les démonstrations de puissance des monarchies et des empires conduisaient à des productions architecturales, urbaines (voire territoriales) hors d'échelle, dont la machine de Marly était une curiosité symptomatique. Outre le Versailles de Louis XIV (Fig. 164), Dominique Fernandez [15] relate par exemple la démesure, la folie constructive de l'édification de Saint Pétersbourg par Pierre-le-Grand au début du 18^{ème} siècle (Fig. 162).

Esclaves énergie-matière

Ces constructions pharaoniques réclamaient des intrants de matière considérable comme des besoins énergétiques colossaux pour leur édification. Avant la puissance de feu des fossiles, la ressource énergétique primaire disponible était d'abord la puissance musculaire des hommes. L'esclavagisme et les êtres humains relégués au statut de sous-hommes et d'utilités énergétiques étaient l'option choisie pour nourrir l'ambition et la démesure de la puissance. Le bilan énergétique se réduisait principalement

Fig. 160. *Hypocaustes romains*

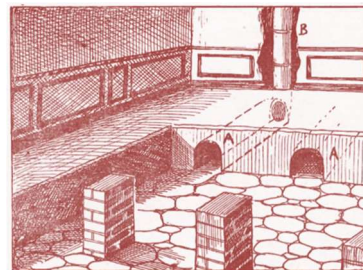


Fig. 161. *Flottage du bois dans l'Yonne*



Fig. 162. *L'édification de Saint Pétersbourg. Carte par Nicholas de Fer, 1717.*



¹ Singh, p148

² Bihouix, p50

pour ces classes inférieures à un faible apport nutritif de mauvaise qualité pour récupérer énergie mécanique nécessaire au travail des champs, à l'industrie et à la construction. Pour l'édification de Saint Pétersbourg, on rapporte que des dizaines de milliers de serfs y trouvèrent la mort, victimes de maladies diverses ou tout simplement morts de faim ou d'épuisement : les habitants ont d'ailleurs coutume de dire que la ville est bâtie sur les squelettes de ses bâtisseurs. De ce point de vue-là, les énergies fossiles ont eu un caractère libérateur d'une comme le rappelle Auzanneau dans son *Or noir* [16].

À la naissance d'une mutation

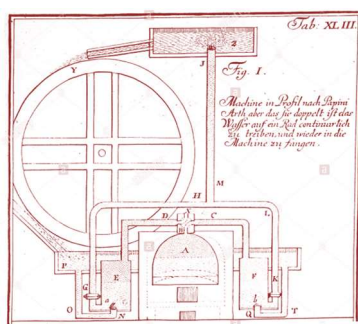
L'intensification de la demande du bois

Smil rappelle quelques valeurs de l'évolution rapide des besoins en bois [12]. En Allemagne, au 18^{ème} siècle, la demande moyenne annuelle était de 3,5 tonnes par habitant. En 1830, en Autriche de 4,5 tonnes. En 1850, aux Etats-Unis, de 6 tonnes. Sous l'empire romain, elle était de 600 kilos : soit une amplification d'un facteur dix en moins de deux millénaires pour cette ressource renouvelable. Converti en flux d'énergie, la combustion de ce débit de matière donnait lieu à un flux moyen de demande primaire de près de trois mille watts aux Etats-Unis. La basse densité couplée à des grands gisements en bois (Etats-Unis, Canada, Russie ...) aurait-elle prédisposé à une forte intensité de demande avant l'ère des fossiles¹ ?

Tout est prêt

Avec les développements importants de la métallurgie au cours du 18^{ème} siècle, une révolution énergie-matière frémait. En parallèle, les travaux scientifiques sur la thermique (et ce depuis une accumulation de savoir sans précédent depuis la Renaissance) et l'émergence d'une nouvelle discipline, la thermodynamique (chapitre #3), permet de générer le « code de fabrication » de nouvelles machines, les moteurs, capables de convertir la chaleur en énergie mécanique. L'atout de la machine à vapeur (Fig. 163) est qu'elle autorise la disponibilité d'énergie mécanique à la demande, et de façon concentrée, ce qui la distingue des moulins à vent ou à des machines hydrauliques. Aussi, la production énergétique devenait « a-géographique », installable partout (quoique les problèmes de pollution rappelleront à l'ordre de ce mirage). La création de ces nouveaux outils génère les prémices d'une situation d'emballement : les nouveaux matériaux capables de résister aux sollicitations mécaniques intenses du moteur vapeur, assemblés de telle sorte à constituer un outil d'extraction permettent d'augmenter le flux de production des matières nécessaires à leur constitution... La génération pendant deux siècles d'une production immense de savoir engendre la plus grande révolution énergie-matière que l'humanité va connaître, synthétisée par Antoine Picon [17] :

Fig. 163. *Machine à vapeur de Papin*



¹ En sus de l'intensité climatique et du climat continental et donc des hivers rigoureux sur la partie septentrionale de la côte Est des Etats-Unis.

« Progressivement va se faire jour une conception plus mécaniste des lois de la nature. Cette conception était déjà présente au début du 17^{ème} siècle dans l'œuvre de Galilée, dans laquelle s'esquisse l'étude de la résistance des matériaux. Elle va dominer la science classique de Newton à Lagrange avant de se diffuser parmi les ingénieurs et les architectes à la charnière des 18^{ème} et 19^{ème} siècle. Cette conception mécaniste va profondément transformer la lecture des ouvrages d'art et des bâtiments ainsi que les procédés utilisés pour les dimensionner. Les concepts de force et d'effort, les modalités d'équilibre et de transmission de ces forces et de ces efforts, vont se substituer aux considérations géométriques traditionnelles. Tout le problème va consister désormais à canaliser les efforts auxquels se trouvent soumis les constructions, des efforts qui ne sont plus seulement liés à leur poids propre, mais aux contraintes d'usage, au vent et à bien d'autres paramètres physiques. Une telle canalisation n'est possible qu'en rendant plus minces les parties d'ouvrages ; on voit alors s'introduire le thème de l'économie de matière auquel se réfèrent encore aujourd'hui nombre d'ingénieurs et d'architectes qui conçoivent des structures. Au cours de la première moitié du 19^{ème} siècle, les formules générales de la résistance des matériaux viennent remplacer les anciennes proportions grâce à des savants et à des ingénieurs comme Cauchy, Navier, Lamé, Bresse ou Saint-Venant. Le confort visuel auquel les classiques se montraient attachés cède la place à une recherche assez systématique de la performance. Entre l'intuition structurelle, les résultats du calcul et l'effet produit sur le spectateur se tissent des relations beaucoup plus complexes qu'autrefois. On passe de la solidité à la stabilité, c'est à dire d'une qualité avant tout statique à une exigence d'équilibre dynamique. »

*

Bibliographie

1. GOMBRICH Ernst, *Une brève histoire du monde*, Hazan, 1998
2. MENARD Raphaël, *Le Classement, Mode d'Emploi*, Mémoire sur les organisations du savoir et les classifications bibliographiques, 67 pages, 2002
3. MAC NEILL, John R., *Du nouveau sous le soleil. Une histoire de l'environnement mondial au 20^{ème} siècle*, Seyssel, Éditions Champ Vallon, 2010. Titre original *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*, 2000
4. MENARD Raphaël et al., *Les infrastructures solaires urbaines, 2050, sous le soleil exactement*. Cours donnés dans le cadre de l'atelier de master. Synthèse des quatre projets rendus par les équipes d'étudiants et dix fascicules des cours associés à l'atelier autour des questions de futurs, de formes et d'énergie. EPFL, 2015.
5. BENEVOLO, *L'histoire de la ville*, Parenthèses, 1983
6. REY Olivier, *Une question de taille*, Stock, 2014
7. GOURIERES Désiré Le, *Les éoliennes théories, conception et calcul pratique*. Goudelin, France : Éditions du Moulin Cadiou, 2008
8. GRAWITZ Nicolas, *L'architecte à l'épreuve de la (trop) grande échelle*, Mémoire de HMONP, École d'architecture de la ville et des territoires de Marne-La-Vallée. Directeur d'étude, Raphaël Menard. 2017
9. BIHOUIX Philippe. *L'âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable*, Seuil, Anthropocène, 2014
10. GUIBERT BRUSSET Cécile, HERZOG Lise, *Où vivent les hommes ? Une histoire de l'habitat*, Éditions du Patrimoine, 2017
11. HESCHONG Lisa, *Architecture et Volupté thermique*, Marseille, Parenthèses, 1981
12. SMIL Vaclav, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015
13. SINGH Madanjeet, *L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature*, Unesco France Loisirs, 1998
14. KIM Eunhye, BARLES Sabine, « The energy consumption of Paris and its supply areas from 18th century to present », *Regional Environmental Change*, 12(2), juin 2012, p. 295-310
15. FERNANDEZ Dominique, *Tribunal d'honneur*, Grasset, 1997
16. AUZANNEAU Mathieu, *L'or noir, la grande histoire du pétrole*, La Découverte, 2015
17. PICON Antoine, « La notion moderne de structure », article paru dans *Les Cahiers de la recherche architecturale*, n° 29, 3ème trimestre 1992, pp. 101-110
18. RUDOLFSKY Bernard, *Architecture Without Architects: A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture*, University of New Mexico Press, 1987. 128 p.

Fig. 164. *Construction du Château de Versailles par Adam Frans van der Meulen, 1669*



#10 Récolter les flux

Une taxinomie des énergies primaires et une bibliographie choisie. Après les courants (#8, la chasse aux flux surfaciques. Une rapide plongée dans la géothermie, la seule énergie surfacique non solaire comme l'énergie marémotrice.

Une arborescence de l'énergie

Construire le crédit énergétique local

Comment scénariser l'offre, le mix contextuel de production d'énergies renouvelables ? Selon la terminologie de ce mémoire, l'offre est la production locale d'énergies renouvelables : soleil, vent, eau et géothermie. L'offre est le flux d'intrants énergétiques destinés à nourrir les usagers de l'architecture et selon la pluralité de leurs usages (Fig. 165). Pour comprendre les enjeux, appréhender les rendements propres à chaque type de production renouvelable, ce chapitre fournira une introduction architecturale et technique pour chaque type de récolte énergétique. C'est une idée-force de cette thèse, comprendre comment les énergies renouvelables peuvent être matières et formes à architecture. Les chapitres #11, #13 et #15 seront d'avantageux compléments.

Quelques ouvrages choisis

Sustainable Energy par David Mac Kay

David Mac Kay est un physicien britannique, de l'université de Cambridge, décédé à 49 ans en avril 2016 (Fig. 166). Dans *Sustainable Energy : Without the Hot Air !* Mac Kay [1] expose la problématique spatiale propre à chaque récolte énergétique renouvelable. Étant presque toutes des énergies de flux, les énergies renouvelables interpellent la question spatiale, leur situation géographique et leur extension paysagère (chapitre #22). Dans sa somme, Mac Kay écrit un scénario didactique, en décortiquant les leviers culturels, les enjeux techniques et les options politiques afin de faire converger la diminution de la demande, vers une offre accrue, et ce, à l'échelle et avec l'exemple du territoire britannique.

Let it Shine par John Perlin

Pour les chapitre dédiés aux formes directes de l'énergie solaire (chapitres #11, #13 et #15), l'ouvrage de John Perlin, *Let it Shine* [2] est une référence précieuse. Sur six mille ans, ce livre est une fresque historique, technique et architecturale du solaire. John Perlin met en perspective le bioclimatisme à travers les âges ; il élabore aussi une chronologie -voire une phylogénèse- des dispositifs de captation de chaleur (Fig. 168). Puis, à l'orée de la révolution industrielle, il décrit avec précision l'émergence des machines thermodynamiques exploitant le feu solaire comme source chaude (#13). Perlin rappelle aussi le tournant manqué de la transition

Fig. 165. *Agronica par Andrea Branzi, 1996. Planification rurale et diversité des récoltes énergétiques. Voir aussi les « plans de récolte énergétiques » au chapitre #22*

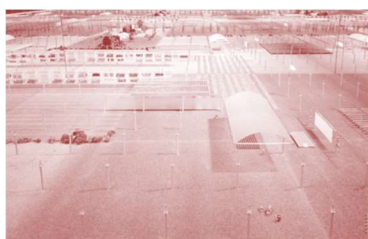


Fig. 166. *David Mac Kay.*



solaire dans les années 1980 avec comme grands protagonistes de ce rendez-vous avorté, l'administration Reagan et le contre-choc pétrolier (#14). En France, dans les années 1970 et 1980, l'avance scientifique était pourtant importante avec la première centrale solaire thermodynamique à Odeillo à l'initiative de Félix Trombe (#16).

L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature par Madanjeet Singh

Il est intéressant de se plonger dans le livre de Madanjeet Singh, ancien ambassadeur indien et personnage important de l'Unesco. Cet ouvrage [3] permet de découvrir l'histoire de chacun des types de la grande famille des énergies renouvelables. Singh emprunte volontiers une dimension mystique pour partir à la découverte du zoo des énergies renouvelables : l'« énergie verte de la biomasse », l'« énergie invisible du vent », ... Il faut dépasser les allégories de Singh, parfois un peu triviales, pour apprécier le didactisme et l'approche historique employée pour faire apprécier les énergies renouvelables. Le livre est certes un peu daté, quelques technologies ayant grandement évolué depuis (comme pour le photovoltaïque par exemple), mais *L'énergie solaire* est un très bon atlas des énergies renouvelables.

Autres lectures encore

Le guide rédigé par Robert Ferry et Elizabeth Monoian [4] fournira un utile vademécum aux enjeux paysagers et énergétiques des formes actuelles de captation des énergies renouvelable comme également les travaux de Vaclav Smil, et plus particulièrement *Power Density* [5]. En deuxième partie, le chapitre relatif à l'autonomie énergétique et aux densités critiques précisera ces retours de lecture (#22).

L'arbre des énergies

Une classification arborescente

Pour m'immerger dans les énergies renouvelables, « naturaliste du dimanche », j'ai patiemment collectionné les différentes catégories d'énergie, en isolant chaque forme et en essayant de les positionner par genres, familles, espèces (Fig. 180). Cette classification des différentes énergies est le miroir d'un arbre phylogénétique, une arborescence du vivant, comme ceux dessinés par Linné ou par Buffon. J'ai découvert avec passion l'histoire des classements, des taxinomies du savoir pour mon mémoire de diplôme d'architecture, *Le classement mode d'emploi* [6], et nul doute que ce réflexe de structuration est hérité de cette précédente recherche (Fig. 167) !

Les classifications bibliographiques¹, comme la classification décimale ou la Dewey, toutes deux couramment utilisées dans nos bibliothèques, sont de prime les bonnes structures pour organiser les filiations différentes entre les énergies. Mon mémoire [6] concluait sur une proposition de classification bidimensionnelle, matricielle, en détournant celle mise au point par Paul Braffort, éminent représentant de l'Oulipo, ingénieur, écrivain, poète, parolier et compositeur de chansons. Les énergies pourraient-elle

¹ Dites linéaires ou arborescentes.

Fig. 168. *Let it Shine par John Perlin*

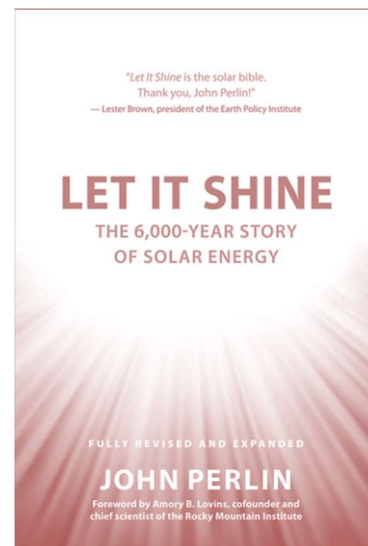


Fig. 167. *Couverture du mémoire, Le classement, mode d'emploi.*

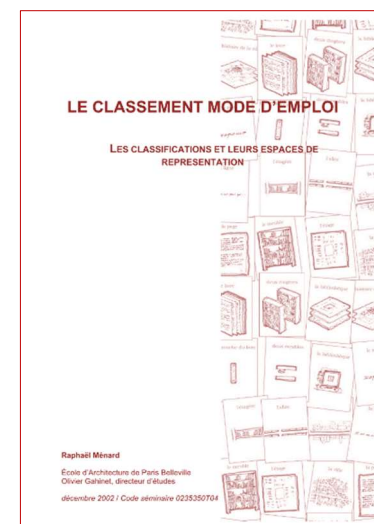
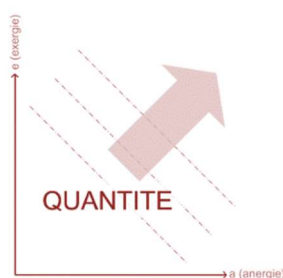
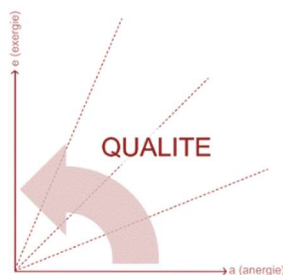


Fig. 169. *Représentation bidimensionnelle de l'énergie et représentation en polaire.*



L'espace bidimensionnel de représentation d'une donnée énergétique : les iso-lignes de mesure de la quantité d'énergie parallèle à $y = -x$



L'espace bidimensionnel de représentation d'une donnée énergétique : les iso-lignes de mesure de la qualité d'énergie selon les coefficients directeurs $y = nx$

aussi être classées de façon matricielle ? On pourrait de fait les organiser également selon leur qualité mais cela fera l'objet de recherches futures dans le prolongement de celles effectuées dans le cadre de *Reforme* [7].

Vers une classification matricielle des énergies

Dans le rapport final de *Reforme* [7], plusieurs parties (et une annexe) étaient consacrées à un développement mathématique, à l'hypothèse d'une « pseudo-algèbre de l'énergie », tentative de formalisation de loi de calcul et d'une métrique opérant sur des valeurs complexes (au sens littéral d'un point de vue mathématique) permettant de mesurer à la fois quantité et qualité de l'énergie. Dans cette hypothèse, la mesure de l'énergie (et sa dérivée temporelle la puissance) n'était plus que scalaire mais devenait une variable bidimensionnelle, avec deux composantes (Fig. 169). En effet, la classification usuelle ne permet pas de distinguer les qualités énergétiques de chacun des vecteurs, autrement dit leur capacité à offrir différentes formes d'usages énergétiques pour du mouvement ou de la chaleur par exemple. Le taux d'exergie compris entre 0% (de l'anergie pure) et 100% (de l'exergie pure) permettrait de distinguer cette vertu (il en sera aussi question autour des bassins versants et des plans de récolte énergétique dans le chapitre #22).

Vers un Neufert des énergies renouvelables

Les architectures de la bonne récolte énergétique

Un élément essentiel et récurrent, tant de mes expériences d'enseignant, que pour la recherche (et certaines conceptions pratiques), consiste à considérer que les énergies renouvelables sont l'essence même de l'architecture. Les constructions qui convertissent les flux renouvelables sont des formes simples et savantes que tout concepteur se doit au moins comprendre, sinon de maîtriser. Concentrer le flux solaire pour générer de la chaleur à haute température (#16), convertir efficacement en énergie mécanique le courant d'une rivière (#8), ou tout simplement bien organiser la position d'une fenêtre dans le percement d'un mur (un capteur solaire comme un autre, #15) sont autant de programmes de design, qui réclament de la créativité pour leur résolution formelle et l'ordonnement des matériaux adéquats. Les énergies renouvelables ne sont pas des utilités, à reléguer en objets infrastructuraux et techniques, hors du champ de vision et d'intérêt du concepteur. Par essence même, parce qu'elles convertissent des flux, elles sont des objets spatiaux. Dans le prolongement du chapitre « Chasser les courants » (#8), cet article poursuit cette ambition didactique : faire comprendre les déterminants dimensionnels, la constitution matérielle des différents dispositifs aptes à convertir la diversité des flux renouvelables, captibles sur notre planète. C'est une histoire en marche, épousant l'histoire des techniques¹, celle de l'architecture et du paysage.

¹ Y compris de l'agriculture et de l'agronomie.

Ce mémoire a pour ambition de retisser ce lien puissant, absolument fécond pour l'architecture du temps V, l'architecture-énergie (#16) et essentiel pour celle du temps VII, l'architecture renouvelable (#18).

Comprendre les archétypes

Pour dimensionner l'architecture, ses aménagements intérieurs et extérieurs, tout architecte possède dans son bureau un Neufert, raccourci courant pour désigner l'auteur éponyme du livre *Les éléments de projet de construction* [8], ouvrage maintes fois réédité et augmenté depuis sa première édition en 1936 (Fig. 170). Pour maintenant et demain, il est urgent de composer l'architecture et le paysage avec un « Neufert des énergies renouvelables ». Ce serait aussi une belle occasion de détourner certains principes techniques pour générer d'autres architectures, par essence, points focaux de la convergence entre offre et demande énergétique.

Cela constituait d'ailleurs les enjeux de plusieurs projets pédagogiques comme avec les *Diogènes*¹ ou encore de *Wilma* ou *les Infrastructures Solaires Urbaines*²[9]. Encore est-il nécessaire de comprendre ce qui est juste de ce qu'il l'est moins, de posséder un bagage technique suffisant pour que l'intégration d'une production énergétique dans le projet architectural ne soit ni anecdotique, encore moins irréaliste.

Offre et demande d'énergie

Le potentiel global de la récolte

Retrouver l'équilibre

Dans ce mémoire, je m'attache à décrire la quête de nouveaux équilibres. Ceux urgents, indispensables pour assurer la permanence de la vie sur Terre, relatifs notamment aux émissions de gaz à effet de serre, point central du temps VII (#18). Il sera question de l'équilibre à retrouver entre émissions et séquestration de carbone (#22), mais aussi de nouveaux métabolismes de la matière pour limiter la grande dispersion ainsi qu'évidemment du chemin retrouvé pour un monde à 100% énergie renouvelable. Ce chapitre se concentre sur ce dernier point. La quête de nouveaux équilibres entre demande énergétique et production renouvelable a été déjà scrutée à différentes échelles. Nous avons évoqué David Mac Kay et l'exemple pris pour la Grande-Bretagne. En France, nous pouvons aussi citer le travail de l'association *négaWatt*, créée en 2001 et l'actualisation régulière de leur scénario [10] [11].

Une puissance solaire disponible phénoménale

Pour indiquer quelques ordres de grandeur, il est souvent utile de rappeler que si nous parvenions à récupérer 100% de l'énergie solaire, qui

Fig. 170. Un extrait du Neufert.

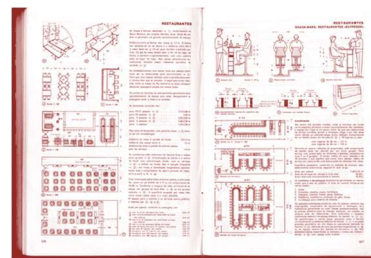
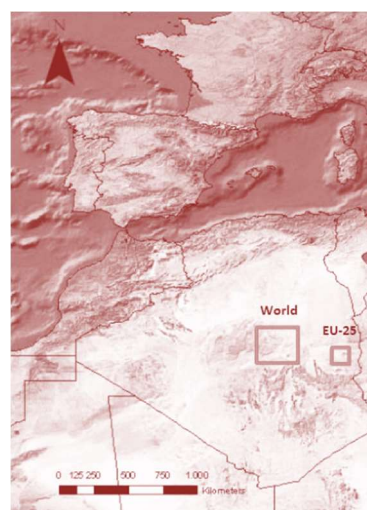


Fig. 171. Carré de désert du Sahara recevant autant d'énergie solaire que les besoins énergétiques totaux de l'humanité



¹ du DPEA de 2012 à 2016

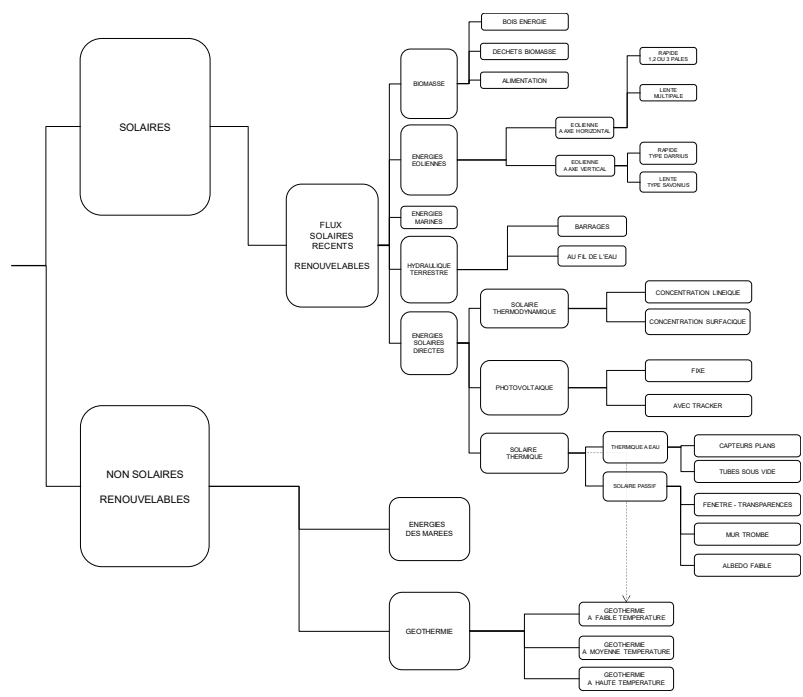
² à l'EPFL en 2015 et 2016

frappe la Terre pendant 15 secondes chaque jour, 100% des besoins actuels énergétiques seraient assurés. Si l'humanité captait en moyenne 0,02% du flux solaire frappant la surface planétaire, nous serions 100% renouvelables. De façon géographique, 65 000 km² du Sahara, un carré de 250 kilomètres de côté, reçoit autant d'énergie solaire que la consommation totale d'énergie primaire actuelle (Fig. 171).

Les gisements non solaires

Dans l'arborescence des énergies renouvelables, les deux formes non solaires sont la géothermie et l'énergie marémotrice. Les énergies nucléaires ne sont pas mentionnées dans ce tableau car elles correspondent à des énergies de stock (de matières) et non de flux (Fig. 172). Plus loin dans ce chapitre, nous constaterons que l'importance du flux disponible de la géothermie et de l'énergie marémotrice n'ont rien à voir avec celui de l'énergie solaire. Aussi l'énergie marémotrice est hautement spécifique, très localisée du point de vue de la géographie. La géothermie est *a contrario* plus diffuse et son potentiel architectural et énergétique sera plus largement développé dans la suite de ce chapitre.

Fig. 172. Zoom sur l'arbre des énergies renouvelables, une sous-partie de la taxinomie terrestre.



Les ressources renouvelables disponibles

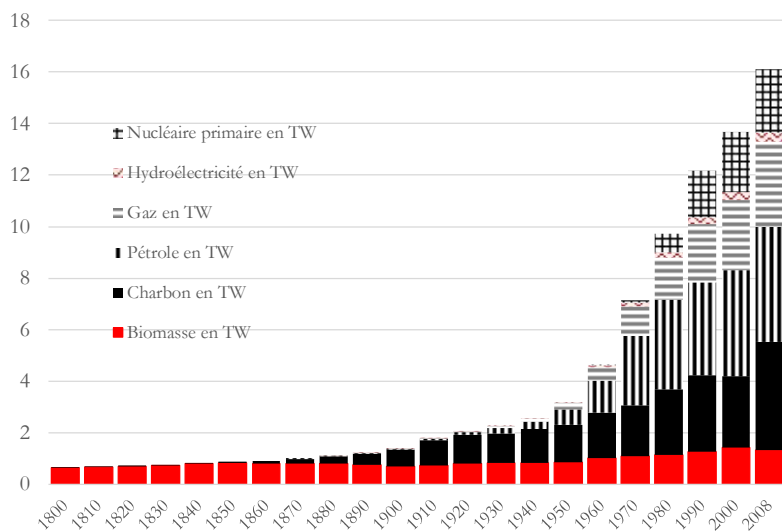
En marge du flux solaire directement disponible, le tableau (Fig. 32) a aussi le mérite d'évaluer globalement le gisement des courants solaires, tels qu'analysés dans le chapitre « Chasser les courants » (chapitre #8). Les potentiels sont colossaux, quoi que le rendement du moteur planétaire ne soit pas bien élevé : le gisement éolien ne convertit que 0,7% du flux solaire incident et les courants marins encore moins.

Le récit de la demande

L'hypercroissance depuis le temps IV

Les besoins énergétiques actuels globaux (hors alimentation) sont légèrement supérieurs à 15TW¹ (Fig. 173). Comme nous l'avons déjà vu (Fig. 107), aujourd'hui, le flux de demande par humain est en moyenne légèrement supérieur à 2000W². Le chronogramme ci-contre détaille l'incroyable croissance de la consommation énergétique mondiale depuis l'ère industrielle : le vrai départ étant vers 1880, également point de repère pour mesurer l'évolution de la concentration CO₂ atmosphérique en ppm³.

Fig. 173. *L'évolution du mix primaire de la demande énergétique globale depuis plus de deux siècles (données d'après Max Moser)*



¹ Soit aussi 15000GW

² Soit les 15000 milliards de watts précédents, divisés par près de 7,5 milliards de terriens

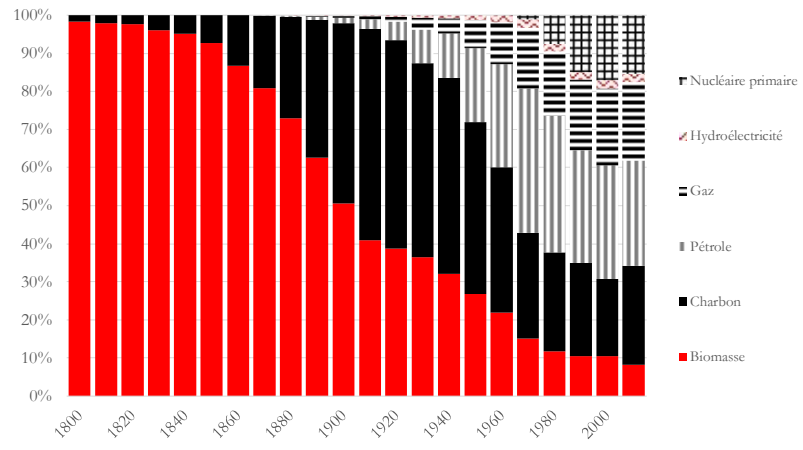
³ Parties par million.

En 1880, la demande énergétique était d'environ 1TW, soit le quinzième de la valeur d'aujourd'hui. La population mondiale était à l'époque d'environ 1,5 milliard d'individu, soit le cinquième de la population mondiale actuelle. Autrement dit, la demande par personne a triplé en l'espace de 150 ans. En 1880, le terrien moyen réclamait un flux primaire de 600 watts, valeur pas tant éloignée que ça des chasseurs-cueilleurs (chapitre #7) : l'humanité restait à l'échelle de la permanence des ressources physiques de la planète.

L'évolution du mix comme marqueur des « temps »

L'augmentation drastique du flot d'énergie est allée de pair avec l'évolution du mix énergétique. On note que l'accélération s'opère dès l'introduction du charbon, première énergie de stock venant s'ajouter au flux renouvelable de la biomasse dès 1870 (#12). Dans les années 1900, on peut considérer que l'humanité s'est « débranchée du soleil », la production d'énergie s'étant fortement « désolarisée » : l'offre est devenue beaucoup moins renouvelable et commence alors à dépendre à moitié du charbon (Fig. 174).

Fig. 174. *Évolution en deux siècles des proportions relatives du mix énergétique mondial. D'après Max Moser. En 200 ans, une mue énergétique incroyable faisant passer l'humanité d'un régime énergétique de flux (la biomasse et donc le renouvelable, les histogrammes rouges) à un régime de stock (et donc provisoire, les hydrocarbures et les matières fissiles).*



L'apparition du pétrole à la même époque finit d'enfoncer le clou de cette descente vers le monde des fossiles (#14). Aux lendemains de la Seconde Guerre Mondiale, la biomasse et l'hydraulique n'assure plus que le quart des besoins énergétiques. Trois générations plus tard, en 2015, les renouvelables ne fournissent plus que 15% des besoins et 80% sont générés par la combustion des hydrocarbures, et avec à la clé, les émissions de CO₂, ce relargage atmosphérique massif du carbone emprisonné depuis des millions d'années dans la croûte terrestre.

Le flux géothermique

Un flux renouvelable venant du sol

La chaleur des profondeurs de la Terre

Après les courants solaires, la géothermie est un cas particulier au sein de l'arborescence des renouvelables : avec l'énergie marémotrice, elles sont toutes deux les énergies renouvelables non issues¹ du soleil. Singh [3] rappelle qu'il y a deux mille ans, les Japonais et les Romains utilisaient déjà l'eau tiède des sources géothermales pour se laver et cuisiner. La géothermie très peu profonde² est sans doute à la fois « nourrie énergétiquement » par le flux de chaleur issue des couches terrestres très profondes, comme par le flux de chaleur solaire descendant depuis la surface du sol jusqu'à une assez faible profondeur. En d'autres termes, un puits canadien pourrait alors être considéré comme une source renouvelable hybride entre le solaire thermique et la géothermie.

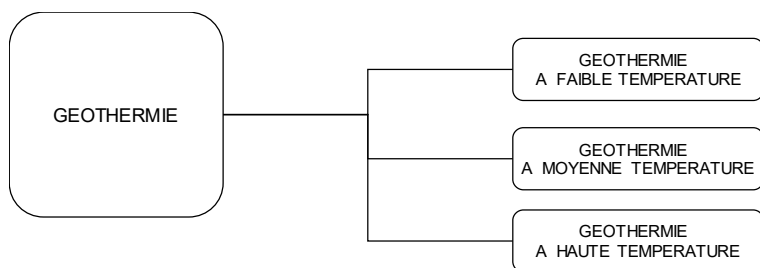


Fig. 175. *Coupe sur chaleur géothermique*

Ordre de grandeur du flux

Nous devons sans doute la vie à la géothermie. François Roddier [13] précise le rôle central de cette source dans l'apparition de la vie sur Terre, et ce, antérieurement à l'apparition des cellules capables de réaliser la photosynthèse³. Aujourd'hui, nous bénéficions encore d'un flux de chaleur rémanent, issu de l'activité nucléaire du noyau terrestre et de la fission de noyaux lourds. Sa distribution hétérogène génère très localement des gisements importants avec des températures disponibles pouvant être assez élevées (de l'ordre de 300°C). La géothermie peut jouer localement un rôle énergétique central dans l'approvisionnement d'un territoire : les centrales électriques utilisant les sources chaudes en Islande ou en Martinique sont quelques exemples.

¹ Directement ou indirectement.

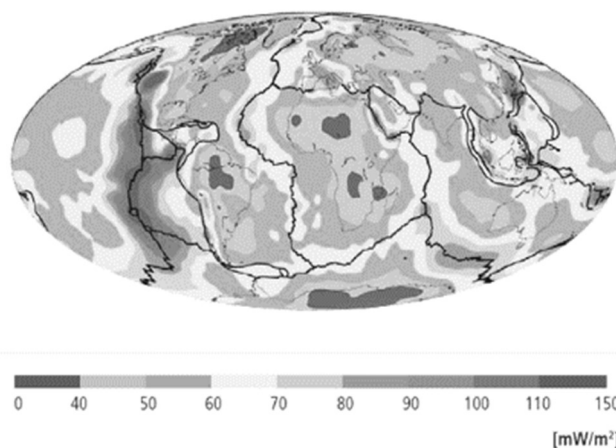
² Et rangeons les puits canadiens dans cette catégorie.

³ Et donc de la transformation du flux solaire en énergie métabolique.

Fig. 176. Bain en Islande dans le lagon bleu



Fig. 177. Cartographie de la densité de gisement géothermique. La moyenne planétaire est de $0,059 \text{ W/m}^2$ (source IPCC)



Une faible densité énergétique en moyenne

Toutefois le flux moyen est bien plus faible que le gisement solaire : de l'ordre de $0,006 \text{ watts par m}^2$ (Fig. 177) à comparer à environ aux $169 \text{ watts par m}^2$ issus du solaire et de ses dérivés (#19). Par ailleurs la qualité de ce flux est faible : alors que le taux exergetique¹ de l'énergie solaire est de 97%, le flux géothermique est au mieux, à l'aplomb de certaines sources très chaudes, de l'ordre de 30%. Cela signifie que le flux géothermique sera dans la plupart des cas tout juste bon à produire de la chaleur à moyenne température. Dans la grande majorité de ses usages, la géothermie est employée pour la production de basse chaleur comme source de production d'un réseau de chaleur par exemple. Pour la production d'électricité [3], la puissance installée géothermique mondiale était de 6800 MW en 1995, soit un flux d'environ 1 W_e si nous le rapportons à chaque terrien. Cela reste donc marginal à l'échelle planétaire.

Fig. 178. Centrale géothermique de Puna, Big Island, Hawaïi, États-Unis.



Quelques exemples d'architecture

Utilités centralisées : centrales géothermiques et synthèse énergie-matière

Les grandes utilités de production réclament généralement des forages profonds pour capter les sources chaudes. En 1976, les capacités installées sur les îles d'Hawaïi ont nécessité un forage de 1966 mètres [3] (Fig. 178). Dans le cas de la production d'électricité, les utilités géothermiques intègrent des machines thermodynamiques analogues à celles exploitées avec des énergies fossiles² : turbines à vapeur, refroidisseurs...

¹ Ce taux mesure en quelque sorte la *qualité de l'énergie*, plus il est proche 100%, plus l'énergie s'apparente à de l'énergie mécanique.

² Ou certaines usines de solaire à concentration

Les géothermies peu profondes et les systèmes hybrides avec le solaire

La géothermie peut cependant être utilisée de façon diffuse et décentralisée. Comme par exemple en enfouissant des nattes d'échanges thermiques avec le sol à faible profondeur, et ce, en association avec une pompe à chaleur : cela peut constituer un moyen de production tout à fait efficace pour la production de chauffage d'une maison avec un tel dispositif installé dans le jardin. La géothermie utilise parfois l'ancrage du bâtiment, ses racines structurelles, les fondations profondes¹ pour interagir avec le potentiel thermique du sol. L'aéroport de Zurich est une référence de cette mise en œuvre. Par essence souterraine, énergie du sol plutôt que du ciel et de l'atmosphère, la géothermie est évidemment discrète avec l'architecture, sa présence se manifestant dans les racines de l'édifice, dans son infrastructure d'ancrage, potentielles interfaces d'échanges énergétiques avec les profondeurs.

Puits canadiens

Cette invisibilité est criante pour les puits canadiens que nous avons mis au point dans le cadre du campus Artem à Nancy avec l'agence Nicolas Michelin en 2005 (Fig. 179). Les puits canadiens sont un cas un peu particulier d'énergie géothermique car nous pourrions considérer qu'ils sont aussi des systèmes partiellement solaires. En venant échanger avec la température quasi-constante du sol à trois mètres de profondeur (la règle du pouce dit en général de prendre la température moyenne annuelle, plus un degré²), ces échangeurs air-air puisent aussi dans le rechargement thermique du sol en surface par l'irradiation solaire et la lente propagation de cette onde de chaleur dans le sol. Le graphique ci-dessous (Elioth) récapitule la campagne de mesure et montre la relation entre température extérieure et puissance thermique disponible.

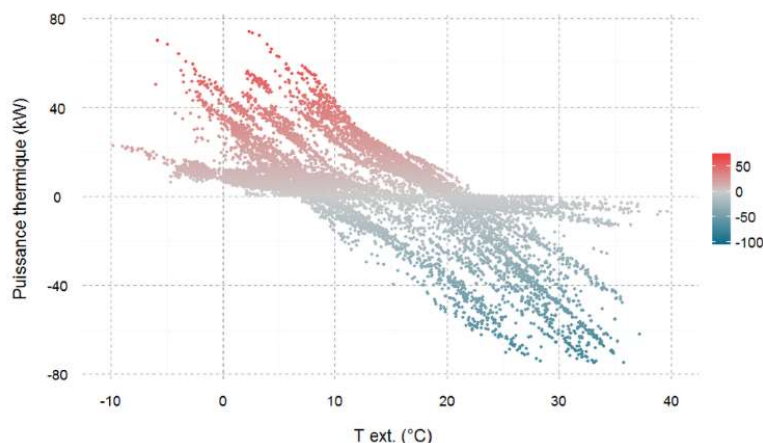
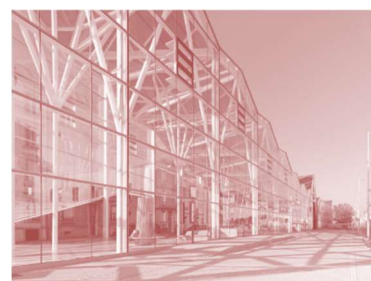


Fig. 179. Photos de terrassements et d'installation des carneaux d'un tronçon de puits canadiens sur le campus Artem à Nancy (photos Elioth, 2010). En bas, la galerie Artem finie, avec le diffuseur de puits canadien visible en second plan.



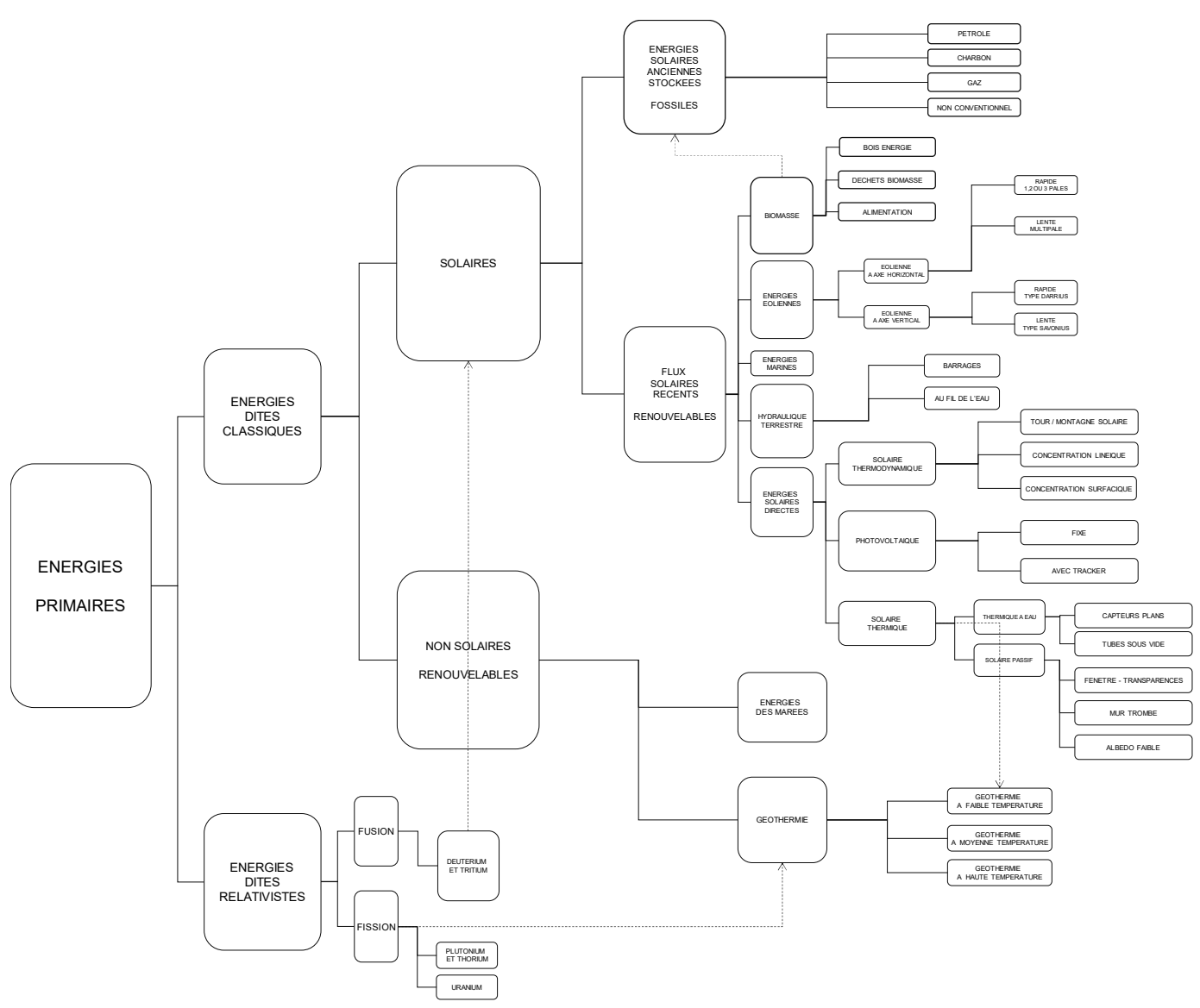
¹ Des pieux géothermiques

² La quote-part de la géothermie

Bibliographie

1. MAC KAY David JC. *Sustainable Energy - Without the hot air*. Cambridge, UIT Cambridge, 2009
2. PERLIN John. *Let it Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy?* New World Library, 2013
3. SINGH Madanjeet, *L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature*, Unesco France Loisirs, 1998
4. FERRY Robert, MONOIAN Elizabeth, *A field guide to renewable energy technologies*, land art generator initiative, www.landartgenerator.org, 2012
5. SMIL Vaclav, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015
6. MENARD Raphaël, *Le Classement, Mode d'Emploi*, Mémoire sur les organisations du savoir et les classifications bibliographiques, 67 pages, 2002
7. MENARD Raphaël et al., *Reforme, rapport final de recherche*, programme Ignis Mutat Res, 2014
8. NEUFERT Ernst, *Les éléments de projet de construction*, 1936
9. MENARD Raphaël et al., *Les infrastructures solaires urbaines, 2050, sous le soleil exactement*. Cours donnés dans le cadre de l'atelier de master. Synthèse des quatre projets rendus par les équipes d'étudiants et dix fascicules des cours associés à l'atelier autour des questions de futurs, de formes et d'énergie. EPFL, 2015.
10. SALOMON Thierry, JEDLICZKA Marc, Association Négawatts, *Changeons d'énergie, Transition, mode d'emploi*, Arles, Actes Sud, 2013.
11. SALOMON Thierry, *Manifeste NégaWatt*, coédition Actes Sud/Colibri - Collection : Domaine du possible, janvier 2012.
12. MASSON-DELMOTTE Valérie, LE TREUT Hervé, PAILLARD Didier, *Energie, effet de serre et changement climatique* dans *L'énergie à découvrir*, sous la direction de Rémy Mosseri et Catherine Jeandel. CNRS Editions, 2013
13. RODDIER François, *Thermodynamique de l'évolution, un essai de thermo-bio-sociologie*, Parole Éditions, 2012

Fig. 180. L'arbre des énergies primaires sur Terre et les différentes familles selon les interactions physiques et/ou chimiques en présence.



#11 Le solaire sous toutes ses formes (1/3)

Poursuite de l'exploration des énergies renouvelables. Zoom sur la grande famille du « solaire direct ». Biomasse, solaire thermique, solaire à concentration et le photovoltaïque.

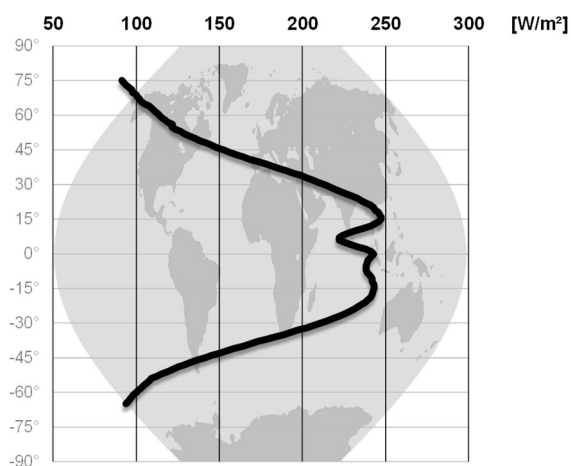
Les différentes natures du flux solaire

La quantité de flux (et ses variations)

Un gisement généreusement distribué

Dans la deuxième partie de ce mémoire, le chapitre consacré aux constantes de l'architecture (#19) présente cette « fausse constante » des 169 watts par m², moyenne de la bande de valeur du flux solaire. Ce flux varie de 85 à 250 watts par m² suivant les régions. Pour éviter tout malentendu, ces valeurs sont des moyennes annuelles, autrement dit le lissage du flux selon les saisons et entre le jour et la nuit. Aussi, aucune région n'est dépourvue d'énergie solaire et l'écart entre les plus riches « solairement » des plus pauvres n'est que d'un facteur trois (Fig. 181). Ni l'énergie éolienne, ni l'énergie hydraulique ne propose une telle homogénéité de distribution (chapitre #8). L'énergie solaire est intrinsèquement équitable, et cela souligne ses vertus vis-à-vis des énergies de stock¹ qui sont extrêmement localisées et qui génèrent donc des déséquilibres économiques et géopolitiques que nous ne connaissons que trop bien (#14).

Fig. 181. *Le graphique de répartition du flux solaire à la surface du globe, en densité de puissance moyenne et selon la latitude [1]*



¹ Les hydrocarbures ou les matières fossiles.

« Sous le soleil exactement »

C'était le titre de la chanson de Serge Gainsbourg interprétée par Anna Karina en 1967. C'était le nom que nous avons retenu pour l'atelier de projet à Lausanne en 2015 et 2016 [1]. « *Un point précis sous le tropique du Capricorne ou du Cancer* » poursuit la chanson. Près des trois quarts de la population mondiale vivent à proximité de la bande tropicale. Autrement dit, la grande majorité de l'humanité vit sous une irradiation moyenne voisine de 200 watts par m² environ¹. Avec un rendement parfait permettant 100% de conversion de ce flux, dix mètres-carrés de sol par humain seraient suffisants, vue la demande moyenne légèrement supérieure à 2000 watts par humain aujourd'hui. L'architecture solaire et le bioclimatisme feront l'objet d'un chapitre dédié (#15). Nous approcherons plus loin les questions spatiales liés à la production renouvelable, notamment avec les *plans de récolte énergétique* (au chapitre #22), et nous verrons qu'il est assez aisé de constituer un morceau de territoire disposant d'un rendement équivalent à 5% et permettant donc la production d'un flux d'environ dix watts par m². Ainsi deux-cents mètres-carrés par personne seraient amplement suffisants pour assurer ces besoins énergétiques, sans prendre en compte l'emprise spatiale des besoins alimentaires². Cet ordre de grandeur d'emprise est plutôt une bonne nouvelle, étant vu que la surface disponible par humain est plutôt mesurée : nous le verrons plus précisément dans la deuxième partie de ce mémoire dans l'article relatif à l'autonomie énergétique et la neutralité carbone (encore au chapitre #22).

La qualité du flux (et ses variations)

La variation du flux dans le temps

Les valeurs de flux évoquées précédemment sont des moyennes annuelles. Elles indiquent un potentiel disponible, sous réserve de pouvoir adapter les fluctuations et les tensions entre le flux produit et la demande énergétique. Ces flux varient dans le temps à plusieurs échelles caractéristiques : évidemment au cours de la journée, trivialement selon le cycle jour-nuit, et selon les saisons. Dans la région parisienne par exemple, l'irradiation solaire horizontale annuelle est d'environ 1100kWh par m², soit 125 watts en moyenne. Ce flux est nul pendant les nuits. À proximité du solstice de l'été et lorsque le ciel est dégagé, le flux maximum peut parfois tutoyer les 1000 watts par m². Il faut apprécier les 125 watts comme une moyenne d'une valeur qui est environ la moitié du temps nulle (la nuit) et évoluant en-deçà de 1000 watts en journée. Le graphique ci-après détaille ce « paysage temporel » des flux et permet d'apprécier la saisonnalité du gisement (Fig. 182). Dans d'autres situations géographiques, et au fur et à mesure que l'on s'approche de l'équateur, les effets de saisonnalité et la variabilité temporelle du flux s'atténuent. Ainsi donc, là où habite la grande

¹ Soit l'équivalent de 1750kWh par m² horizontal et par an.

² Les 100 watts finaux de nos besoins alimentaires réclament eux déjà 1000m² de surface agricole au minimum, et sous réserve que notre alimentation soit essentiellement végétale. Voilà une densité critique à ce stade pour l'autonomie alimentaire : 10 habitants à l'hectare, 1000 par km².

Fig. 182. *Fluctuation journalière de l'irradiation reçue à Paris (source Elioth) selon un calendrier annuel.*



La variation du flux sur les faces de l'architecture

La latitude géographique gouverne grandement autant l'intensité du flux que sa saisonnalité. La latitude a une importance considérable sur la distribution spatiale du flux, entendu selon la disponibilité sur des plans horizontaux et verticaux. Il faut aussi rappeler le retournement nord-sud selon les hémisphères ; de retenir aussi que pour les latitudes comprises entre les tropiques, le soleil joue à saute-mouton entre l'été et l'hiver et qu'il vient tantôt côté nord, tantôt côté sud¹.

Géographies et disponibilités sur les faces exposées

Dans la bande tropicale, la grande majorité du flux est disponible sur le plan horizontal et bien moins sur les faces verticales des quatre points cardinaux, ou les façades des architectures. À l'inverse, pour les latitudes plus élevées, disons dès que l'on dépasse 45 degrés de latitude, le gisement solaire se « saisonnalise ». En hiver, dans l'hémisphère nord, le soleil est bas à l'horizon et le flux solaire est plus fortement disponible sur une façade sud dégagée que sur le plan horizontal². Ce lien puissant et fécond entre géographie et flux solaire impacte fortement les questions architecturales et urbaines, en particulier sur la distribution et la dimension des percements en façade. Ce point sera largement développé dans le chapitre dédié au solaire passif et l'urbanisme solaire (chapitre #15). Mais nous le verrons plus loin dans ce chapitre, la géographie peut être déterminante pour installer de façon optimale un panneau solaire thermique et dans le choix de son orientation.

¹ Mais toujours avec des angles d'incidence très élevés donc cela reste faiblement perceptibles.

² Ce sera la façade nord dans l'hémisphère sud

Qualité géométrique du flux

Avant de frapper les territoires (et donc l'architecture), le flux solaire traverse l'atmosphère et la complexité de la couverture nuageuse. On distingue la valeur de flux comme la somme de deux composantes. L'une est le flux direct, correspondant à l'énergie solaire reçue par ciel clair et dégagé où les rayons solaires sont tous parallèles. L'autre composante est dite diffuse, la part du flux solaire « flouté » par la couverture nuageuse. Selon les géographies, les flux solaires peuvent être plus ou moins direct ou diffus. Plus la part du diffus est importante, plus le flux est « brouillon », « moins en rang » comme le sont des rayons parallèles (Fig. 183).

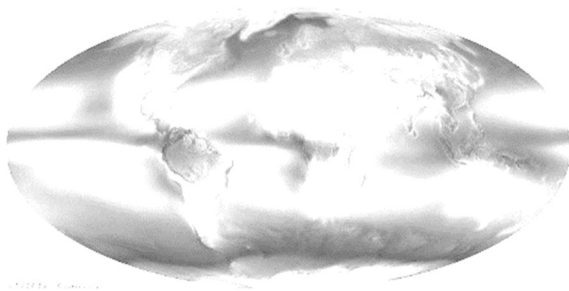


Fig. 183. *Mappemonde de couverture nuageuse moyenne¹*

Dans ce cas, la concentration optique est par exemple beaucoup moins efficace, tout comme le rendement solaire équivalent de transparences insérées dans l'enveloppe d'une construction. De façon triviale, ce climat du flux solaire affecte directement la perception de l'architecture, baignée dans des paysages spécifiques de la lumière, propres aux géographies. Une lumière tantôt directe, tantôt diffuse, génère des ambiances intérieures radicalement différentes ; les peintres hollandais ont été de grands explorateurs de cette perception (Fig. 184). La qualité du flux solaire, la répartition entre les composantes directe et diffuse, peut aussi être saisonnier et avoir alors une incidence sur la pertinence du solaire passif en architecture (chapitre #15).

Les espèces énergétiques analysées

Dans ce chapitre, nous allons aborder les formes directes de conversion de l'énergie solaire. Direct, au sens de la conversion partielle de l'énergie contenue dans le « troupeau de photons » du flux solaire. En premier lieu, nous aborderons la forme la plus naturelle², la biomasse, fruit du vivant, et le gisement énergétique chimique qu'elle constitue en aval de la photosynthèse.

Fig. 184. *Intérieur de Nieuwe Kerk par Emanuel De Witte, 1657*



¹ <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3074039/Thirteen-years-worth-clouds-Earth-Stunning-image-reveals-beautiful-weather-patterns-cover-planet.html>

² Au sens d'une disponibilité préexistante sans la technique et les artifices de l'homme.

Photosynthèse et biomasse

Définition

La photosynthèse, petite usine énergie-matière

On appelle biomasse toute production issue de façon directe ou indirecte de la photosynthèse (Fig. 186). Il s'agit de l'ensemble des matières organiques d'origine végétale, animale ou fongique (les champignons) pouvant devenir une source d'énergie par combustion, après méthanisation ou après de nouvelles transformations chimiques. La photosynthèse est un processus biochimique capable de constituer des chaînes carbonées complexes par un apport d'énergie lumineuse. Le soleil est l'intrant énergétique primordial de ce processus. Des glucides sont synthétisés à partir du dioxyde de carbone (CO_2) et de l'eau avec libération d'oxygène comme sous-produit de l'oxydation de l'eau. C'est la photosynthèse qui maintient constant le taux d'oxygène dans l'atmosphère terrestre et fournit toute la matière organique ainsi que l'essentiel de l'énergie utilisées par la vie sur Terre.

Energie

Production

La photosynthèse convertit généralement entre 0,1% et 0,5%¹ du flux solaire (Fig. 186). La plante doit aussi puiser de l'énergie pour activer son métabolisme : c'est l'une des raisons qui expliquent la relative faiblesse de ce rendement.

« L'activité productive d'un végétal peut être envisagée d'un côté comme dépense d'énergie, de l'autre comme acquisition. Si l'acquisition n'était supérieure à la dépense, aucune plante ne pourrait croître. »²

On distingue trois principaux types de production, auxquels correspondent des procédés de valorisation spécifiques (chapitre #9) :

Biomasse lignocellulosique. Le bois et les résidus verts ; la paille ; la bagasse de canne à sucre ; le fourrage. La valorisation se fait plutôt par des procédés par voie sèche, dits conversions thermo-chimiques.

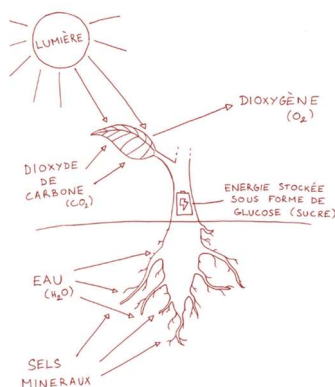
Biomasse à glucides. Les céréales ; la betterave sucrière ; la canne à sucre. La valorisation se fait plutôt par fermentation ou par distillation dits conversions biologiques (Fig. 185).

Biomasse oléagineuse. Colza ; palmier à huile, etc. Elle peut être utilisée comme carburant. Il y a deux familles de biocarburants : les esters d'huiles végétales (colza), et l'éthanol, produit à partir de blé et de betterave, incorporable dans le super sans plomb.

Fig. 185. *Moisson par Pieter Bruegel l'Ancien*



Fig. 186. *Métabolisme de la photosynthèse.*



¹<http://www.ader.ch/energieaufutur/energies/biomasse/index.php>

² Excédents d'énergie dus à l'action du soleil, *L'économie à la mesure de l'univers*, Georges Bataille.

Biomasse énergie	chaleur et lumière
Rendement max.	< 0,5% du flux solaire

Stock

Le pouvoir calorifique typique du bois est fonction de l'humidité et les valeurs typiques s'établissent selon les valeurs suivantes :

1,7 kWh/kg	à 60 % d'humidité
4,0 kWh/kg	à 20 % d'humidité
4,4 kWh/kg	à 11 % d'humidité

Consommations

Au-delà des besoins directement alimentaires, la biomasse est utilisée pour cuire, se chauffer ou s'éclairer (torche, lampe à huile). La sédentarisation et les récoltes agricoles du néolithique ont fabriqué un « premier âge solaire », celui de la domestication d'une partie de la photosynthèse : la sédimentation du savoir, l'évolution des outils agricoles œuvrant à optimiser les rendements de production¹, comme nous l'avons vu au cours des temps II (#7) et III (#9).

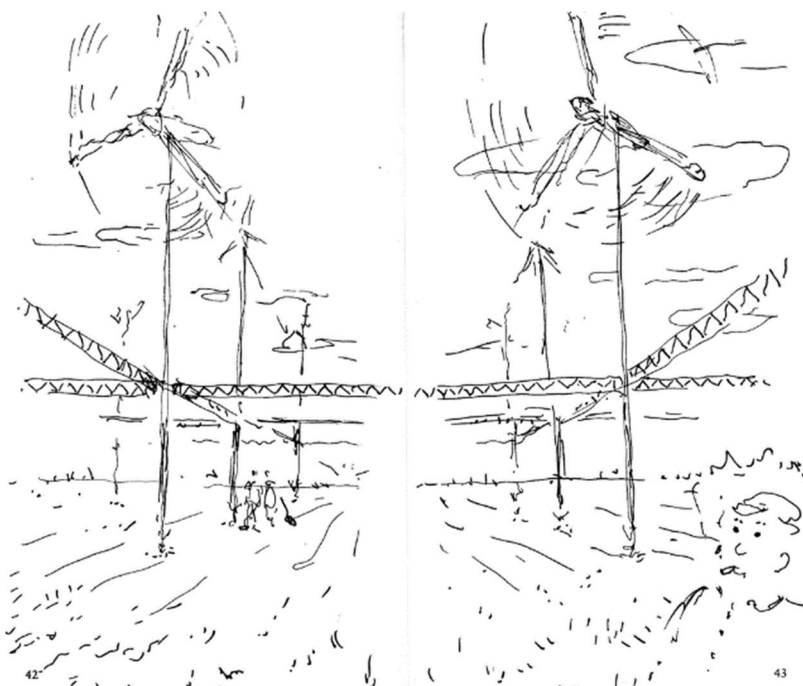


Fig. 187. *Et si on mixait davantage la production de biomasse et les architectures renouvelables ? Esquisse d'une recherche sur l'agro-énergie. Une structure légère de mâts éoliens, simplement articulés en pied et respectant à la fois les règles de prospect aéronautique propres à l'éolien et les contraintes de bonne exploitation agricole.*

¹ Les tours en bois des fêtes de la Saint-Jean ou Burning Man de façon contemporaine.

Matières

Production maraîchère

Pour nos besoins alimentaires, il faut composer avec la contrainte de l'aménagement du territoire¹ [3]. En situation urbaine, bien que le rendement rapporté en énergie primaire soit faible, cette production n'est pas à négliger par sa qualité² et par les externalités environnementales qu'elle réduit en favorisant l'auto-alimentation des ménages, la biodiversité ainsi que d'autres fonctions d'écologie urbaine³. [4]

« Une tonne de déchets alimentaires produit environ 85 mètres cubes de biogaz composé approximativement de 60% de méthane, le reste étant essentiellement du dioxyde carbone. »

Rendement max. < 0,1% flux solaire

Emprise minimale autonomie alimentaire⁴ [5] ~1000 m²/pers

Production de matériaux

Le bois comme matière à construire (Fig. 189) fera l'objet de développement spécifique dans la partie consacrée à l'architecture-matière, au temps VI (#17).

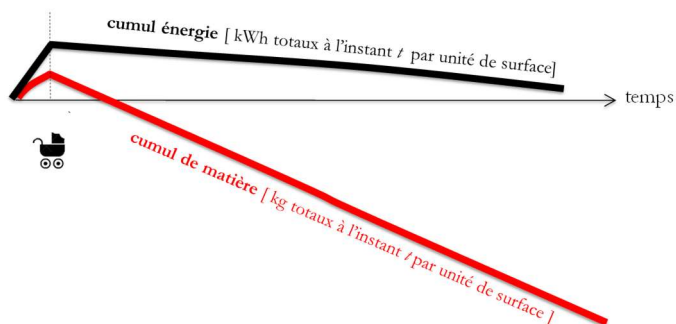


Fig. 189. Diagramme énergie-matière d'une production de biomasse.

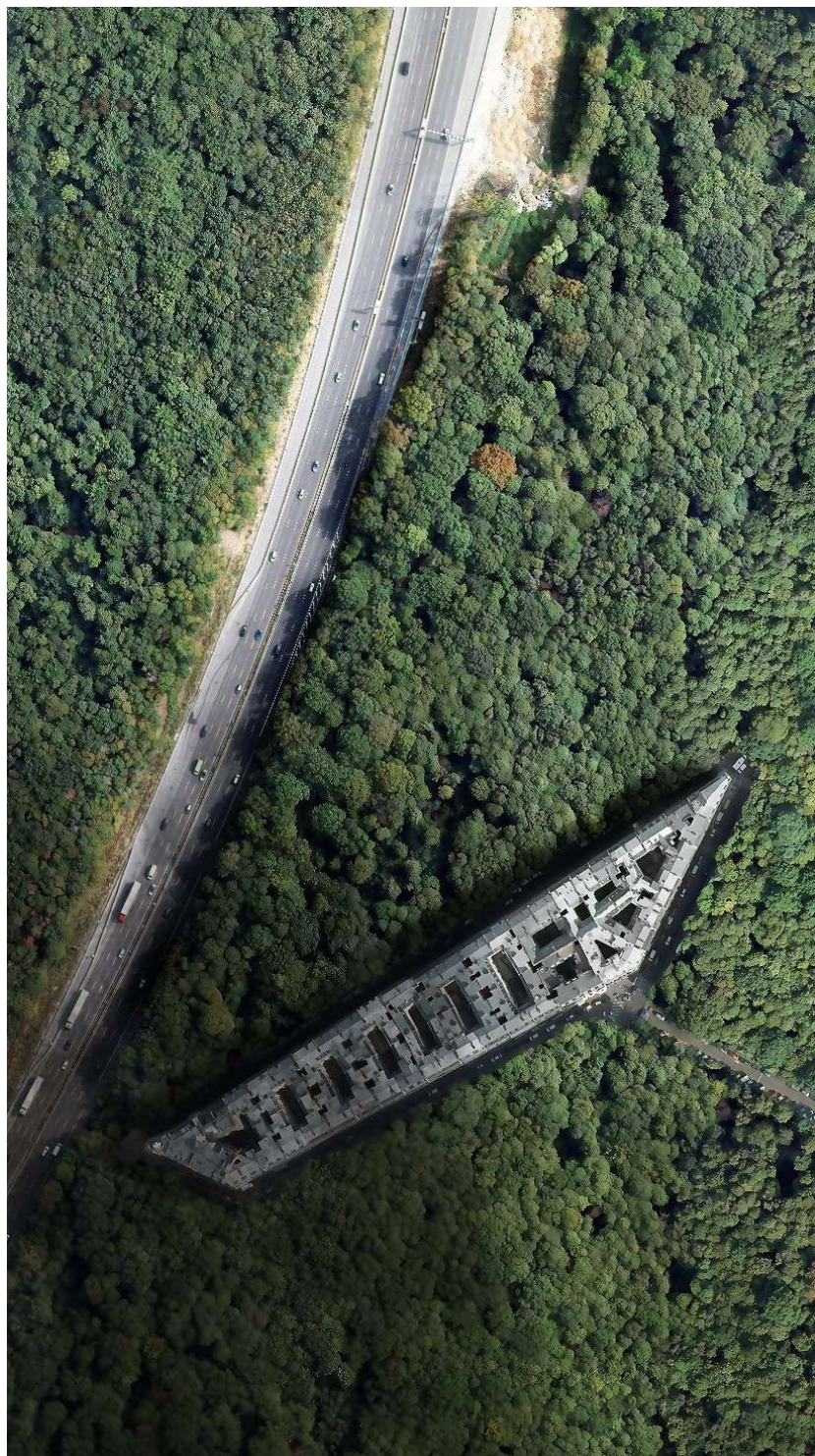
¹ David Mc Kay dans *L'énergie durable, pas que du vent*, évoque que la surface minimale par individu pour subvenir aux besoins alimentaires est de 1200m². Dans ce cas de figure, la densité maximale est nécessairement inférieure à 800 hab/km²

² Elle est en général comestible et c'est l'énergie essentielle à la chaîne alimentaire

³ Rétention d'eaux pluviales, rafraîchissement passif, ...

⁴ Agnès Sinaï qui cite Braudel et au 11^{ème} siècle, centre de 3000 habitants qui réclamait 8500km² de territoires agricoles soit près de 3000m² par personne.

Fig. 190. *Photomontage d'un îlot haussmannien inséré dans un océan de biomasse par Loouis Fernandes.*



Les solaires thermiques

Définition

Des productions de « basse qualité » énergétique

Première forme technique de l'énergie solaire directe, le solaire thermique. L'épithète « thermique » désigne la qualité énergétique de la production. Cette forme renouvelable produit uniquement de la chaleur (et parfois du froid) mais ni mouvement¹, encore moins de l'électricité. Le solaire thermique est en général dédié à la production d'eau chaude, parfois aussi pour le chauffage. Dans quelques situations, il peut aussi constituer une brique d'un système de climatisation solaire (on peut en effet faire du froid avec du chaud²). Historiquement, le solaire thermique a beaucoup évolué depuis les serres horticoles évoquées par John Perlin [6]. Cette technique de récolte est en général assez simple et rudimentaire. D'un point de vue thermodynamique, il faut peu d'efforts (au sens de l'ordonancement de la matière) pour capter la forme la moins qualitative de l'énergie, la chaleur à basse température.

Une relation très étroite à l'architecture

Dans *L'énergie solaire* [7], Benjamin Dessus et François Pharabod rappellent que l'histoire des capteurs à basse température a connu une grande évolution dans la seconde moitié du 18^{ème} siècle, pour donner suite aux travaux du physicien genevois Horace-Benedict de Saussure et la mise en évidence de l'effet de serre (Fig. 191). Avec l'emboîtement de ces boîtes isolées placées sous un panneau de verre, il parvient à dépasser les 110°C. John Perlin [6] rapporte l'histoire complète des boîtes solaires chauffantes entre 1767 et 1800 dans le chapitre 6, partie 1, de son *Let it Shine*. D'un point de vue physique, le « photon solaire », dont la fréquence est située entre l'infrarouge et l'ultra-violet en passant par le visible, transfère son énergie électromagnétique à la matière, en créant une excitation moléculaire ou cristalline du matériau frappé et qui aurait absorbé ce rayonnement.

Un exemple avec Un acier héliotrope

Il s'agit d'un projet primé lors d'un concours d'idées *Architecture et structure en acier* en 1999. Avec Olivier Legrand, nous avons proposé un « parasol héliotrope » pour la terrasse d'un restaurant du parc de Saint-Cloud (Fig. 192). Ce projet est resté au stade d'esquisse et tentait de mimer le comportement de certains organismes vivant à la lumière. Les tournesols, et les plantes en général, s'orientent vers le soleil afin d'optimiser leur apport énergétique. Le monde animal synchronise son métabolisme avec les rythmes circadiens. La genèse de l'idée résidait dans le constat suivant : l'acier peut convertir le feu solaire en force mécanique, de façon purement mécanique. L'intention consiste à doter une masse apparemment inerte de

¹ De l'énergie mécanique ou de l'électricité

² Climatisation à absorption ou adsorption mais suppose en général l'emploi de tubes sous vide.

Fig. 191. *La boîte solaire par Saussure*

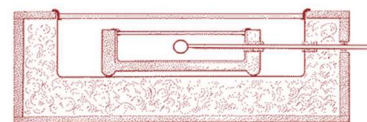


Fig. 192. *Image du projet un Acier Héliotrope. Une architecture mobile, amplifiant la dilatation thermique de l'acier par l'action du feu solaire.*

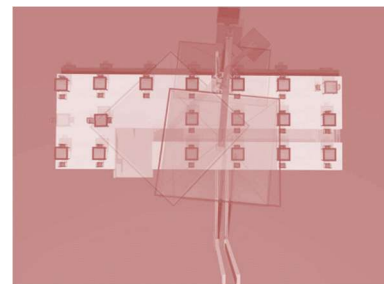
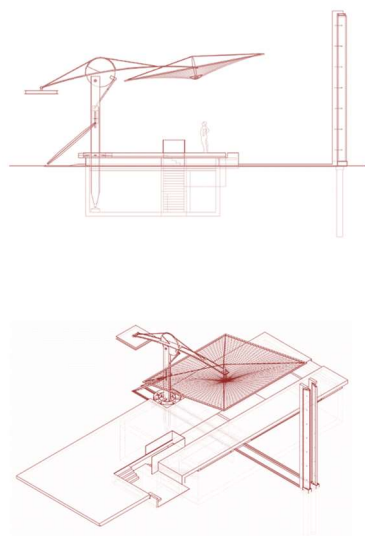


Fig. 193. *Quelques images du projet un Acier Héliotrope. Une architecture mobile, amplifiant la dilatation thermique de l'acier par l'action du feu solaire.*



ce réflexe fondamental, symptôme de vie. La matière est sensible et réagit à l'énergie lumineuse. La couleur est une de ces expressions. L'agitation atomique est une autre manière de dissiper l'énergie reçue ; le projet consistait en partie à canaliser ce « bruit », cette expression brouillonne de la matière à la lumière. À l'instar du monde vivant qui parvient à interpréter cette énergie, la structure recevra à la fois de l'énergie et de l'information.

La logique du projet empruntait une démarche volontairement minimaliste. Deux axes orthogonaux dont les formes épurées s'imbriquaient et signalaient les quatre points cardinaux. La course du mobile se positionnait par rapport à la dalle à l'image de l'ombre de l'aiguille d'un cadran solaire. Le principe cinématique se décomposait en deux parties : en premier lieu, un capteur – essentiellement constitué d'une lame d'acier – qui recevait l'énergie solaire et la transformait en travail mécanique.

Ce capteur était composé de deux « voies » : l'une recevant la lumière sud-est, l'autre celle du sud-ouest. Ensuite, un dispositif cinématique interprétait ces deux déplacements pour la dispenser à un mobile, en démultipliant le mouvement par deux presses hydrauliques. Il constituait le maillon final de cette chaîne cinématique et devenait l'expression du dialogue avec le soleil. Ce projet était une architecture-machine, sorte d'héliostat autonome et *low tech*, anticipateur de réflexions à venir.

La basse température, en-deçà 50°C

Le solaire passif et l'architecture solaire

Sans la sophistication mécanique de l'Acier Héliotrope, le solaire passif est la voie triviale et royale de l'architecture-énergie. Cette catégorie de production solaire fait l'objet d'un chapitre dédié (chapitre #15). Elle concerne en effet principalement la valorisation énergétique du flux solaire dédié à la chaleur et à l'éclairage des espaces couverts. Elle implique au premier chef les questions architecturales mais aussi urbaines, étant vu les enjeux de prospect soulevés par la course solaire et la disponibilité en lumière naturelle.

D'autres basses températures

Dans un registre moins visible, infrastructural et souterrain, nous pourrions à nouveau citer les puits canadiens et leur statut hybride entre énergie géothermique et énergie solaire (chapitre #10), à l'interface entre deux branches de l'arborescence des énergies primaires. De façon paysagère, et souvent placées à proximité des bâtiments, les « moquettes solaires » peuvent être également des systèmes très simples pour produire de l'eau tiède. Elles sont souvent utilisées pour le chauffage ou préchauffage des piscines collectives.

L'albédo des territoires et des architectures

Enfin, une autre valorisation de l'énergie solaire pour la basse température est associée à l'enjeu de l'albédo et de la capacité des formes urbaines à piéger le rayonnement incident et augmenter alors l'effet d'îlot de chaleur urbain... On pourra se reporter au projet de sol à albédo variable que j'avais initialement proposé dans le cadre du schéma directeur du campus Artem à Nancy, puis développé ensuite avec Elioth à Lyon Part-Dieu. Cette expérimentation est plus largement présentée dans la troisième partie (chapitre #27). L'albédo possède aussi une relation étroite avec les problématiques de réchauffement climatique, en participant ou non au forçage radiatif terrestre.

Moyenne température, autour de 100°C

Les capteurs solaires thermiques

Si l'on franchit un palier d'exigence en termes d'exigence de température produite, les architectures de production bifurquent. La phylogénèse des architectures et de sous-composants révèle d'autres familles typo-techniques. Pour Perlin [6], le premier chauffe-eau solaire commercial, permettant d'atteindre des températures supérieures à 65°C, date de 1891. Le capteur solaire thermique typique est simple et robuste. Il autorise généralement un rendement de conversion important mais il ne produit qu'une chaleur à faible et moyenne température (moins de 100°C). Le solaire thermique est en général destinée à une consommation directe sur le site de production, quoique certains réseaux de chaleur utilisent parfois des panneaux solaires thermiques pour une partie de leur production. En Floride, au début des années 1950, près de 80% des habitations étaient équipées de chauffe-eau solaire [8]. Au Japon, Singh indique que plus de cinq millions de chauffe-eau solaire ont été installés dans les années 1980 [4]. Ce composant de l'architecture possède toutes les qualités pour un déploiement beaucoup plus massif.

Géométrie à optimiser

Sous nos latitudes, son intégration architecturale est relativement aisée bien que son orientation optimale soit moins triviale que pour le photovoltaïque. Du fait de la nécessité de l'autoconsommation, l'inclinaison des panneaux tache d'optimiser l'adéquation offre-demande. D'où en général sous nos latitudes, des inclinaisons plus élevées que pour les panneaux photovoltaïques : on cherche à récolter aussi le soleil en hiver au moment d'une demande de chaleur importante ; *a contrario*, on évite une surproduction de chaleur estivale. La création d'une boucle chaude pour le fluide calorporteur, souvent de l'eau avec parfois de l'antigel, rend moins facile son interface avec le bâti. Un réseau secondaire d'eau est à créer, qu'il est nécessaire de calorifuger pour éviter les pertes (et donc limiter la chute du rendement net) ; il faut aussi veiller aux problématiques de gel potentiel en situation hivernale. Lors d'un voyage familial en Turquie, j'étais fasciné par la quantité d'équipements informels associés à la plupart des constructions isolées (Fig. 194) :

Fig. 194. Turquie, Cappadoce. Août 2015. Du solaire thermique sur tous les toits : logements récents, maisons anciennes, tous. Toute l'eau chaude sanitaire ne semble être produite que par le soleil dans cette région de la Turquie.



« Turquie, Cappadoce. Août 2015. Du solaire thermique sur tous les toits : logements récents, maisons anciennes, taudis. Toute l'eau chaude sanitaire ne semble être produite que par le soleil dans cette région de la Turquie. Des bidons droits bricolés avec son petit cylindre d'expansion à ses côtés. En plus récent, des tubes sous vide associé à un cumulus horizontal. Cela fait bien deux-trois mètres carrés de panneaux par toit (et disons 60 mètres-carrés par toit). Cela fait cinq pour cent de ma captation géométrique. Et à environ 40% de rendement, les toitures turques convertissent donc 2% du gisement solaire horizontal : c'est déjà bien. Dans cette région, le flux doit sans doute être supérieur aux fameux $169W/m^2$. Voilà donc des maisons à $3W/m^2$, bricolées par des plombiers inventifs et une culture partagée du système solaire efficace, rudimentaire et facilement réparable. »¹

La production d'eau chaude

Le solaire thermique apporte souvent une participation à la production d'eau chaude sanitaire ; de façon moins courante, à la production de chauffage. Les panneaux solaires à thermosiphon sont notamment très largement diffusés dans les pays à fort ensoleillement : Grèce, Israël, Afrique du Sud, ... John Perlin [6] développe deux chapitres autour de cette industrie solaire florissante entre 1923 jusqu'aux années 1960. Singh [4] précise qu'en Israël une loi exige que des chauffe-eaux solaires soient installés sur tout immeuble inférieur à huit étages. Selon le type de technologie², l'écart de température maximum est inférieur à $100^{\circ}C$. Il faut garder en tête que le rendement des panneaux est décroissant avec la température finale désirée. Le rendement des panneaux est étroitement associé aux qualités de la couche transparente extérieure et de la qualité de son couple isolation et transmission énergétique : elle partage en cela la même problématique que le solaire passif (chapitre #15).

Capacité collective

Ce type de récolte peut être intégré dans des réseaux d'énergie de petite dimension comme des réseaux de chaleur à l'échelle de l'ilot ou du quartier. Le solaire thermique peut en particulier très bien se marier avec le stockage intersaisonnier³. Par la nature de son offre, la chaleur, son stockage est également relativement aisé : un parc solaire thermique couplé à un silo à chaleur peut être définitivement une option pour tout projet (Fig. 195).

Fig. 195. *Le Duc de Lille comme illustration de l'intégration à échelle urbaine de l'efficacité redoutable de la conversion du soleil en basse chaleur (dessin Diane Berg)*



¹ <https://raphaelmenard.tumblr.com/>

² Tubes sous vide, panneaux thermiques derrière vitrages isolants, moquettes solaires, ...

³ Voir le numéro d'octobre 2013 de la revue *Systèmes Solaires*.

Un exemple, la reconversion du Château d'eau à Montreuil

Ce fut la démonstration que nous proposons à Montreuil-sous-Bois, dans le quartier du Bel-Air, pour un château d'eau en béton construit en 1936, qui n'était plus exploité par le Syndicat des Eaux d'Ile-de-France depuis le début des années 2000. C'était dans ce contexte que, fin 2008, Elioth avait répondu à l'appel à idées lancé par la ville de Montreuil pour la valorisation de l'ouvrage en proposant une idée originale : transformer ce réservoir d'eau potable en un « cumulus » urbain stockant l'énergie thermique d'origine solaire et la distribuant l'hiver pour les besoins en chauffage du quartier. Ce principe, d'une grande simplicité, était pourtant le premier du genre : sans support existant, l'idée du stockage aérien se heurtait jusque-là aux coûts de construction du réservoir et de sa structure porteuse. Il suffisait d'implanter une boucle de circulation d'eau chaude pour alimenter la chaufferie principale du quartier, située à cent mètres du château d'eau. En termes d'efficacité et de performances, les résultats de l'étude étaient prometteurs. L'intégration sur le réservoir de 500 m² de capteurs thermiques associés au stockage du château d'eau permettaient de couvrir les deux tiers des besoins en chauffage des 65 futurs logements construits dans le quartier et d'alimenter près de la moitié des besoins en eau chaude sanitaire de plus de deux cents autres logements réhabilités. Grâce à la quantité et à la compacité du volume d'eau contenu dans le réservoir, un niveau d'isolation équivalent à celui d'un bâtiment neuf était suffisant pour maintenir l'eau à haute température (70 °C) jusqu'en hiver (Fig. 196).

Une très haute densité de production

Composant potentiel d'une peau architecturale, le panneau solaire thermique est extrêmement efficace d'un point de vue énergétique. Son rendement typique de conversion est compris entre 35 et 50%. Les panneaux composés de tubes sous vide possèdent des rendements qui tutoient même les 80% de conversion. Autrement dit, dans certaines situations, un panneau solaire thermique peut délivrer entre 350 et 800 watts thermiques par mètre-carré. Dans son inventaire des flux qu'est *Power Density*, Smil [9] relève de fait et met en avant l'incroyable densité de production énergétique du solaire thermique. Cependant, à l'échelle globale, Mauthner et Weiss (2013) ont estimé une surface cumulée de 383 millions de m² installés dans le monde associé à une densité moyenne de 67 watts thermiques par m². En comparant ces dernières valeurs aux 206 watts par m² moyens des sols sur lesquels nous habitons, cela correspond à un rendement moyen équivalent de 33%. Le flux global équivaut à 26 GW_t, soit à peine plus de trois watts-thermiques (W_t) par personne en moyenne. Il est évident que cette technique de production de basse chaleur est très largement sous-utilisée, alors qu'elle est extrêmement rudimentaire, simple à entretenir et à réparer et qu'une grande partie des besoins thermiques humains pourraient être assurés par ces technologies extrêmement simple. Le solaire thermique pourrait assurément contribuer plus largement à l'urgente « resolarisation » du mix global : nous en parlerons plus au cours du temps V (#16).

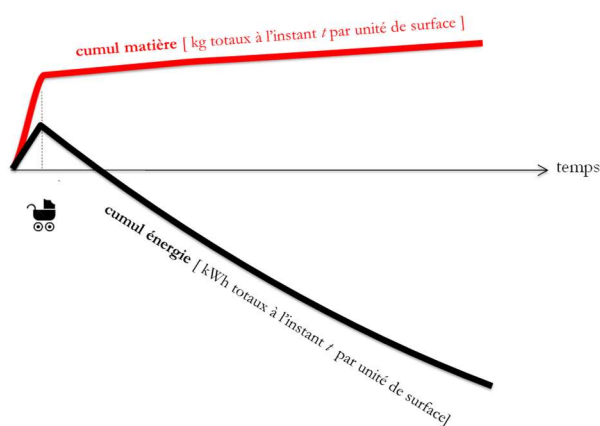
Fig. 196. Illustration du Château d'eau du quartier du Bel-Air à Montreuil, reconverti en pile thermique urbain.



D'autres valorisations énergétiques

Les technologies les plus avancées de panneaux solaires thermiques (les tubes sous vide en particulier) permettent de dépasser les 100°C et il est alors envisageable de coupler cette production à une machine thermodynamique (à adsorption ou à absorption) autorisant la production de froid et donc d'une climatisation solaire. La chaleur solaire peut aussi être utilisée pour la distillation de l'eau ou le séchage.

Fig. 197. Diagramme énergie-matière pour le solaire thermique (à l'échelle d'un panneau solaire thermique ou encore du rendement net d'une transparence pertinente dans une architecture)



Synthèse énergie-matière

Type de production énergétique

Type de production	Chaleur
Température	30°C à 110°C
Rendement de conversion	45% à 80%
Production énergétique typique	400 à 500kWh/m ² .an
Stockage de la chaleur à basse température	Assez aisé

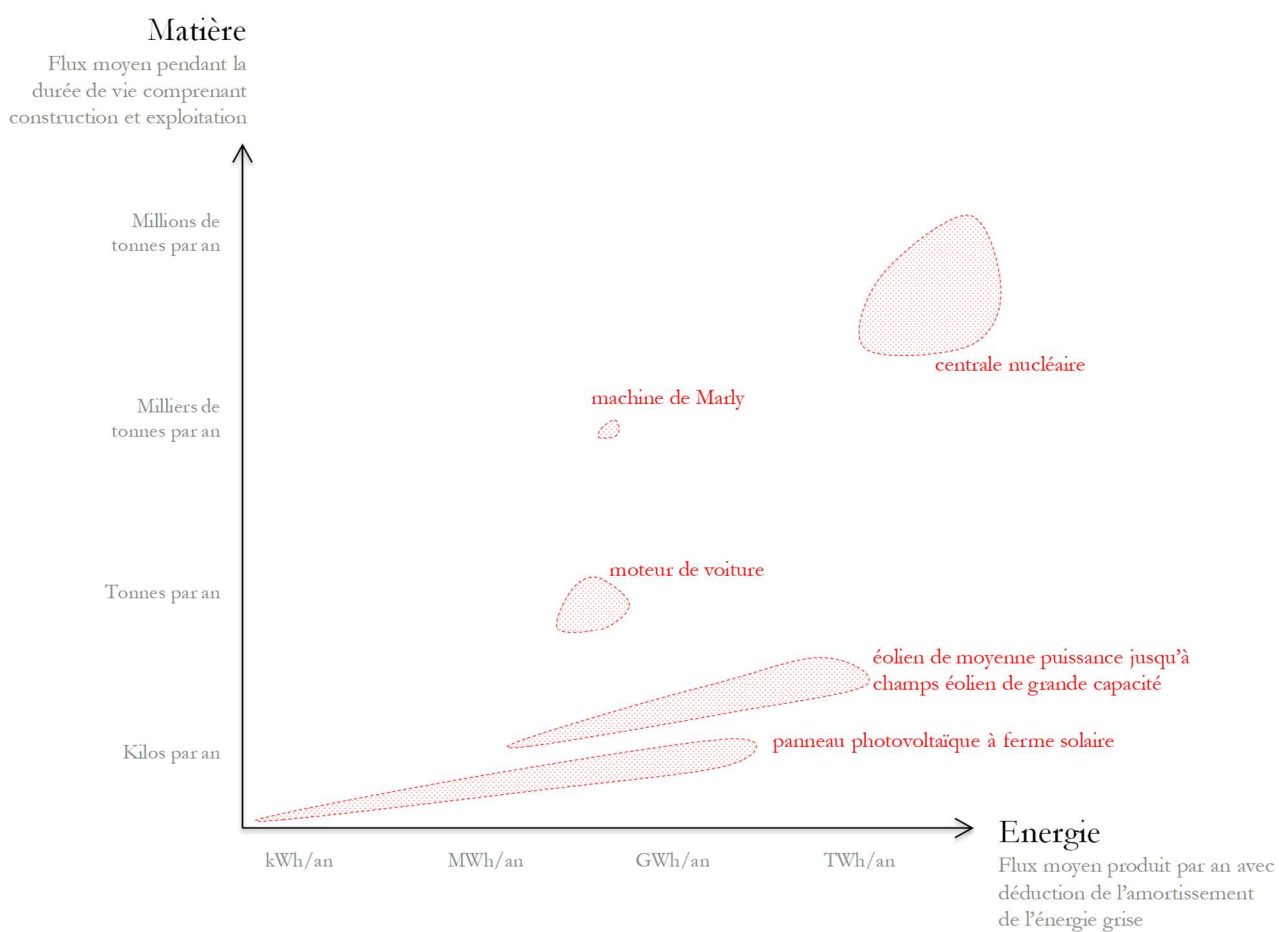
La matière pour le collecter

Matériau transparent ou translucide
Tuyaux de cuivre ou de plastique
Matériau réfléchissant éventuellement
Isolant

Bibliographie

1. MENARD Raphaël et al., *Reforme, rapport final de recherche*, programme Ignis Mutat Res, 2014
2. MENARD Raphaël et al., *Les infrastructures solaires urbaines, 2050, sous le soleil exactement*. Cours donnés dans le cadre de l'atelier de master. Synthèse des quatre projets rendus par les équipes d'étudiants et dix fascicules des cours associés à l'atelier autour des questions de futurs, de formes et d'énergie. EPFL, 2015.
3. MAC KAY David JC., *L'Énergie durable, pas que du vent*, Oxford, De Boeck, 2012. Titre original: *Sustainable Energy - Without the hot air*. Cambridge, UIT Cambridge, 2009
4. SINGH Madanjeet, *L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature*, Unesco France Loisirs, 1998
5. SINAÏ Agnès, SZUBA Mathilde, Chapitre 7, « Pour un aménagement permaculturel des territoires », *Gouverner la décroissance. Politiques de l'Anthropocène III*, Sciences Po Les Presses, 2017
6. PERLIN John. *Let it Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy?* New World Library, 2013
7. DESSUS Benjamin, PHARABOD François, *L'énergie solaire, Que sais-je?*, 2002
8. BONNEUIL Christophe, FRESSOZ Jean-Baptiste, *L'Événement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Seuil, 2013
9. SMIL Vaclav, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015

Fig. 198. *Diagramme énergie-matière*



#12 L'architecture des fossiles (temps IV.1)

Un épisode en trois séquences : depuis l'apparition des énergies fossiles, jusqu'au règne des énergies et matières non renouvelables, jusqu'à la mise en doute de la Modernité.

Étendue temporelle :

- 1670 *Naissance de l'industrie du verre plat en France*
- 1708 *Création de la première machine à vapeur par Newcomen*
- 1742 *Premier poêle Franklin*
- 1779 *Premier pont en fer à Coalbrookdale, Angleterre*
- 1784 *Brevet de la machine à vapeur par James Watt*
- 1818 *Publication par Vicat de sa méthode pour le ciment*
- 1820 *Début de la ventilation mécanique dans les grands édifices*
- 1820 *Théorie du cycle thermodynamique par Sadi Carnot*
- 1824 *Brevet pour le ciment « Portland »*
- 1830 *Invention et commercialisation des turbines hydrauliques*
- 1847 *Concept d'énergie formalisé par Helmholtz*

Énergies nouvelles :

Charbon

Matières nouvelles :

Fonte

Acier

Ciment Portland

Cas d'études :

Un appartement haussmannien

L'émergence des fossiles

Date de naissance de l'Anthropocène

Une architecture en amont de la révolution

Dans la préface à l'édition française de *Something New under the Sun* [1], son auteur, John R. Mc Neill écrit :

« Lorsque j'ai commencé à travailler sur ce livre au début des années 1990, je pensais que l'élément qui avait le plus fortement marqué l'histoire environnementale mondiale du 20^{ème} siècle avait été l'accroissement de la population. Lorsque j'eus achevé ce travail, mon opinion avait changé, et c'est le système énergétique basé sur les énergies fossiles que je considérais comme la variable essentielle dans l'histoire environnementale moderne ; j'ai tâché de souligner son importance dans ce livre. Je pense maintenant, dix ans plus tard, que si c'était à refaire, j'insisterais plus encore sur les énergies fossiles. »

En ce début de troisième millénaire, nous vivons une époque singulière de notre épopée humaine, en partie liées aux transformations irréversibles opérées par notre présence sur Terre, et ce essentiellement depuis deux siècles, et ce que l'on a coutume d'appeler les révolutions industrielles (Fig. 199). En 2000, le chimiste de l'atmosphère et prix Nobel de chimie, Paul Crutzen a popularisé l'expression d'*Anthropocène* pour caractériser ce basculement. 1784 est pour Crutzen l'avènement de cette nouvelle ère et il choisit la date du dépôt de brevet de la machine à vapeur par James Watt comme *point zéro* de ce nouveau calendrier. Ce départ correspond à la capitalisation d'un support immatériel (un brevet), de la description d'un savoir technique nouveau, d'une architecture innovante de la matière permettant une certaine transformation de l'énergie. Ce *point zéro* est un code, sorte de formule magique pour générer une « nouvelle espèce » de machines dont la population va rapidement envahir les continents.

Fig. 199. Photo Bernd et Hilla Becher

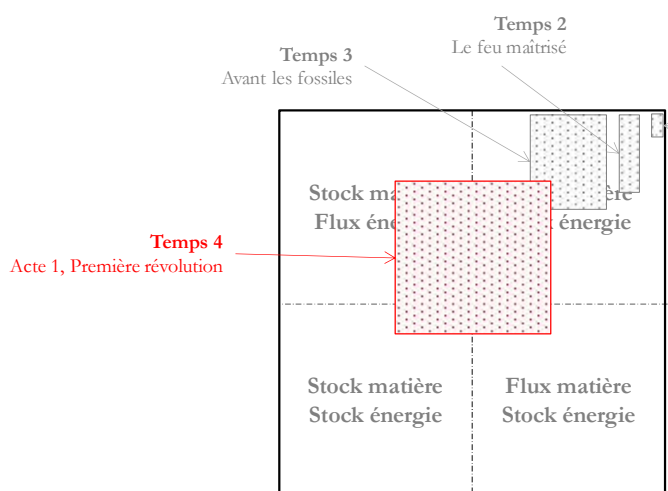
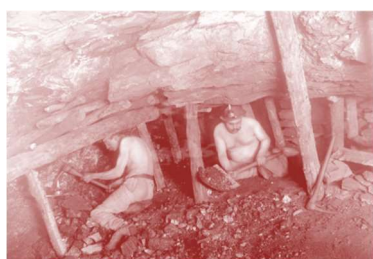


Fig. 200. Première partie du Temps 4 (entre 1750 et 1850) : le début de la « désolarisation » du monde et la plongée dans une première transition vers le charbon. L'émergence et le développement de la chaleur à haute température et la naissance de l'ère thermo-industrielle.

Dans l'avant-propos de *L'évènement Anthropocène* [2], ses auteurs, Christophe Bonneuil et Jean-Baptiste Fressoz complètent :

« Penser l'Anthropocène, c'est entendre les données et les modèles des sciences du système Terre qui nous annoncent, de façon plus en plus certaine, un dérèglement à l'échelle des temps géologiques qui bouleversera radicalement les conditions de l'existence humaine [...]. C'est prendre la mesure de la force tellurique de l'industrialisation et de la marchandise, qui a fait dérailler la Terre au-delà de ses paramètres stables de l'Holocène, et de la nécessité de donner des fondements matériels différents à nos libertés ; c'est mobiliser de nouvelles humanités environnementales et de nouvelles radicalités politiques (mouvement du bien vivre, des biens communs, de la transition, de la décroissance, et bien d'autres) pour sortir des impasses de la modernité industrialiste. [...]. »

Fig. 201. *Mine de charbon, 19^{ème} siècle.*



Un virus local

Toutefois, dans *L'anthropocène contre l'histoire* (2017), Andreas Malm [3] dément la dimension universelle et ontologique de l'Anthropocène, le déclenchement d'une nouvelle ère qui serait la responsabilité globale de la totalité des *homo sapiens*. Pour Malm [3], cette mise à feu des énergies fossiles est d'abord le fait d'une poignée d'individus. Le basculement dans l'ère du capitalisme fossile a d'abord débuté au sein d'un petit territoire, la Grande Bretagne, au cours du 19^{ème} siècle, et à l'initiative de quelques hommes, les détenteurs des moyens de production de l'époque. Ou encore d'autres hommes de pouvoir, les militaires comme le rappellent aussi Bonneuil et Fressoz [2] :

« Durant les guerres napoléoniennes, les gouvernements européens portent un intérêt accru au charbon. La multiplication des fonderies de canons accélère le développement des mines. En France, le cadre légal est simplifié, le droit des concessionnaires renforcé et l'État finance la prospection minière à grande échelle. »

Le feu du charbon possède un lien double avec la matière. Il permet de couper court aux pénuries et aux tensions récurrentes du bois-énergie. Il autorise un saut d'échelle dans la production de matières industrielles, et devient un puissant allié pour l'accumulation de richesses (Fig. 201). L'effet papillon engendrée par certaines minorités au cours de l'histoire a quelques résonances contemporaines, avec l'exemple récent de l'élection improbable de Donald Trump en 2016 n'a été possible que par un écart de voix très faible par rapport à son adversaire. Dans un proche futur, nous méditerons sur les choix de quelques *red necks* et de leurs conséquences indirectes sur le réchauffement climatique global. Nous en mesurerons plus tard les effets, après la remise en cause de l'Accord de Paris en 2017 par Trump.

L'énergie exosomatique

À l'origine du règne des fossiles, Singh [4] rappelle que pour servir l'exploitation d'une seule houillère, il fallait au moins cinq cents chevaux pour évacuer l'eau, soit l'équivalent de 300kW de puissance mécanique, en retenant une valeur moyenne de 600 watts par cheval de trait (chapitre #7). La première machine à vapeur de Thomas Newcomen sera l'allumette de la révolution. En 1784, Newcomen parvient à transformer le mouvement linéaire du piston en un mouvement rotatif. Dorénavant, on peut pomper l'eau hors des mines mais aussi actionner des roues pour l'industrie ou le transport. Après quelques décades¹, une transition massive est en marche. Olivier Rey [5] relate l'arrivée du jeune Engels à Londres, en plein milieu du 19^{ème} siècle, subjugué par cette modernité :

« Je ne connais rien qui soit plus imposant que le spectacle offert par la Tamise, lorsqu'on remonte le fleuve depuis la mer jusqu'au London Bridge. La masse des maisons, les chantiers navals de chaque côté, surtout en amont de Woolwoch, les innombrables navires rangés sur le long des deux rives, qui se serrent de plus en plus étroitement les uns contre les autres et ne laissent finalement au milieu du fleuve qu'un chenal étroit, sur lequel une centaine de bateaux à vapeur se croisent en pleine vitesse – tout cela est si grandiose, si énorme, qu'on en est abasourdi et qu'on reste stupéfait de la grandeur de l'Angleterre avant même de poser le pied sur son sol. »²

Le départ du capitalisme fossile

Avant le ravissement d'Engels, à la fin du dix-huitième siècle, l'humanité connaît en fait une double transformation. D'un côté, le début de l'extraction et de l'utilisation massive du charbon, point de départ de révolutions majeures, qui impactera simultanément la relation à l'énergie et à la matière. D'un autre côté, une invention juridique, la création d'un code immatériel, presque une sorte de programme logicielle, à l'instar du brevet de Watt : l'avènement juridique de la *personne morale*, la création d'un nouvel individu légal, l'entreprise. Sa genèse est narrée dans l'excellent documentaire *The Corporation* [6]. Comme une personne physique ou une famille, l'entreprise peut stocker des capitaux, elle peut les convertir pour produire des biens et des services à partir également du travail et des ressources environnementales. Cet individu juridique est programmé avec une ligne de code excessivement simple : maximiser les dividendes des actionnaires (Fig. 202). Le documentaire d'Abbott et Achar [6] soutient que son comportement s'organise d'abord selon cet objectif déterminant.

Fig. 202. *The Corporation et l'émergence de la « personne morale »*



¹ Fressoz et Bonneuil évoquent la charnière des années 1825 en Grande Bretagne

² La situation de la classe laborieuse en Angleterre.

L'accélération de l'architecture

Nous verrons au cours des chapitres relatifs à l'« architecture fossile » (au chapitre #14), comment le charbon puis ensuite le pétrole seront les mamelles fondamentales de la déferlante de puissance de ce nouvel individu économique, l'entreprise fossile, *Akira* du 19^{ème} et 20^{ème} siècle. Ce capitalisme engendrera un asservissement gigantesque de la manne de travail, comme par exemple les concentrations massives de travailleurs dans les mines. Ces nouvelles hautes densités humaines seront les étincelles de multiples révolutions culturelles, sociales et politiques. Ce sera le départ de feu du capitalisme fossile, le tourbillon, le tempo frénétique de la modernité.

Les progrès majeurs du savoir

Sur l'élan de la Renaissance et de l'âge classique relaté par Foucault dans *Les mots et les choses*, l'inflation du savoir accélère aussi. L'âge du charbon renforce les structures étatiques et catalyse la constitution de groupes industriels importants : les Krupp, les Wendel, Cet âge de la machine est aussi l'époque de la démocratisation de l'enseignement. Selon le prisme cybernétique, l'humanité paraît consommer davantage d'énergie pour accélérer sa production de connaissances et d'informations. Dans *Le classement mode d'emploi* [7], j'insistais sur le changement de taille des lieux de savoir, sur l'industrialisation des espaces du classement de la mémoire (Fig. 203) :

Fig. 203. *Mise en abîme au sein d'une bibliothèque. Dessin réalisé pour le Le classement mode d'emploi [7]*



« Après l'Encyclopédie, après le Jardin des Plantes, l'esprit philanthropique de la Révolution Française ouvre au public l'espace du livre. Deux siècles auparavant, Mazarin avait ouvert la bibliothèque royale une fois par semaine au public (§55) Les besoins accrus d'éducation et d'information suscités par le développement industriel et économique du début du 19^{ème} siècle donnent l'occasion au livre de se donner lui aussi en spectacle. [...] La mutation de la bibliothèque, d'espace réservé, à lieu public se manifeste également dans la transformation de son caractère sacré à des intentions utilitaires. Les archétypes de bibliothèques publiques empruntent aux hôtels, aux premiers grands magasins. Depuis Juan de Herrera et sa bibliothèque de l'Escorial en 1863, les volumes sont placés dans des rayonnages alignés sur les murs. Au 19^{ème} siècle, l'industrie naissante et triomphante étale sa production de manière organisée sur les étagères d'*Au Bonheur des Dames*. Comme dans le roman de Zola, la bibliothèque de Baltimore en 1857 se déploie sur cinq étages. Pour le magasin des livres de la Bibliothèque Nationale, Labrousse traite les magasins comme un lieu industriel : caillebotis pour les passerelles, grilles à claire voie pour les planchers. La bibliothèque publique devient alors un centre de diffusion plus qu'un lieu de conservation. »

Le début de la « désolarisation »

Au-delà de l'effet de manne, il est évident que la transformation rapide du système énergétique vers le charbon était largement due à la tension sur la disponibilité de la matière bois-combustible. Dès 1709, Singh [4] rappelle qu'avec la diminution des réserves de bois, on commençait alors à substituer le coke, extrait de houille, à la production de charbon de bois.

En 1800, il n'existe encore pourtant que cinq cent cinquante machines à vapeur contre un demi-million de moulins à eau en Europe. La diffusion de la machine à vapeur, la substitution de la combustion du bois à celle du charbon dans les foyers, ces deux évolutions s'opèrent tout au long du 19^{ème} siècle. Dès 1900, l'humanité est fortement « désolarisée » et commence à dépendre pour moitié de son approvisionnement énergétique du charbon. Dans leur article sur les transitions énergétiques de Paris, Eunhye Kim et Sabine Barles [8] pointent 1860, comme date de bascule entre le bois et le charbon (Fig. 204).

« Toujours selon l'analyse de Kim et Barles, le mix primaire passe de 100% bois de chauffe en 1800 à un mix quasi-exclusivement fourni par le charbon en 1900. Pendant ce siècle, la demande énergétique se sera donc presque totalement désolarisée. Aux environs de 1860, le mix était alors à moitié issu de l'offre (bois de chauffe) et pour l'autre moitié issu des stocks (charbon). En exploitant les sous-sols carbonifères du Nord, la distance moyenne des intrants primaires croît alors à près de 300 kilomètres. La consommation individuelle primaire reste relativement stable pendant cette période. À l'orée de la Modernité et avant la découverte de nouvelles demandes énergétiques (les transports, l'éclairage...), le Parisien est encore compatible avec une « Société à moins de 1000W ». [...] » [9]

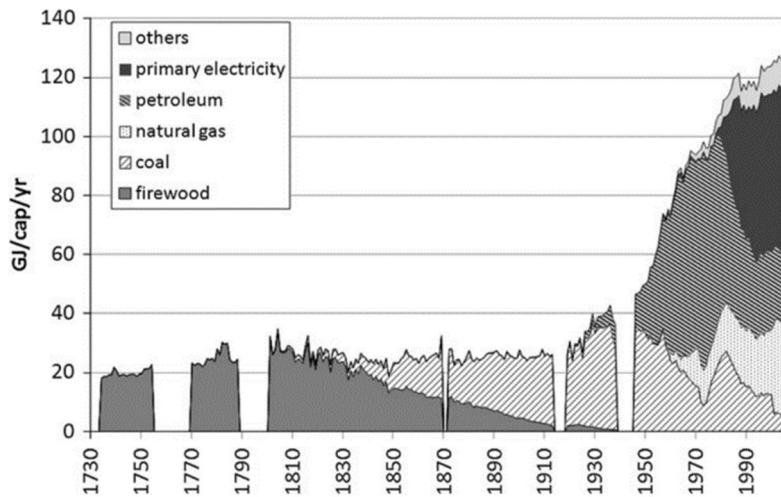


Fig. 204. Extrait du papier de Kim et Barles. Dès le début des années 1800, le charbon se substitue progressivement au bois, sans conséquences jusqu'au début des années 1900 sur la demande primaire par individu. Au tournant des années 1850, la part renouvelable parisienne était déjà passé sous les 50%.

Nouvelles matérialités

La fonte et l'acier : se défaire de la dépendance au bois

La production du *pig iron* (la fonte brute) avait souffert de la pénurie de bois et on avait même assisté à un premier pic de production de cette matière. Dans *Power Density* [10], Smil cite Hammersley (1973), ce dernier précisant qu'au début du 19^{ème} siècle, 32 tonnes de bois¹ étaient nécessaires pour produire une tonne de *bar iron*. La rareté de la ressource énergétique induisait une réduction du flux de transformation d'un constituant important de cette nouvelle modernité, la fonte, le fer et l'acier. Sorte de *ying et yang* matière et énergie, charbon et acier entretiennent l'un l'autre leur expansion : le fer, la fonte et l'acier sont nécessaires à la construction des machines à vapeur utilisées dans les mines d'extraction du fer comme du charbon.

Métal et grande portée

Grâce au « trésor charbon », à sa large disponibilité, en Grande-Bretagne, en Allemagne, en France, les hauts fourneaux débitent les ingrédients de futures nouvelles recettes architecturales [11]. Les capacités mécaniques du métal (en résistance, en rigidité, en isotropie, en ductilité) permettent de générer de nouvelles prouesses en termes de portée et de taille (Fig. 205) : l'architecture peut commencer à grandir, voire à enfler, et de façon diffuse. La grande portée n'est plus l'apanage de maçonneries complexes, offertes uniquement aux palais, aux temples ou aux cathédrales. Franchir une dizaine de mètres, et bien au-delà, n'est plus la marque d'un espace singulier. Les commerces s'en emparent, les premières gares aussi.

Métal et ornement

L'architecture métallique suscite l'invention d'un nouveau vocabulaire ornemental. La précision du moulage à chaud autorise une modénature de haute précision, à des échelles de détails centimétriques, voire millimétriques. L'encastrement entre un poteau et une poutre est prétexte à l'ornement, à la recherche gracieuse pour enlever de la matière et mieux laisse filtrer la lumière. Cette nouvelle *venustas* (#5), ce supplément de temps, de matière, d'énergie et d'information est sans aucun doute l'expression d'une intention de pérennité : séduire et faire apprécier ce nouveau vocabulaire constructif pour sublimer et pérenniser son existence.

« 'Ce fut le plus beau jour de ma vie', aurait glissé à son entourage la reine Victoria lors de l'inauguration le 1^{er} mai 1851 du Crystal Palace. Il est vrai que cette immense cathédrale de verre aux arcs-boutants d'acier, aux rosaces métalliques a de quoi émouvoir le plus puissant des souverains en ce milieu de 19^{ème} siècle. [...] C'est le symbole de la modernité enfant déferlante. Les visiteurs s'enthousiasment pour toutes ces merveilles rassemblées, et particulièrement pour ces nouvelles et étonnantes machines rutilantes et bruyantes : locomotives, presses hydrauliques, imprimeries, fonderies ... Elles sont les premiers signes de

Fig. 205. *Le premier pont métallique a été réalisé en fonte, en Angleterre. Il s'agit de Iron Bridge, construit en 1779 par Abraham Darby III sur la Severn, à Coalbrookdale. Sa portée est de 30,5 m pour une longueur totale de 60 m, et il passe à 30 m au-dessus de la rivière.*



¹ Soit la libération d'environ 20 tonnes de CO₂ pour produire une tonne de *bar iron*, soit presque dix fois plus que les émissions associées à la production d'une tonne d'acier courant aujourd'hui.

l'âge d'or promis deux siècles plus tôt, celui d'un progrès technique permettant la transformation radicale du quotidien et inaugurant une nouvelle ère de prospérité. » [12]

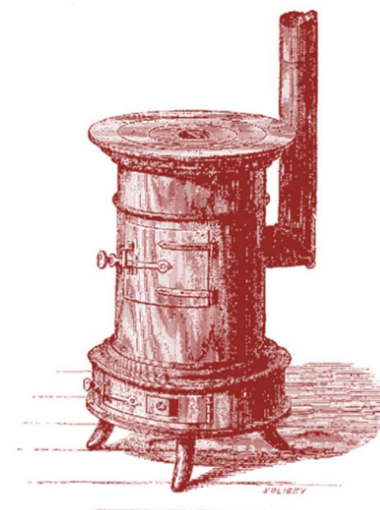
L'invention du poêle

Les progrès en science et plus particulièrement en thermique (et plus tard par les travaux de Fourier et sa *Théorie analytique de la chaleur* en 1822) permettent d'apporter des atouts considérables à l'efficacité énergétique, voici ce que rappelle Lisa Heschong [13] (Fig. 206) :

« Les plus grandes améliorations furent apportées par les Etats-Unis au 18^{ème} siècle. Le Comte Rumford entreprit de formuler une science de l'efficacité des cheminées ; il conçut une cheminée qui restituait vers la pièce un pourcentage plus élevé de sa chaleur. Benjamin Franklin eut une bien meilleure idée. Afin de contrôler le taux de combustion et pour isoler le gaz de combustion de l'air ambiant, il imagina une boîte métallique qui contenait le feu et que l'on pouvait ensuite déplacer vers le milieu de la pièce, la chaleur accumulée rayonnant alors dans toutes les directions. Le « poêle Franklin » fut l'équivalent du « Modèle T » de Henry Ford et fut produit en masse, faisant la fierté des familles de l'ensemble du pays. »

Ces améliorations allaient de pair avec les progrès en métallurgie pour la fabrication des poêles et la diffusion du poêle Franklin fut importante au cours du 19^{ème} siècle. Dans un diagramme de Sankey qui serait dessiné pour décrire le poêle Franklin entre la ressource primaire¹ et la demande finale², le poêle Franklin a été un redoutable instrument d'amélioration de l'efficacité thermique des logis. De fait le rendement d'une cheminée à foyer ouvert est de l'ordre de 10%, le poêle permettait de multiplier de trois à quatre ce rendement en autorisant des valeurs de l'ordre³ de 40%.

Fig. 206. Le poêle Franklin



Chronogramme d'un appartement du 19^{ème} siècle

Description

La base typologique : un bâtiment haussmannien

Lors du temps III (#9), nous avons estimé les flux et stocks d'énergie et de matière pour une petite construction typique. Pour ce premier épisode du temps IV, au moment de la première révolution industrielle, nous allons apprécier de façon analogue les flux et stocks d'un logement parisien, dans un immeuble haussmannien. En se basant sur les cahiers de l'Atelier Parisien d'Urbanisme, et plus particulièrement de leur cahier, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1851 et 1914*

¹ Le bois, la houille ou le charbon.

² La puissance thermique réellement délivrée.

³ Les pertes étant essentiellement liées à la température des fumées évacuées.

Fig. 207. Immeuble de rapport, rue de Châteaudun. Une coupe dans un immeuble haussmannien. [14]

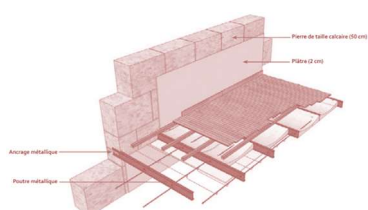
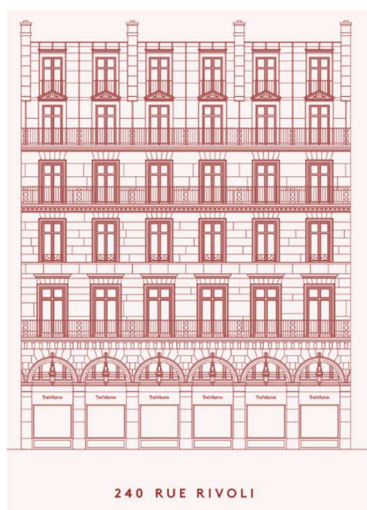


Fig. 208. Façades haussmanniennes redessinées par l'agence LAN pour l'exposition Haussmann au Pavillon de l'Arsenal en 2017.



[14], nous nous figurerons un appartement parisien de 1860 de type haussmannien¹.

Fiche-type

R+5 et comprenant des caves
Façades porteuses et façades sur cour souvent plus fines
Murs en pierre de taille de 40 cm à 50 cm environ
Pans de bois avec remplissage en maçonnerie de 25 cm à 30 cm d'épaisseur
Métal pour les éléments structurels
Menuiseries en bois et simple-vitrage
Ventilation naturelle
Toitures en double-pente en zinc ou en tuile
Comble à la Mansart en zinc et/ou en ardoise
Appartements généralement traversant
Pièces humides situées sur cour

Les prémices de la Modernité et de la gabegie énergétique

L'APUR précise qu'en 1850 seuls les cheminées et les poêles assurent le chauffage et souligne qu'avec l'arrivée des premiers systèmes de chauffage collectif dans les années 1870, la taille des ouvertures augmente, évolution de nature à rendre le bâtiment plus énergivore [14]. Cette interaction entre composant et architecture est un exemple intéressant des liens de causalités entre usages de l'énergie et matérialité de l'architecture. Dès la fin du 19^{ème} siècle, la disponibilité accrue des flux thermiques offrait déjà une plus grande liberté architecturale, en dépit des qualités de sobriété (Fig. 208). Dans les épisodes suivants du temps IV (#14), nous constaterons que ce « trait de caractère » de la Modernité s'amplifiera au cours du 20^{ème} siècle avec la généralisation d'enveloppes très peu efficaces d'un point de vue thermique, et ce, jusqu'aux premières crises pétrolières des années 1970. L'énergie coule à flot et l'architecture tend à se libérer de la contrainte énergie pour se concentrer sur les possibilités plastiques offertes par les nouveaux matériaux². L'APUR souligne dans son cahier [14] :

« Les techniques de construction de l'époque profitent de la baisse des coûts de production et des gains de temps dans l'acheminement des matériaux et dans la construction des bâtiments, grâce au développement de l'industrie, à l'apparition de nouveaux matériaux (métal, puis béton, pour les solives des planchers à la place du bois), aux débuts de la standardisation (mécanisation du sciage et du

¹ L'APUR rappelle que 29% du parc de logements actuels est constitué du bâti de cette période.

² Béton, acier, verre etc.

levage de la pierre de taille) et à certaines innovations techniques (nouvelles méthodes de cuisson pour obtenir des briques de meilleure qualité...). Les matériaux mobilisés dans la construction se sont diversifiés, avec notamment l'utilisation croissante de la fonte, puis de l'acier, ou encore du béton à partir de la fin des années 1860 (92 rue de Miromesnil, réalisé par François Coignet). »

Energie

Hypothèse des besoins finaux en chauffage

Si nous zoomons dans notre immeuble, nous nous figurons pour notre exercice, un appartement de trois pièces, de 40m², disposant de quatre fenêtres, dont une sur cour. Sa surface de façade en contact avec l'extérieur est de 20m². Ses quatre fenêtres fabriquent une surface cumulée de 6m² d'ensemble menuisé. L'APUR évalue la conductivité thermique des murs à 2 watts par m² et par degré¹ [14]. Pour ce qui concerne les baies vitrées, la valeur moyenne à considérer pour un simple vitrage serait² de 5W/m².°C. Notons une inertie thermique très intéressante, utile à la fois lors de la recharge en combustible³ comme vis-à-vis du confort d'été : l'architecture possède une mémoire thermique et elle adoucit les fluctuations, elle est une batterie énergétique à courte durée.

A contrario, les infiltrations parasites de l'air extérieur par les menuiseries peu étanches devaient être très élevées, comme d'ailleurs les jours entre les portes et les parties communes, ou encore les conduits de cheminée. L'étanchéité à l'air est médiocre et les critères de confort thermique étaient sans aucun doute différents de ceux d'aujourd'hui. Il aurait été possible d'effectuer quelques post-simulations sur la base du *ClimEliotb*⁴ sur la base de différentes températures de confort. Pour ce mémoire, nous nous baserons sur des premières évaluations simplifiées.

Une première approche de l'« élasticité énergie-climat »

Évaluons en premier lieu les caractéristiques thermiques de ce petit logis. Du point de vue des déperditions conductives, selon les hypothèses précédentes, le bilan de demande énergétique en fonction de l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur s'écrit alors (en s'exprimant en watts thermiques) :

$$\text{Eq 3. } f_e^{\text{conduction}} \cong (6 * 5 + 14 * 2). \Delta\theta \approx 60. \Delta\theta$$

Par un écart de température de dix degrés entre l'extérieur et l'intérieur, les pertes thermiques liées à la conduction correspondent donc à un flux de 600 watts thermiques. Pour la convection, liée aux pertes parasites et à un usage partiel de la ventilation naturelle en saison froide (le coefficient

¹ W/m²K ou W/m²°C

² Sans prendre en compte une légère diminution de cette valeur par une occultation de nuit.

³ Et permettre une certaine latence pour la corvée de charbon.

⁴ Petit outil de thermique dynamique dont j'avais initié la programmation en 2005.

n), nous considérons en première approche qu'elles correspondaient à environ un volume par heure¹. Avec une hauteur sous plafond de deux mètres soixante, le flux de demande énergétique de convection s'écrit alors :

$$\text{Eq 4. } f_e^{\text{convection}} \cong C_{th}^{\text{air}} \cdot n \cdot V \cdot \Delta\theta \approx 40 \cdot \Delta\theta$$

Au global, les besoins thermiques liés au contrôle de l'ambiance thermique intérieure² sont la somme de ces deux contributions. En d'autres termes, les besoins instantanés exprimés en watt valent cent fois l'écart de température avec l'extérieur. Par 0°C à l'extérieur et une température intérieure moyenne de 15°C, la cheminée ou le poêle devait délivrer alors 1500 W_{th}. Le résultat serait identique avec 5°C extérieur et une douce température intérieure de 20°C. En amont de ce besoin thermique utile, si la source était une cheminée ouverte, le flux de combustible était d'environ 15kW (rendement de 10%) ; dans le cas d'un poêle, cette valeur était ramenée à près de 5kW (rendement d'environ 30-40%).

L'adaptation de l'usage pour limiter la demande énergétique

Nul doute que le contrôle climatique de ce logement ne fonctionnait pas comme aujourd'hui sur le principe d'une température de consigne : on modulait le confort selon l'ambiance extérieure et selon la puissance maximale délivrée par la source de chaleur. Les ambiances climatiques étaient distinctes selon les pièces. Par grand froid, la majorité des usages se concentraient autour du foyer, en ayant pris soin de fermer les autres pièces : on réduisait ainsi l'emprise physique du contrôle climatique et les pièces mitoyennes fermées fabriquaient des zones tampons et permettaient ainsi de limiter les pertes conductives et convectives de la pièce centrale par rapport à l'interface au climat extérieur.

Synthèse des besoins utiles finaux

Pour estimer cependant les besoins annuels moyen de chauffage, en statuant sur les degrés-jours unifiés et selon une température de consigne basse (et une base disons à 15°C) qui seraient alors de 1000°C.j, on en déduirait des besoins annuels de 100kW.j, soit environ 2500kWh thermiques pour le logis, soit environ 60kWh par m² et par an mais selon des critères de confort très éloignés de ceux d'aujourd'hui... Toutefois, cette estimation est en besoins utiles et non en énergie primaire. En tablant sur un rendement d'environ 30% pour le poêle, la consommation était davantage proche de 200kWh par m². Sur la base d'une température de consigne de 18°C (et donc de degrés-jours d'environ 2400°C.j à Paris), les besoins seraient d'environ 5800kWh, soit près de 150kWh par m² et par an, valeur très moyenne d'efficacité thermique, étant vu que ce chiffre ne prend en

¹ Soit environ 130 kilos de matière gazeuse qui entrent et qui sort de nos quarante mètres carrés, avec un volume intérieur de plus de 100m³ et une masse volumique de l'air d'environ 1,25kg/m³

² Et sans prise en compte des besoins latents pour cette première approche.

compte ni les besoins d'eau chaude sanitaire, ni une température de consigne en général plus élevée.

Traduction en émissions de CO₂

Au début du temps IV, dans un Paris s'adonnant au charbon, une partie de l'humanité (une fraction de la population du monde occidentale) commence donc à réémettre massivement du carbone atmosphérique. Pour notre famille parisienne et ses 40 mètres-carrés, la combustion du charbon n'est pas neutre sur le début d'une empreinte carbone d'origine anthropique. Par combustion et génération d'un kWh thermique, le charbon émet 345 grammes de dioxyde de carbone. Ainsi les émissions annuelles étaient donc d'environ 2,6 tonnes de CO₂, soit une valeur d'émissions plus élevées que beaucoup de familles pauvres aujourd'hui. L'inégalité climatique était déjà en marche, les pays occidentaux prenaient déjà une belle avance dans leur contribution à émettre des gaz à effet de serre dans l'atmosphère (chapitre #18).

Matière

Flux de matière

À quelle consommation de charbon correspondaient-ils ? Quelles étaient les émissions de CO₂ associées ? Le pouvoir calorifique du charbon est, selon les qualités, compris entre 15 et 27 MJ par kilo, soit 4 à 7 kWh thermiques par kilo environ. Avec l'hypothèse d'un rendement du poêle de notre petit appartement de 30%, les besoins calorifiques annuels étaient trois fois supérieurs aux besoins thermiques finaux, soit 7500kWh : notre logement réclamait ainsi entre 1100 et 1900 kilos de charbon par an, prenons 1500 kilos comme valeur médiane, soit une moyenne de 30 kilos par semaine et sans doute pas loin de 100 kilos lors des semaines les plus froides. Rapportés à la surface du logis, la matière énergétique annuelle était de près de 40 kilos de charbon par m² et par an : en vingt ans d'usage, ce logis avait vaporisé autant de matières énergétiques que son propre poids. Enfin, si ce logement était situé aux étages élevés, la corvée de charbon était bien réelle, car l'invention d'Otis ne s'était pas encore propagée ! [15] (Fig. 209)

Stock matière d'un petit logement haussmannien

Rappelons-nous la constitution du trois pièces de 40m², disposant de quatre fenêtres dont une sur cour. Sa surface de façade, en contact avec l'extérieur est d'environ 20m². Ses quatre fenêtres fabriquent une surface cumulée de 6m² de menuiserie. Le poids de façade attribuable à ce logement est d'environ 15 tonnes (soit près de près de 400 kilos par mètre-carré utile) ; le poids de verre est quant à lui d'environ 100 kilos. Le plancher avec poutrelles métallique et remplissage plâtre devait sans doute être de l'ordre de 300 kilos par mètre-carré utile dont une grosse centaine attribuable au plâtre. Sans faire l'inventaire complet, en intégrant notamment

Fig. 209. *Otis dans son ascenseur, rappelé par Rem Koolhaas dans New York Delire*



les matières partagées pour la totalité de l'immeuble¹, l'haussmannien typique est à ranger dans les constructions lourdes, du fait essentiellement de la façade en pierre massive. À l'inverse, par l'emploi du métal, les planchers empruntent à la construction en filigrane, chère à Kenneth Frampton et peuvent être considérés comme raisonnablement légers [16].

Comment classer le stock construit ?

Comment classer ce stock matériau néanmoins ? Est-il « fossile » ou « renouvelable » du point de vue de ses ingrédients constructifs ? Il faut sans doute opérer une double lecture et distinguer la nature du matériau et l'usage ou non d'énergies fossiles pour sa fabrication puis sa mise en œuvre (#17). L'énergie réclamée par l'extraction et le débit de la pierre de taille devaient sans doute être principalement celles des hommes : la miniaturisation des machines mécaniques n'était pas encore assez avancée. De ce point de vue, la pierre peut être rangée du côté « renouvelable » tant du point de vue de son mécanisme d'extraction puis de mise en œuvre de l'époque. D'un point matériau, elle peut être rangée selon la même terminologie : pas de mélanges irréversibles entre matériaux différents, elle conserve sa « pureté originelle » de « matière primaire » [17]. Seul son débit et les transformations géométriques irréversibles opérées sur ses formes opèrent un départ d'irréversibilité. Néanmoins, ces briques constructives sont aisément réemployables pour d'autres aventures constructives [18].

Fig. 210. *Hausmann revisité par Barraud et Pressacco à Oberkampf. Le retour de stéréotomie dans les façades parisiennes et le maintien d'un principe tectonique pour les planchers.*



Les premiers « carbone gris »

Il en va différemment pour l'acier, le verre et le plâtre : la préparation de ces matières à construire réclamant dans leur *process* de monter à haute température. Vers la fin du 19^{ème} siècle, les combustibles utilisés devaient tantôt être du charbon de bois, tantôt de la houille ou du charbon. Ainsi, ce sont sans doute les premières traces de carbone gris, l'émission de CO₂ liée à la constitution du stock construit. Parallèlement, ces composants simples pouvaient néanmoins se prêter au réemploi ou à la réutilisation pour ce qui concerne l'acier et dans une moindre mesure, le verre et le plâtre.

« Dans les années 1860, en France, le chiffonnage, c'est-à-dire la collecte des matières et des objets abandonnés, occupait près de 100 000 personnes². Tout ou presque était objet de récupération : les chiffons pour le papier bien entendu, mais aussi l'os utilisé pour la tabletterie et la boutonnerie, le charbon animal, le phosphore, les sels ammoniacaux, la gélatine. » [2]

*

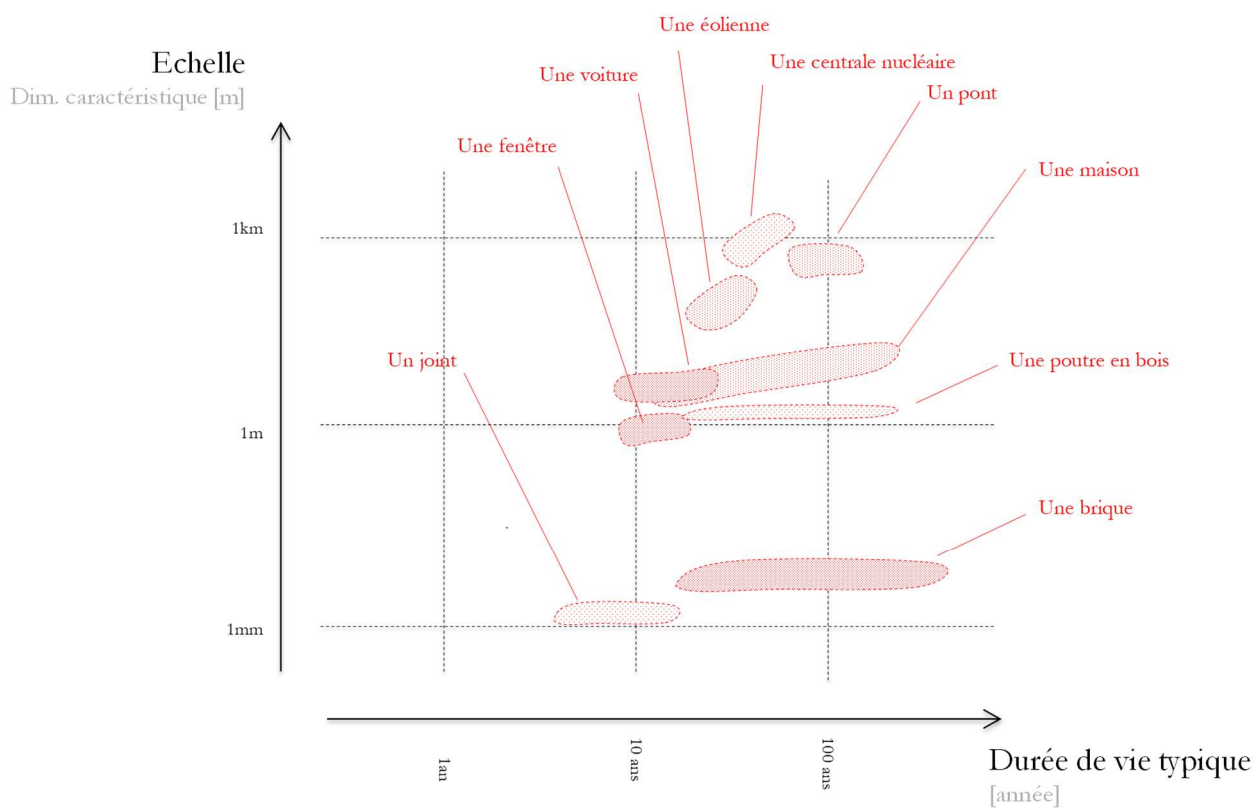
¹ Les toitures, les fondations, les escaliers et servitudes, les pignons et leurs conduits de cheminée etc.

² Penser à faire le ratio par rapport à la population active de l'époque

Bibliographie

1. MAC NEILL, John R., *Du nouveau sous le soleil. Une histoire de l'environnement mondial au 20^{ème} siècle*, Seyssel, Éditions Champ Vallon, 2010. Titre original *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*, 2000
2. BONNEUIL Christophe, FRESSOZ Jean-Baptiste, *L'Événement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Seuil, 2013
3. MALM Andreas, *L'anthropocène contre l'histoire. Le réchauffement climatique à l'ère du capital*, La Fabriques éditions, 2017
4. SINGH Madanjeet, *L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature*, Unesco France Loisirs, 1998
5. REY Olivier, *Une question de taille*, Stock, 2014
6. ABBOTT Jennifer, ACHBAR Mark, *The Corporation*, documentaire canadien basé sur le livre *The corporation, the pathological pursuit of profit and power* de Joel Bakan documentaire, 2003
7. MENARD Raphaël, *Le Classement, Mode d'Emploi*, Mémoire sur les organisations du savoir et les classifications bibliographiques, 67 pages, 2002
8. KIM Eunhye, BARLES Sabine, « The energy consumption of Paris and its supply areas from 18th century to present », *Regional Environmental Change*, 12(2), juin 2012, p. 295-310
9. MENARD Raphaël et al., *Reforme, rapport final de recherche*, programme Ignis Mutat Res, 2014
10. SMIL Vaclav, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015
11. PICON Antoine (sous la dir.), *L'art de l'ingénieur*, Ed. Centre Pompidou, 1997
12. KAZAZIAN Thierry, *Design et développement durable : Il y aura l'âge des choses légères*, Victoires Éditions, 2003
13. HESCHONG Lisa, *Architecture et Volupté thermique*, Marseille, Parenthèses, 1981
14. APUR, *Cahier n° 3 : Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1851 et 1914*, mars 2011
15. KOOLHAAS Rem, *Delirious New York*, 1978
16. DEPLAZES Andrea, *Construire l'architecture. Du matériau brut à l'édifice. Un manuel*, Birkhäuser, 2013
17. ALLWOOD Julian M., CULLEN Jonathan, *Sustainable materials – with both eyes open: future buildings, vehicles, products and equipment – made efficiently and made with less new materials*, Cambridge, 2011
18. ROTOR, *Déconstruction et réemploi. Comment faire circuler les éléments de construction*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2018

Fig. 211. Diagramme temps - échelle



#13 Le solaire sous toutes ses formes (2/3)

Précisions sur le solaire à haute qualité énergétique : le solaire à concentration et le solaire photovoltaïque.

Le solaire à concentration

Introduction

Aller bien au-delà de 100°C

Comme nous l'avons vu avec le solaire thermique au cours du chapitre #11, la densité surfacique de radiation solaire (chapitre #19) permet difficilement d'atteindre des températures supérieures à 100°C sur Terre. Pour dépasser ce seuil, pour chauffer plus intensément la matière, ou pour mettre en branle un moteur thermique, il est nécessaire de concentrer le feu solaire. L'optique et la géométrie arrivent à la rescousse [1]. L'usage savant de la matière permet d'amplifier localement le rayonnement, telle une loupe, et ainsi atteindre des températures pouvant atteindre 3000 à 4000°C (Fig. 212). Au cours de ce deuxième chapitre relatif aux énergies solaires, nous distinguerons deux sous-familles, la concentration linéique et la concentration surfacique (Fig. 246). L'une et l'autre se distinguent par leur taux de concentration optique respectif et donc la température maximale atteignable au foyer.

Fig. 212. Valeurs de température de quelques phénomènes énergie-matière

100 000 000 °C	Fusion thermonucléaire
15 000 000 °C	Cœur du soleil
12 000 °C	Torches à plasma (destruction de déchets polluants comme l'amiante)
6 000 °C	Surface du soleil
4 000 °C	Température pouvant être atteinte par concentration optique surfacique du flux solaire
3 500 °C	Tests et qualification de matériaux pour application spatiale et pour application à haute température
	Elaboration de méthodes de destruction et de recyclage de déchets industriels
2 000 °C	Synthèse de pierres précieuses
	Synthèse de matériaux nouveaux
	Production d'hydrogène
	Traitement photothermique des rubis
1 500 °C	Céramiques spéciales (moteurs)
	Métallurgie réfractaire
1 000 °C	Moteur Stirling
	Centrale solaire thermodynamique
	Céramiques semi-industrielles
	Fusion du bronze
	Forge
	Calcination de minerais
	Verrerie d'art
	Secteur de la chimie : réactions thermochimiques et photochimiques
500 °C	Cuisson des liants hydrauliques : ciments, chaux, plâtre ...
	Fusion plomb, zinc
300 °C	Cuisson du pain
	Production de vapeur
150 °C	Distillation de plantes médicinales
	Eruvage
	Agroalimentaire (confitures, conserves)
100 °C	Cuseur solaire
	Evaporation de l'eau à pression standard
60 °C	Eau chaude sanitaire
37 °C	Température du corps humain
15 °C	Température moyenne de l'atmosphère

Un potentiel spatial gigantesque

Embranchement singulier dans l'arborescence des énergies renouvelables (#10), la famille « solaire à concentration » héberge une quantité impressionnante d'individus techniques [2]. Cette catégorie est absolument passionnante à découvrir, du fait qu'elle tutoie l'optique et qu'elle engendre des architectures d'une très grande diversité morphologique (Fig. 213). Enfin, elle offre une grande diversité de températures potentielles, aptes à correspondre à une grande variété d'usage. Notons qu'elles sont avant tout statiques, immobiles et que nous n'avons encore jamais vu de train propulsé par un système hélio-thermodynamique, mais cela pourrait être assurément une proposition à tester dans le désert du Rajasthan, ou pour un porte-conteneur qui croiserait dans les zones océaniques où le flux solaire directe est intéressant.

Architectures optiques

Les architectures du solaire à concentration sont parfois monumentales. D'un point de vue spatial, je me souviens du choc architectural lors de la visite, en 2008, au complexe de *Solucar* (Fig. 214), non loin de Séville, et de sa centrale à tour, la PS10¹. Parcourir la centrale sous la canopée des miroirs, se promener sous la « forêt des héliostats » (chaque miroir faisant près de 100m² à une dizaine de mètres au-dessus du sol), percevoir la concentration des rayons convergents sur la tour à plus de cent mètres de haut... : les centrales héliothermodynamiques sont des monuments solaires, la *bigness* du renouvelable. À grande échelle, les centrales à tour génèrent de véritables apparitions dans le paysage : la concentration du feu solaire est visible à des kilomètres à la ronde et propose des images semblables aux tableaux mystiques. En 2016, nous faisons un pèlerinage solaire avec les étudiants du DPEA pour nous rendre à Odeillo (#16), à proximité de Font-Romeu et admirer dans la région trois autres magnifiques exemples de solaire à concentration : le four de Mont-Louis, la centrale d'Odeillo conçue par Trombe et Vicariot [3] (Fig. 215) et celle de Thémis. Ces installations possèdent une puissance plastique incroyable.

Une histoire de 2000 ans

Les miroirs solaires

Il faut lire *Let It Shine* de John Perlin [4] pour se faire conter l'apparition des artefacts concentrant le feu solaire. L'épisode historique le plus célèbre est sans doute celui des miroirs conçus par Archimède et destinés à mettre feu aux gréments romains au large de Syracuse en 212 avant J.-C : une nouvelle puissance de feu militaire (quoi qu'on ne sache pas si ce fait est avéré). Dessus et Pharabod [5] évoquent Plutarque qui relatait que les vestales utilisaient des miroirs coniques en airain pour allumer le feu sacré. Singh [6] précise :

« [...] lorsque les Barbares pillèrent le temple et éteignèrent leur flamme sacrée, il fallut immédiatement la ranimer avec 'la flamme pure et non souillée du soleil'

¹ La sœur aînée, PS20, de 20MW était à l'époque en cours de construction

Fig. 213. *L'une des premières centrales héliothermodynamiques avec des miroirs paraboliques. Centrale à focalisation linéaire à Meadi en Egypte, 1913 par l'Américain F. Shuman.*



Fig. 214. *Solucar, les centrales solaires thermodynamiques à tour, PS10 et PS20 (PS 10 sur la photo aérienne)*

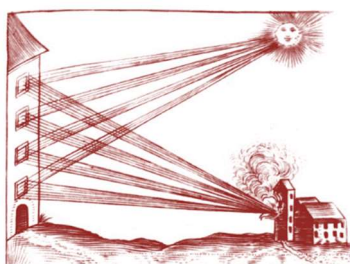


Fig. 215. *Centrale solaire d'Odeillo*



en se servant de 'récipients coniques en laiton' avec lesquels les prêtresses dirigeaient les rayons du soleil sur 'des matériaux légers et secs'. »

Fig. 216. *Concentration solaire*

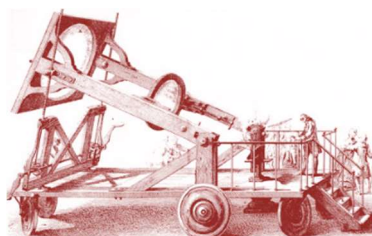


Dans l'Antiquité, ces miroirs étaient composés de pièces plates en métal poli (argent, cuivre ou laiton). Le miroir parabolique est inventé par le mathématicien grec Dositheius au 2^{ème} avant J.-C. ; un siècle plus tard, Dioclès rédige un traité, *A propos des miroirs ardents*.

Faire converger les parallèles

Le solaire à concentration concrétise de belles rencontres entre la matière et la géométrie (Fig. 216). Trouver les matériaux et leur mise en œuvre assurant une spécularité idoine ; les bomber de telle sorte à ce que le flux solaire, concentré, puisse être amplifié et ainsi dépasser largement les mille watts par unité de surface. Alors, la puissance se concentre localement pour atteindre des valeurs dix, voire cent fois plus élevées : sous ce flux, on ne bronze plus, on cuit, on s'enflamme. La concentration consiste à obtenir des températures plus importantes en utilisant la géométrie des rayons solaires, en faisant l'hypothèse de leur quasi-parallélisme, tout en composant avec les limites optiques inhérentes liés à la géométrie astronomique¹.

Fig. 217. *Le concentrateur à lentilles de l'Académie royale, œuvres complètes de Lavoisier*



Optique et thermique après la Renaissance

Au 17^{ème} siècle, du fait sans doute des progrès en optique et de l'attrait pour l'astronomie, la concentration solaire et le développement des techniques de la haute température connaissent un grand essor. Mais avant, Singh [6] rappelle que vers 1515, Léonard de Vinci proposait un emploi pacifique de ces miroirs, en particulier avec un grand miroir parabolique pour chauffer des piscines et des chaudières industrielles. En 1774, Lavoisier réalise la fusion de matériaux par le feu solaire concentré (Fig. 217). La fusion et l'étude des matériaux seront d'ailleurs ce qui motivera l'édification de la centrale d'Odeillo dans les années 1960-70 sous l'impulsion de Felix Trombe [3] (Fig. 215).

Quelques exemples de taux de concentration

Aujourd'hui, avec les matériaux disponibles, pour la fabrication d'un modeste four solaire en mode *Do It Yourself*, disposant de deux volets réfléchissants, le taux de concentration maximum serait sans doute de l'ordre de trois. Au foyer d'un miroir cylindro-parabolique, sans doute de quarante et la température au foyer tend alors vers 300°C. Au foyer d'un miroir parabolique ou au point focal d'une centrale à tour, la concentration serait sans doute supérieure à 300² et la température supérieure à 800°C, voire jusqu'à plus de 3000°C dans certaines configurations. La lentille de Fresnel utilisée par Markus Kayser pour son *Solar Sinter* fournit un autre exemple de concentration optique surfacique (#17). La température au foyer de loupe permet la liquéfaction du sable du désert. Le feu solaire initie du changement d'état de la matière. Quelle est la limite théorique à

¹ Diamètre solaire vis-à-vis de la distance Terre-Solaire : une constante secondaire de l'architecture ! Voir chapitre #19.

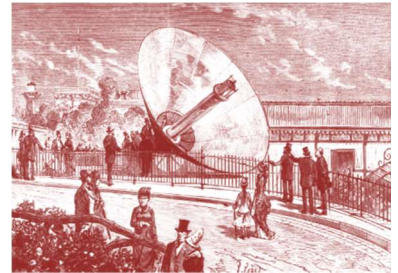
² Soit localement une densité de puissance supérieure à 100kW par m²

la concentration ultime ? C'est l'affaire de dimensions astronomiques, le diamètre du soleil et la distance Terre-Soleil sont des « perturbateurs géométriques » intrinsèques. En effet, les rayons directs en provenance du soleil ne sont pas rigoureusement parallèles : un faible écart angulaire subsiste entre deux rayons issus de zone diamétralement opposé sur le soleil (Fig. 217). Et cette diffraction suffit à opposer une limite maximale du taux de concentration solaire, une sorte d'entropie géométrique.

Mouchot et les premiers moteurs solaires

Plus tard, l'histoire des sciences et techniques verra naître l'hybridation entre la machine à vapeur et l'énergie solaire : la source chaude, la haute chaleur est produite par le feu solaire et non par le charbon. Grâce au progrès au cours du 19^{ème} siècle quant à la fabrication de grandes pièces de métal, un professeur de mathématiques français, Augustin Mouchot parvient à fabriquer des miroirs paraboliques (ou coniques) de grand diamètre au cours des années 1860. Lors de l'exposition universelle de 1878, Mouchot présente son imprimerie solaire capable de sortir cinq cents exemplaires à l'heure (Fig. 218). Un concentrateur de Mouchot est d'ailleurs visible au musée des Arts et Métiers.

Fig. 218. *Le moteur solaire de Mouchot et l'imprimerie du Jardin des Tuileries.*

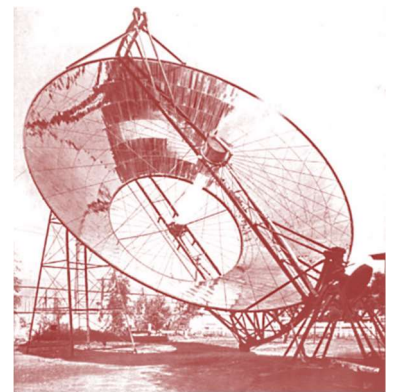


Les différents types

Des systèmes mobiles en général

Contrainte importante du solaire à concentration : la mobilité nécessaire de certains éléments de l'architecture pour suivre la course solaire. Dans le cadre d'une concentration linéique (et c'est là l'un de ses avantages), un seul degré de liberté est nécessaire. Pour les champs cylindro-paraboliques, le cylindre parabolique s'oriente toujours de façon à confondre la directrice de la parabole avec l'angle des rayons (Fig. 220). Pour un système surfacique, comme les centrales à tour ou les *dishes* [2], la configuration géométrique est plus complexe. Il réclame deux degrés de liberté pour suivre la course solaire, à fois en hauteur et en azimut (Fig. 219). On parle parfois de *tracker* biaxe pour désigner ce type de système mobile utilisé pour les héliostats (les miroirs d'une centrale à tour) ou d'un système photovoltaïque suiveur, comme nous le verrons ensuite.

Fig. 219. *Un système à concentration surfacique supposant deux degrés de liberté*



Concentration linéaire

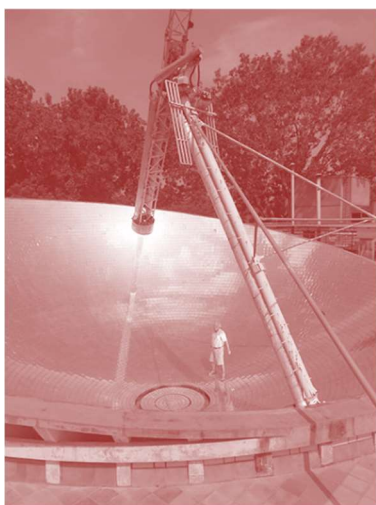
La concentration linéaire focalise les rayons selon un plan particulier. Les grandes centrales héliothermodynamiques de ce type, dite cylindro-paraboliques, dispose de miroirs paraboliques extrudés, mobile autour d'un axe est-ouest. Le système aligne de façon continue la directrice de la parabole avec l'orientation des rayons dans le plan nord-sud. La concentration linéaire est moins intense que celle dite surfacique et permet d'atteindre au maximum des températures au foyer (linéaire donc) de l'ordre de 300°C : c'est suffisant pour exploiter un cycle et produire une puissance mécanique avec un rendement de l'ordre de 25% [2] (Fig. 220).

Certains concentrateurs linéaires « discrétisent » les miroirs pour éviter de la courbe : ce sont alors des centrales à miroir Fresnel. À une échelle plus modeste, des barbecues exploitent une concentration linéique de telle

Fig. 220. Concentration linéaire sur depuis des miroirs paraboliques. Scène du lever de soleil dans le film *Gattaca* de Nichols.



Fig. 221. Le cuisinier solaire de la cantine d'Auroville



sorte à proposer une surface de chauffe plus importante que la tâche d'une concentration surfacique (Fig. 221).

Concentration surfacique

Dans le cas de la concentration surfacique, on fait converger un fagot de rayons solaires non pas sur un segment, mais sur un point. Cette sous-famille propose également une myriade d'architectures possibles [11] : les centrales à tour, les centrales avec un miroir secondaire¹ [3], les centrales à tour dites à *beam down*, les *dishes* où l'énergie solaire est directement concentrée sur un moteur Stirling². Les plus connues sont les centrales à tour, comportant une forêt d'héliostats mobiles sur deux axes, chacun pilotés de telle sorte à réfléchir les rayons du soleil sur la tache focale de la tour (Fig. 214). La concentration est tellement intense qu'il est difficilement supportable d'observer la tâche. La température peut atteindre 2000°C à 3000°C pour les zones les plus intenses de la tache focale. À plus petite échelle, la concentration surfacique est très utile en cuisine. La cantine d'Auroville, non loin de Pondichéry, exploite un miroir à grande échelle pour faire chauffer les marmites (Fig. 221). Dans un village en Inde, des femmes ont mis au point une savante pièce d'horlogerie pour faire converger les rayons sur le pot contenant le *dal*. À Marseille, un restaurateur a développé le « premier restaurant propulsé au soleil », le *Présage*.

Concentration passive pour tenter de rester statique

Nous l'avons vu la concentration solaire propose des ballets d'architectures mobiles [10]. Cette dynamique est une contrainte en termes d'occupation d'espace, de complexité parfois de mise en œuvre, d'entretien et de maintenance. Aussi, nous comprenons bien qu'il serait merveilleux de pouvoir accéder à une concentration solaire mais de façon statique.

C'était l'idée sous-jacente avant la création de *Cellter* chez Elioth (Fig. 222). Sur la base de données climatiques sur un site donné et de la relation entre gisement solaire disponible selon la hauteur³, et en exploitant des algorithmes dédiés, il s'agissait de définir la forme qui autorisait la meilleure concentration optique moyenne. L'idée de *Cellter* était aussi de réduire le coût matière en réduisant la surface photovoltaïque installée tout en maintenant le productible électrique annuel.

¹ Comme celle d'Odeillo, Fig. 215.

² Moteur à combustion externe.

³ En kWh par m² et par an par radian

Perspectives d'intégration urbaine

De beaux filtres à exergie et à anergie

À ce jour, les technologies de solaire à concentration restent cantonnées dans des situations extra-urbaines et dans les zones où la disponibilité solaire est très importante. Les centrales à tour ou les systèmes à concentration linéaire¹ connaissent depuis quelques années un certain engouement. Ces technologies présentent les avantages d'un rendement de conversion électrique intéressant² et également de capacité de stockage de la haute chaleur produite par des sels fondus : la production électrique peut être adaptée et lissée sur le rythme de la journée. Singh [6] précise que la centrale à tour *Solar Two*, située dans le sud de la Californie, peut ainsi générer de l'électricité pendant trois heures après le crépuscule.

Des architectures du temps V

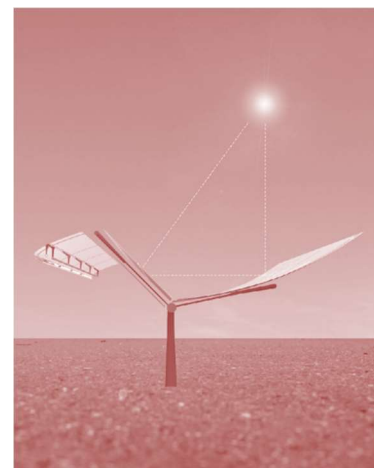
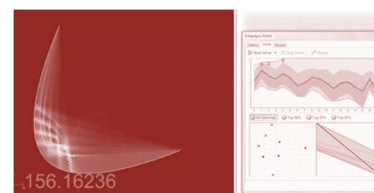
À l'orée du temps V que nous aborderons plus loin (chapitre #16), du retour en force des énergies solaires et de l'expérimentation pour tenter de préparer l'après-fossile, l'Europe suit le mouvement américain au tournant des années 1970-80 : projet de centrale à tour d'Adrano en Sicile de 1981 à 1984 ; Tabernas en Espagne et Thémis, près de Targassonne en France avec une puissance de 2,5MW.

Utopies en ville

Dans les zones du globe fortement ensoleillées et aux cieux clairs, le solaire à concentration est prometteur, *a fortiori* s'il pouvait être intégré dans le périmètre urbain : il produirait de l'électricité et le « déchet » de chaleur pourrait alors être potentiellement valorisé (Fig. 224). C'était la petite utopie dessinée et décrite dans un article de l'Architecture d'aujourd'hui [10] :

« [...] Dans le zoo des technologies solaires disponibles, fiables et rentables, figurent l'héliothermodynamique et les différentes techniques de concentration optique du flux solaire : centrales à tour, concentrateurs linéaires paraboliques, etc. Pourquoi ne pas réfléchir à l'adaptation urbaine des magnifiques centrales solaires à tour ? Bravo à Solucar³ mais pourquoi perdre toute la chaleur produite en se cachant dans les déserts ? 100% solaire = ~ 20% électrique et le reste en chaleur. Intégrées de façon urbaine – et dans les situations climatiques où la part d'ensoleillement direct est intéressante –, c'est l'assurance de la trigénération : électricité, froid et chaud. Équiper les toits d'héliostats (de simples miroirs couplés à un système suiveur) : les citoyens concentrent leur rayon sur un même foyer. Au pied de la tour, le départ d'un réseau d'électricité, de chaleur et de froid. »

Fig. 222. Recherche avant Cellier et les cartes de concentration solaires effectuées sous Grasshopper. Cellier, ombrière photovoltaïque à concentration passive, Elioth, 2011.



¹ Parabolique ou miroirs de Fresnel.

² Un peu supérieur à celui d'un champ photovoltaïque

³ Parc solaire situé dans les environs de Séville comportant deux centrales à tour PS10 et PS20. PS10 dispose d'une puissance de production électrique de 11MW avec 624 héliostats.

Fig. 223. *Piles thermiques à concentration linéique*



Avant cet article pour l'AA [10], dans le cadre de la consultation pour le Grand Paris en 2008, j'avais proposé de façon un peu utopique une proposition consistait à intégrer à grande échelle des énergies renouvelables en situation urbaine : pourquoi ne pas imaginer que de grands vides urbains¹ puissent participer à la production énergétique métropolitaine ? Une déclinaison de cette perspective pourrait notamment consister à faire entrer en situation urbaine les technologies de concentration solaire : le rendement de conversion de l'insolation annuelle serait maximisé en valorisant production d'électricité, de chaleur voire également de froid.

« Les Hauts Lieux intègrent notamment dans leur vide l'« urbanisation » de champs solaires, d'éoliennes de grande puissance comme la sylviculture en territoire métropolitain pour la production de la biomasse. Les Hauts Lieux seront en particulier les espaces de cogénération renouvelable : la chaleur des centrales solaires à concentrateur –habituellement inutilisée– sera bien entendu valorisée pour le chauffage et la production d'eau chaude. La géothermie des aquifères franciliens pourront aussi venir en complément ; les champs photovoltaïques seront intégrés dans un paysage urbain et offriront des extérieurs protégés du vent et des intempéries. Dans ce contexte –lorsque la haute densité équilibre son intensité d'usage avec des vides producteurs– les tours à énergie positive deviennent possibles. En pratiquant cet exercice sur le site du Parc de la Courneuve, nous parvenons à rendre autonome en énergie ce Haut Lieu. » [8]

Fig. 224. *Centrale à tour urbaine*



¹ Parcs, aires logistiques, ...

Synthèse énergie-matière

Type de production pour le solaire thermodynamique

Type de production	Chaleur
Température	150°C – 3000°C
Rendement typique ¹	25% - 35%
Rendement maximum ²	80%
Contenu exergetique	10% - 40%
Lissage possible de la production avec stockage de chaleur	

Fig. 225. Piles thermiques à concentration simple avec volets isolants.

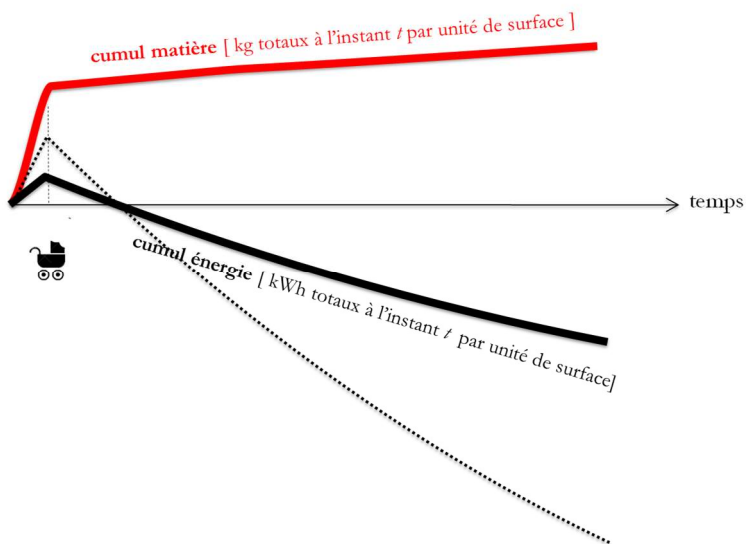


Fig. 226. Synthèse énergie-matière pour le solaire thermodynamique. En pointillé, part de chaleur fatale potentiellement récupérable.

¹ Pour la conversion en électricité

² Si valorisation de la chaleur et usage en cogénération par exemple

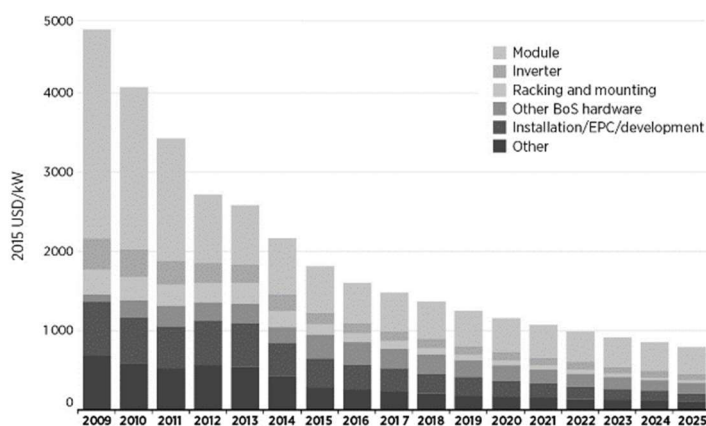
Le solaire photovoltaïque

Introduction

En quelques mots

Nous y arrivons, la baguette magique énergétique, le « carpaccio de silice », le bardage du 21^{ème} siècle, la peau de l'architecture du futur. Tous les indicateurs récents lui promettent un avenir radieux : capacités de productions industrielles importantes, coût de fabrication en chute libre (Fig. 227), externalités environnementales de fabrication réduites, rendements croissants, diversité chromatique des panneaux, intégration dans les vitrages... Jeremy Rifkin promet sa gratuité [12], Elon Musk veut en couvrir le monde. Il est certain que les architectes devront très rapidement dompter les vertus de cette peau productive. Le photovoltaïque permet la production d'électricité à partir du gisement solaire, le direct comme le diffus. En cela, il diffère de la grande majorité des autres productions issues du solaire direct, qui produisent toutes de la chaleur, à différents niveaux de température¹. En 2013, 4,7% de l'électricité produite en Allemagne était d'origine photovoltaïque et cette part ne cesse d'augmenter dans une grande majorité de pays dont la Chine.

Fig. 227. *Coût d'installation du photovoltaïque (à l'échelle d'utilité) depuis 2009 et projeté à horizon 2025 et décomposition du coût par composant. En dollar US par kWc installé. Dès 2020, un coût inférieur à un euro par Wc (source, Irena, 2015). La décroissance massive des coûts de production et du watt installé : la signature d'une réduction colossale des besoins énergie-matière pour fabriquer ces éléments ?*



¹ Quoique certaines technologies de solaire à concentration autorisent des niveaux de température suffisamment élevées pour rendre viable l'ajout d'un moteur thermique et donc la production d'électricité.

Idées reçues

De mon expérience de concepteur et de prescripteur, le photovoltaïque (Fig. 228) est souvent handicapé par une forte inertie culturelle, par la récurrence de préjugés, par ses inconvénients supposés qui lui sont encore souvent à tort opposés : pour beaucoup de projets auxquels j'ai pu participer comme ingénieur, il était nécessaire de convaincre tantôt les maîtres d'ouvrage, tantôt les architectes. Voici un rappel succinct des quelques griefs supposés. Le photovoltaïque serait cher : ce n'est définitivement plus le cas depuis quelques années et il est devenu plus que compétitif par rapport aux énergies fossiles. Il serait difficilement recyclable : ce qui est faux et nous verrons aussi que le coût matière de cette technologie est très faible comparée à sa production énergétique. Sa fabrication réclame des matériaux rares ou polluants : ce n'est pas le cas de la technologie la plus largement développé utilisant le silicium. Enfin, les émissions de CO₂ et les consommations d'énergie liées à sa fabrication et à son transport seraient prohibitifs : avec quelques chiffres à la clé, nous verrons que ces arguments sont caducs. D'un point de vue architectural, le bilan est plus ambivalent : sa colorimétrie sombre, le calepinage des cellules, la taille standard des panneaux peuvent de fait limiter la liberté d'expression, la géométrie et la modénature des constructions.

Apprendre à faire avec

Les concepteurs devraient cependant rapidement apprivoiser cet « ingrédient architectural », cette « matière à produire », définir des stratégies adaptées pour son intégration architecturale tant d'un point de vue géométrique¹ que pour composer une harmonie colorimétrique. L'agence Nicolas Michelin a su utiliser cette texture à grande échelle dans le cadre du gigantesque projet pour le Ministère de la Défense à l'Hexagone Balard (2015) et ses 5600 m² de panneaux photovoltaïques et une puissance-crête cumulée 840 kW_c (Fig. 229).

L'estimation de production annuelle par les ingénieurs d'Egis est de 764MWh d'électricité. Rapportée à la surface de plancher de près de 90 000 m² de ce paquebot ministériel, la puissance-crête par unité d'usage n'est alors que de 9W_c par m² de plancher et le crédit de production électrique serait alors de moins de 1kWh d'électricité par an et par m² : nous sommes encore loin d'un bâtiment à énergie positive, au moins sur le vecteur électricité (#16).

Les concepteurs et la maîtrise d'ouvrage n'en sont aucunement responsables, seule la morphologie et la densité d'étages est à l'origine de ce déséquilibre énergétique (Fig. 230) : nous verrons ce point plus en détail dans la deuxième partie, lorsque nous testerons les autonomies énergétiques en fonction des densités morphologiques (chapitre #22).

Fig. 228. *Solarisation d'une autoroute en Allemagne, à proximité de Munich. Un écran photovoltaïque producteur utilisé également comme barrière acoustique.*

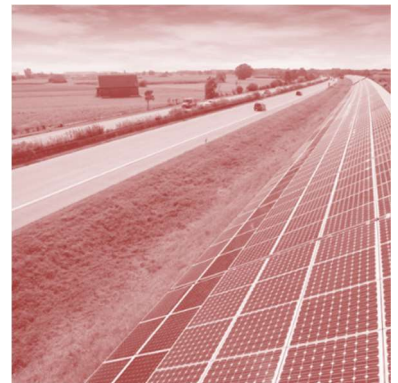


Fig. 229. *Le projet Balard et le ministère des armées à proximité du périphérique parisien. 5600m² de toitures productives.*



¹ Pour optimiser un productible ou une autoconsommation.

Fig. 230. La balance du plafond de positivité. La densité morphologique comme limite physique à l'autonomie énergétique. À gauche de la balance, la production récupérable en toiture. À droite, la consommation des étages cumulée. [16]

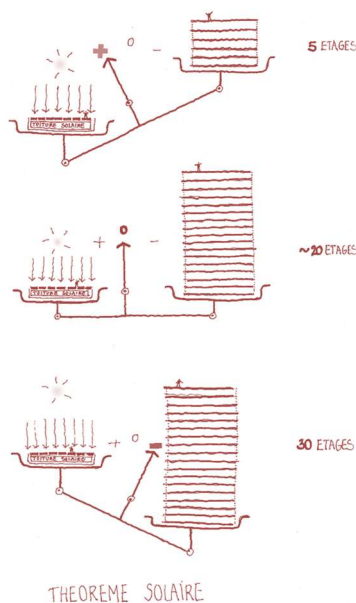


Fig. 231. Ferme photovoltaïque de grande échelle typique. Encore une faible prise en compte des capacités paysagères et architecturales. Un sujet essentiel pour l'architecture du temps V et celle du temps VII.



Brève histoire des photopiles

Une histoire récente

Pour revenir aux origines, l'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par Alexandre-Edmond Becquerel. En 1954, les laboratoires *Bell Telephone* mettent au point une cellule au silicium disposant d'un rendement de 6% [5] (Fig. 232). Singh [6] rappelle qu'à la fin des années 1950, les chercheurs américains parvenaient à fabriquer des cellules expérimentales au silicium dont le rendement était supérieur à 14%. L'exploration puis l'industrie spatiale a ensuite catalysé son développement. Bien orientés et du côté éclairé de la Terre, les 1361 watts par m² du flux incident étaient efficacement bien valorisés : la disponibilité d'un panneau en orbite de la Terre est de 50% : la moitié du temps sur le côté exposé au soleil et sans aucun masque, l'autre moitié dans la nuit de l'ombre de la Terre.

Saut quantique et génération d'électricité

En amont de cette histoire technologique, il y a celle de passerelles créées entre les disciplines des sciences, entre l'électrostatique et les radiations électromagnétiques. Luigi Galvani puis Alessandro Volta en 1800 qui crée la première pile électrochimique. Publié en mars 1905, le premier article d'Einstein expose un point de vue révolutionnaire sur la nature corpusculaire de la lumière par l'étude de l'effet photoélectrique. Einstein l'intitule : *Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière*. Il y relate ses recherches sur l'origine des émissions de particules, en se basant sur les travaux de Planck qui avait, en 1900, établi une formule d'un rayonnement quantifié, c'est-à-dire discontinu. Planck avait été contraint d'aborder le rayonnement lumineux émis par un corps chaud d'une manière qui le déconcertait : pour mettre en adéquation sa formule et les résultats expérimentaux, il lui avait fallu supposer que le courant de particules se divisait en blocs d'énergie, qu'il appela *quanta*. Bien qu'il pensât que ces quanta n'avaient pas de véritable existence, sa théorie semblait prometteuse et plusieurs physiciens y travaillèrent. Einstein réinvestit les résultats de Planck pour étudier l'effet photoélectrique, et il conclut en énonçant que la lumière se comportait à la fois comme une onde et un flux de particules. L'effet photoélectrique a donc fourni une confirmation simple de l'hypothèse des quanta de Max Planck.

Rendement énergétique

L'unité du watt-crête

Le watt-crête est l'unité de puissance spécifique aux installations photovoltaïques. Elle correspond à la puissance délivrée sous une irradiation normale aux panneaux de 1000 watts par m² et à une température de référence de 25°C. Le rendement d'un panneau peut en effet légèrement chuter avec des températures plus élevées. Étant vu que flux maximal disponible à la surface du globe ne pouvait dépasser cette valeur¹, la puissance-crête d'un panneau ou d'une installation photovoltaïque correspond peu

¹ Ou alors très légèrement et dans des sites en altitude.

ou prou au flux maximum disponible (#19). Un panneau dont le rendement est de 10% possédera une puissance-crête de $100W_c$ par m^2 ; un panneau de 15% de rendement, $150W_c$ par m^2 etc. Sous nos latitudes, une règle du pouce pour évaluer la production annuelle consiste à multiplier entre 1000 et 1500h la puissance-crête. Ainsi, un panneau de $150W_c$ produira environ 150kWh par an à Paris. Bien orienté selon la rotation du satellite¹, ce même panneau produirait par contre près de 900kWh par an dans l'espace².

À l'échelle de la ferme photovoltaïque

À une échelle plus importante, celle d'une ferme solaire de quelques hectares pour les plus petites et jusqu'à quelques km^2 pour les plus grandes (Fig. 231), le rendement de conversion typique équivalent est de 5 à 10% [13]. La plupart des fermes solaires photovoltaïques sont des collecteurs statiques : l'inclinaison et l'urbanisme des sheds suivent alors une logique visant à optimiser la production annuelle pour des raisons d'abord économique³. Il est nécessaire de pouvoir circuler entre les *strings* des panneaux et l'urbanisme d'exposition optimale génère un prospect entre les bandes de panneaux de telle sorte qu'à l'échelle de la forme et vue en plan, une partie du territoire n'est pas producteur. À l'échelle de l'utilité énergétique, Smil [14] comme Mac Kay [13] évoquent des flux de production de cinq jusqu'à une dizaine de watts d'électricité. Pour l'installation statique des panneaux⁴, l'inclinaison des panneaux est en général plutôt horizontale : aussi, la saisonnalité de production suit dans ce cas une oscillation proche du flux solaire horizontal. Autrement dit, la récolte est très importante autour de l'été et beaucoup moins en hiver⁵.

Lors des deux visites que nous fîmes avec le *DPEA Architecture post carbone* à la centrale de Sourdun, en Seine-et-Marne et ses $4,5MW_c$, son exploitant nous apprenait que les meilleurs mois de production étaient davantage les mois d'avril et de mai que les mois d'été : la température était dans ce cas avantageuse et la petite perte de rendement dû à une élévation de températures importante jouait en défaveurs des mois d'été (Fig. 233).

¹ En réagissant comme un système photovoltaïque à tracker, c'est-à-dire en s'orientant continuellement de façon perpendiculaire au rayon du soleil.

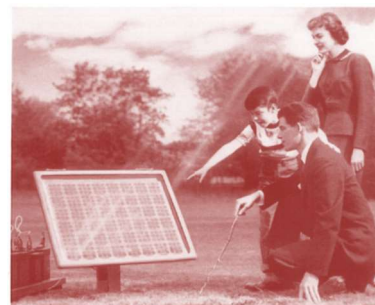
² $\sim 1361W/m^2 \cdot 15\% \cdot 0,5 \cdot 8760h$ (le satellite est à moitié dans l'ombre et à moitié dans la lumière au cours de ses révolutions)

³ Vendre le plus de kWh annuellement

⁴ Sans utiliser de systèmes orientables comme les trackers

⁵ Au moins sous nos latitudes.

Fig. 232. Premières photopiles par Bell Telephone



Something New Under the Sun. It's the Bell Solar Battery, made of thin discs of specially treated silicon, an ingredient of common sand. It converts the sun's rays directly into usable amounts of electricity. Simple and trouble-free. (The storage batteries beside the solar battery store up its electricity for night use.)

Bell System Solar Battery Converts Sun's Rays into Electricity!

Bell Telephone Laboratories invention has great possibilities for telephone service and for all mankind

Ever since Archimedes, men have been searching for the secret of the sun.

For it is known that the same kindly rays that help the flowers and the grains and the fruits to grow also send us almost limitless power. It is nearly as much every three days as in all known reserves of coal, oil and uranium.

If this energy could be put to use - there would be enough to turn every wheel and light every lamp that mankind would ever need.

The dream of ages has been brought closer by the Bell System Solar Battery. It was invented at the Bell Telephone Laboratories after

long research and first announced in 1951. Since then its efficiency has been doubled and its usefulness extended.

There's still much to be done before the battery's possibilities in telephony and for other uses are fully developed. But a good and pioneering start has been made.

The progress so far is like the opening of a door through which we can glimpse exciting new things for the future. Great benefits for telephone users and for all mankind may come from this forward step in putting the energy of the sun to practical use.

© BELL TELEPHONE SYSTEM

Fig. 233. Fermes solaires contemporaines classiques (et sans tracker). Visite à la centrale de Sourdun et photo de J.F. Blassel, directeur du DPEA Architecture post carbone. « L'enseignement a commencé lorsqu'un homme assis sous un panneau photovoltaïque s'est mis à discuter, sans savoir qu'il était un maître, avec des jeunes gens qui ignoraient être des étudiants [...] ». Citation (à peine transformée) de Louis I. Kahn

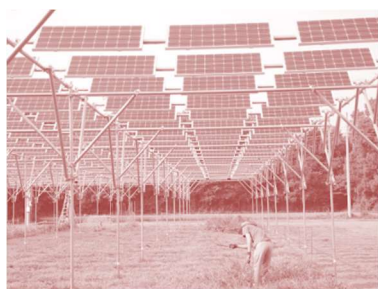


À l'échelle du panneau

Le solaire photovoltaïque est prometteur du point de vue de la facilité de son intégration et de son coût de production¹. Les technologies de cellules photovoltaïques sont de plus en plus variées : les technologies de première génération, aujourd'hui matures, et basées sur les propriétés du silicium², sont les plus répandues sur le marché. Son rendement de conversion en électricité est intéressant et est appelé à évoluer au cours des prochaines décennies. L'ordre de grandeur typique est de 15% : il varie cependant entre 5%, pour les technologies les moins efficaces et plus de 20% pour les derniers panneaux commercialisés. Du point de vue technologique, le rendement de conversion des prochaines générations de panneaux photovoltaïques tend vers 25%³. Smil [14] rappelle les fourchettes de record rendements selon les différentes technologies (NREL, 2014) :

Technologies émergentes ⁴	8,6%	-	17,9%
Couches minces	13,4%	-	23,3%
Silicium cristallin	20,4%	-	27,6%
Cellules multi-jonction	26,4%	-	44,7%

Fig. 234. *Production d'électricité et production de biomasse : faisable sur le même territoire ? Des expériences concluantes d'agrivoltaïsme ou la façon d'aménager les productions. Une thématique de recherche pour le temps VII (chapitre #21)*

*Quelques arguments économiques*

Autrement dit, dans des territoires disposant d'un flux moyen de 200 watts par m² comme gisement solaire⁵, le flux moyen de production d'électricité est de près de 40W_e par m² de panneau, ou encore plus de 350kWh d'électricité par an. Avec l'hypothèse d'un coût typique de revente réseau au détail de 0,15 euros par kWh, l'autoconsommation complète de cette production évite la dépense annuelle de plus 50 euros pour chaque mètre-carré de panneau. Un mètre-carré de sol génère ainsi un revenu de près de 50 euros par an : soit bien davantage que la plupart des productions agricoles, quoi que cette comparaison ait quelques limites (Fig. 234). En 2018, et pour une mise en œuvre peu sophistiquée, le coût d'investissement est de l'ordre d'un euro par watt-crête. Autrement dit, pour un panneau disposant de 20% de rendement⁶, l'installation de ce dernier était de l'ordre de 200 euros par m², soit le prix voisin d'un bardage architectural, à la différence que cet investissement rapporte 50 euros annuellement et que le temps de retour économique est dès lors plutôt bref. Pour des zones moins ensoleillées, comme à 50° de latitude⁷ et disposant d'un flux moyen

¹ Parité réseau effective déjà en plusieurs endroits du globe.

² Monocristallin ou polycristallin.

³ Et ainsi tendre vers puissance-crête surfacique de l'ordre de 250 à 300W.

⁴ Organiques, pérovskite...

⁵ Le cas par exemple d'une grande majorité des sites dans la bande tropicale.

⁶ Soit 200W_e.

⁷ À Paris par exemple.

de 125W par m², le flux moyen de production est supérieur à 25W_e par m² soit encore plus de 200kWh d'électricité produits annuellement.

Synthèse des principaux avantages

En situation urbaine, le photovoltaïque est une technologie disposant d'un bel avenir. En situation rurale ou péri-urbaine, le photovoltaïque peut trouver une multitude de solutions d'implantation simple et économique comme les hangars agricoles et industriels, les appentis, les toitures de garage etc. En synthèse de ces principaux avantages, retenons :

- Que le photovoltaïque est silencieux, comme d'ailleurs les autres techniques de récolte de l'énergie solaire, hormis peut-être le solaire thermodynamique du fait des machines thermiques qu'il suppose. Cet argument peut parfois être opposé aux éoliennes contemporaines.
- L'énergie produite est de plus haute exergie qu'un combustible primaire. La qualité énergétique de sa production est semblable à celle générée par l'éolien ou l'hydraulique.
- Son intégration architecturale est relativement simple : épaisseur faible du complexe producteur¹, intégration possible dans des systèmes verriers, un poids surfacique mesuré², etc. Le panneau photovoltaïque n'engendre pas de risques particuliers et la logique de sûreté à l'incendie est maintenant bien gérée (Fig. 236).
- Sa pérennité est intéressante, les rendements sont en général garantis à hauteur de 80% sur 20 ans minimum de vie. Cette valeur est assurée par les constructeurs : au minimum 90% du rendement nominal lors des dix premières années, et au minimum 80% lors des quinze suivantes.
- Le photovoltaïque ne requiert qu'un entretien assez faible et le nettoyage des panneaux s'effectue de temps à autre³.
- Enfin les externalités environnementales associées⁴ à sa fabrication tendent à diminuer grâce aux évolutions technologiques en cours⁵.

Synthèse des principales questions ou inconvénients

Sans faire l'examen complet des inconvénients des technologies photovoltaïques, on notera toutefois les conséquences éventuelles suivantes :

- La transformation de l'albédo des toitures et les conséquences éventuelles sur les effets d'îlot de chaleur pour une intégration en situation urbaine (#27). Cet effet pourra assurément être amoindri en ventilant la surface des panneaux et en les installant en sur-toitures, pergolas ou ombrières.

Fig. 235. *Train avec panneaux photovoltaïques*



Fig. 236. *Le Quartier Solaire au sein de l'écoquartier Vauban à Fribourg-Im-Brigsau et ses toits photovoltaïques*



¹ Le panneau solaire ne fait qu'une dizaine de millimètres d'épaisseur

² De l'ordre d'une dizaine de kilos au m²

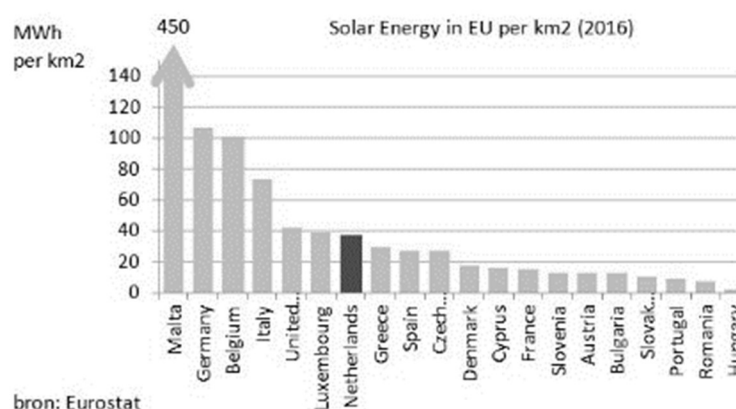
³ L'exploitant de la centrale solaire de Sourduin, la plus grande ferme solaire d'Île-de-France, de 4,5MWc, évoquait une fois maximum par an.

⁴ À titre d'exemple, on retient comme ordre de grandeur un remboursement de l'énergie grise au bout d'un à deux de production.

⁵ Amincissement des *wafers*, couches minces, prise en compte du recyclage...

- La problématique du stockage de l'électricité et les freins pour le développement massif de l'autoconsommation dans le secteur résidentiel¹. Mais son intermittence est relativement prévisible² et le dimensionnement des moyens de stockage associé est donc aisé. Le cycle jour-nuit facilite aussi une bonne gestion de la demande et une relative osmose entre offre et demande exergique. Nous avons de fait besoin de nous chauffer la nuit en hiver mais la plupart de notre demande d'énergie de haute qualité est davantage le fait des activités diurnes : se déplacer, communiquer... hormis l'éclairage nocturne.
- Le photovoltaïque est sensible aux situations de masque partiel³ [9]. Autrement dit, selon la configuration des panneaux entre eux et leur schéma de raccordement électrique, une ombre partielle sur un panneau peut faire chuter le flux instantané de production, voire de générer une surchauffe et une potentielle détérioration du panneau. Avant toute installation, il sera donc important de calculer des héliodons pour limiter ce risque.

Fig. 237. *Hierarchie des productions annuelles de photovoltaïques selon les pays européens d'après Eurostat (2018). La France en 13ème position avec moins de 40MWh par km² et par an, soit un flux moyen de 4mW par m²*



¹ Déphasage entre offre et demande

² Les prévisions d'insolation sont en effet plus sûres que celles associées à la prévision de production de l'éolien

³ Une ombre portée sur un panneau est susceptible de réduire la production des autres panneaux auquel il est aussi raccordé.

Temps de retour énergétique

Un autre indicateur intéressant pour évaluer les bénéfices environnementaux d'une technologie de production est son temps de retour énergétique (chapitre #20) : combien de temps faut-il aux panneaux pour produire autant d'énergie que celle consommée tout au long de son cycle de vie¹ ? L'Ademe et l'Hespul avançaient en 2008 un temps de retour de 2,6 ans pour des panneaux installés en région parisienne. L'institut Fraunhofer annonce en 2015 des temps de retour de l'ordre de 2 à 3 ans pour des panneaux construits et utilisés en Allemagne, suivant les technologies.

Wind-it et la complémentarité soleil-vent

La tour Wind-it fait l'objet d'un chapitre dédié (chapitre #26). Elle illustre aussi l'excellente complémentarité de production entre le gisement éolien et la production solaire (Fig. 238).

Le photovoltaïque mobile

Le rendement des cellules photovoltaïques peut être amélioré en incorporant des systèmes de trackers aux modules photovoltaïques : en suivant la course du soleil, les panneaux sont toujours orientés de manière optimale et produisent plus longtemps au cours d'une journée. La structure de support est cependant plus complexe et demande plus de maintenance. La diffusion possible des trackers ou systèmes suiveurs de la course solaire permettront aussi de maximiser la productivité annuelle (rapport entre la production annuelle surfacique et la puissance-crête de la technologie installée) (Fig. 239).

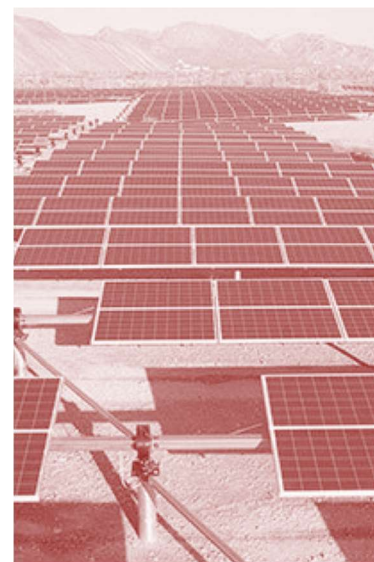
Le photovoltaïque et la production de chaleur

Aussi, on retiendra le développement possible des solutions photovoltaïques combinées assurant une production de chaleur : lame d'air réchauffée à l'arrière du panneau pour préchauffage de l'air neuf² ; ou échangeur solide-liquide participant à une production de chauffage à basse température ; ou encore des systèmes photovoltaïques à concentration³ : la chaleur est alors récupérée.

Fig. 238. *Tabelau de bord de production soleil-vent de Wind-it.*



Fig. 239. *Tracker mono-axe pour le photovoltaïque*



¹ Fabrication, transport...

² Et réduire d'autant les besoins en chauffage

³ Lentilles de Fresnel, miroirs paraboliques ou à double courbure, ...

Architectures potentielles

Le bardage de demain ?

On retient que l'installation du photovoltaïque en situation urbaine trouve une place de choix en l'intégrant en toiture. Cependant, l'étalement urbain offre de larges zones artificialisées très facilement *solarisables* : les parkings avec couverture photovoltaïque en constituent un bon exemple. Demain, une partie des voiries et la couverture des infrastructures de transport.

Vers l'électro-mobilité solaire

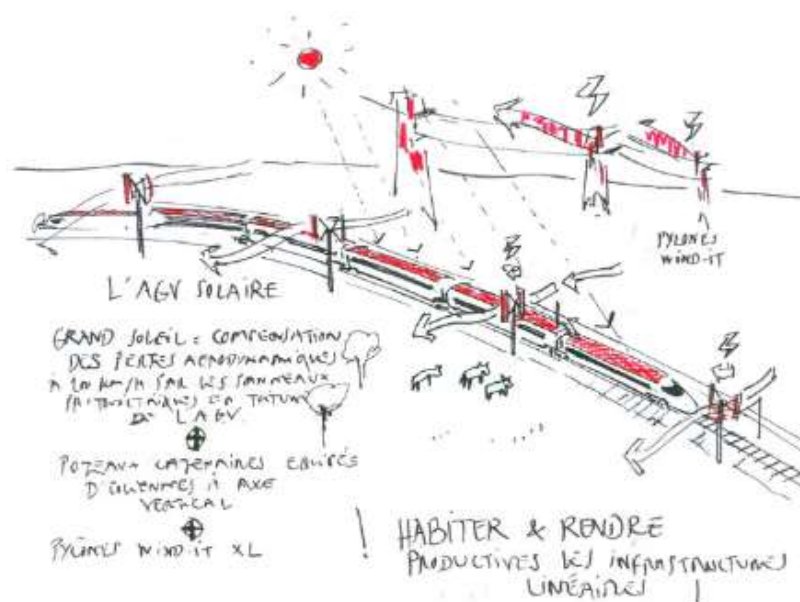
Au-delà de l'architecture, je me suis aussi souvent posé la question de l'intégration de la production du photovoltaïque dans les transports. Dans l'article pour l'Architecture d'Aujourd'hui [10], après un calcul coin de table, j'évaluais qu'un TGV solaire (dont le toit était intégralement couvert de cellules performantes) pourrait compenser par cette production l'intégralité des pertes aérodynamiques à 200km/h. Je me suis aussi penché sur des recherches autour de tricycles et quadricycles solaires. Récemment, quelques prototypes de voitures solaires commencent à apparaître¹ et dans la *Renaissance des Fabriques* [15], je fantasmiais sur un « ecorickshaw » solaire :

« La version la plus élaborée dispose de 4 roues, pèse 300 kilos et permet une vitesse maximale de 80km/h avec 4 passagers. Grâce aux cellules sur sa carrosserie, cette version est à énergie positive lors des belles journées d'été. On peut aller jusqu'à Knokke-le-Zoute uniquement grâce au soleil ! »

Fig. 240. Serre maraîchère avec intégration de panneaux photovoltaïques



Fig. 241. Le train solaire



¹ Le Solar Impulse.

Potentiel solaire des toits parisiens

En novembre 2015, l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR) a publié un Plan Local Énergie pour la métropole et Paris. Dans le cadre de cette étude, Elioth avait été missionné par l'APUR pour évaluer les enjeux, les opportunités et les contraintes de l'intégration des panneaux solaires photovoltaïques et thermiques. Cette étude [9] rappelait dans une première partie les caractéristiques des deux principales technologies de conversion de l'énergie solaire, puis compare leurs avantages et leurs inconvénients techniques et économiques respectifs (Fig. 242). Elle présentait également les enjeux de l'intégration de ces énergies renouvelables au réseau, avec les notions d'autoconsommation et d'autoproduction pour le photovoltaïque. Elle quantifiait ensuite les surfaces de panneaux installables pour huit typologies de bâti typiques de la métropole parisienne, de l'haussmannien au pavillonnaire, ainsi que les équilibres technico-économiques obtenus entre investissement et production d'électricité obtenue : coût de production du kWh, rendement des installations. Enfin, notre étude [9] concluait à un potentiel de plus de 2 millions de mètre-carrés solarisables : presque le double du potentiel évalué en 2013.

« Parmi les ressources locales, l'énergie solaire constitue avec la géothermie de minime importance l'un des principaux gisements d'ENR&R identifiés. Sur la base d'un cadastre solaire élargi au territoire métropolitain, un premier travail mené par l'Apur a ainsi permis d'évaluer un potentiel de 6 TWh (bâtiments résidentiels et centrales solaires). C'est dans l'optique d'affiner cette évaluation mais aussi de mettre en lumière les spécificités de chaque typologie de bâtiment que l'Apur et Elioth ont choisi d'affiner ce premier travail autour de l'intégration de panneaux solaires sur 8 typologies de toitures assez représentatives de la diversité de forme urbaine de la Métropole. [...] ».

Matière : les différents constituants

Les panneaux au silicium

Le silicium, cristallin ou amorphe, est largement dominant. Il est le deuxième élément le plus abondant sur Terre : il constitue 28% de l'écorce terrestre. Le silicium cristallin constitue 90% des capacités de production installées en 2014¹ [17] avec deux grands groupes, les technologies basées sur les *wafers* (Fig. 243) et l'autre, sur les couches minces. L'épaisseur actuelle des cellules est de l'ordre de 100 microns. La masse est inférieure à 1 kg par m² et la puissance spécifique est comprise entre 0,1 et 1 W par gramme. Autrement dit, un kilo de matière sera capable de délivrer plus de 4000 kWh d'énergie sur sa durée de vie. Concernant son déploiement à grande échelle, la tension devrait être davantage sur le métal argent que la silice : l'étude du MIT [17] conclue que l'infime fraction d'argent présente devrait donc être réduite voire remplacé mais que rien ne s'oppose

Fig. 242. L'étude pour l'APUR [9]

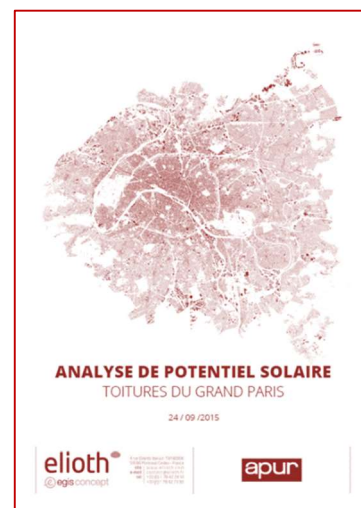


Fig. 243. Lingots de silicium en amont de la découpe des wafers



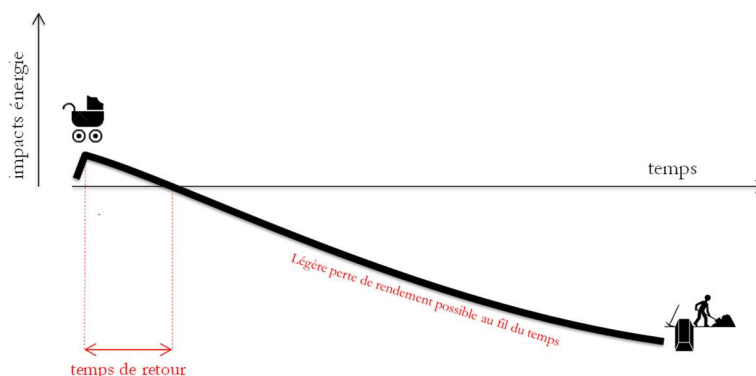
¹ MIT Study on the future of solar energy, p24

à ce que le constituant essentiel, le silicium puisse se déployer à grande échelle¹.

Émissions de gaz à effet de serre

Parmi tous les moyens de production d'électricité du mix français, les panneaux solaires photovoltaïques font partie de ceux qui n'émettent pas de dioxyde de carbone (CO₂), avec le nucléaire, l'éolien et l'hydraulique. Cette technologie contribue donc à la baisse des émissions de CO₂ « instantanées » du réseau électrique français. Il est important cependant de prendre en compte les émissions tout au long du cycle de vie des moyens de production et non pas seulement au moment de leur utilisation : là aussi, le solaire photovoltaïque est intéressant, avec une empreinte de 55 grammes en moyenne de CO₂eq par kWh produit, contre 82 grammes de CO₂eq par kWh pour le mix français en 2014, d'après l'Ademe. Plus précisément, un panneau fabriqué en Chine, installé au Nord de la France atteint les 80 gCO₂eq par kWh, contre 43 gCO₂eq par kWh pour un panneau fabriqué en Allemagne, dans la même situation.

Fig. 244. *Temps de retour énergétique pour un panneau photovoltaïque*



¹ Les autres technologies : Tellure de cadmium (CdTe), le sélénium de cuivre et d'indium (CuInSe₂) et l'arséniure de gallium (GaAs). La fabrication du lingot de silicium et la découpe des fines tranches. Épaisseur actuelle ?

Synthèse énergie-matière

Type de production pour le photovoltaïque à concentration

Type de production	Électricité
Rendement typique	15% - 20%
Rendement max.	35% - 40%
Contenu exergetique	~100%
Récupération possible de la chaleur	
1 kilo	100 à 1000 Wc de capacité
1 kilo	2000 à 20000 kWh électriques sur la durée de vie
Durée de vie	20 ans mini
Facteur de charge	10% à 25%

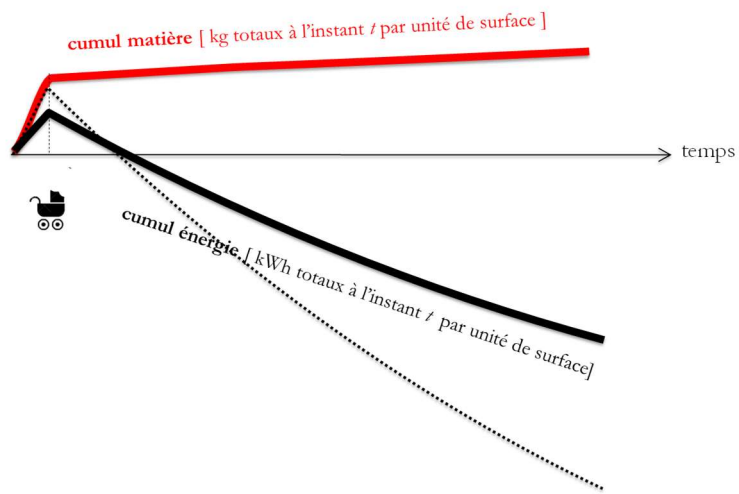
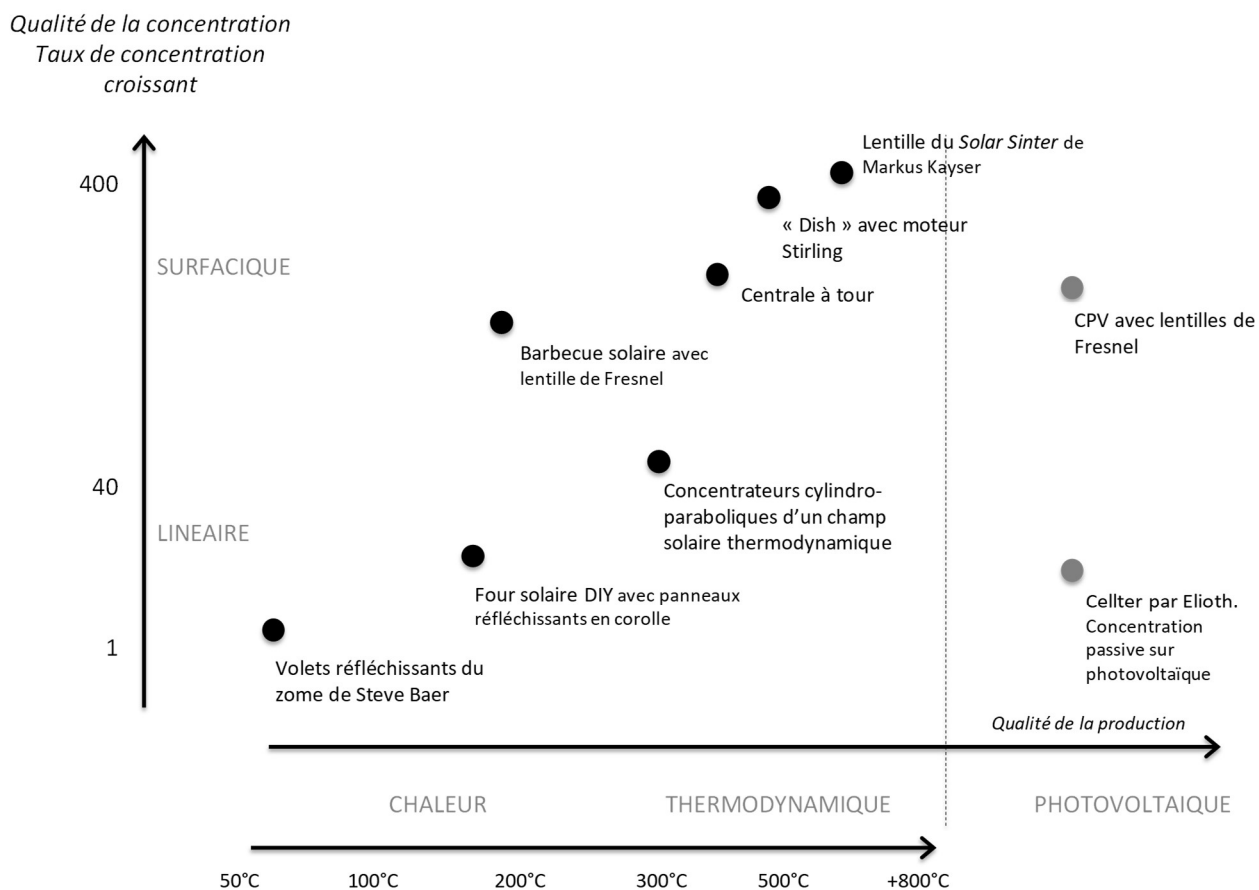


Fig. 245. Diagramme énergie-matière du solaire photovoltaïque. La courbe pointillée correspond à la chaleur fatale (de faible qualité) potentiellement récupérable : technologies développées par quelques start-ups.

Bibliographie

1. BERNARD Jacques, *Energie solaire. Calculs et optimisations*, Ellipses, 2004
2. FERRY Robert, MONOIAN Elizabeth, *A field guide to renewable energy technologies*, land art generator initiative, www.landartgenerator.org, 2012
3. BOUET Paul, xxx
4. PERLIN John. *Let it Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy*, New World Library, 2013
5. DESSUS Benjamin, PHARABOD François, *L'énergie solaire, Que sais-je?*, 2002
6. SINGH Madanjeet, *L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature*, Unesco France Loisirs, 1998
7. ALEXEANDROFF Georges et Jeanne-Marie, *Architectures et Climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, Berger-Levrault, 1982
8. MENARD Raphaël, « Introduction au développement durable » (p134 à 139) et contributions dans le reste de l'ouvrage, *Naissances et renaissances de mille et un bonheur parisien*, J. Nouvel, JM Duthilleul et M Cantal-Dupart, Les éditions du Mont Boron, avril 2009, 638 pages.
9. ELIOTH, *Analyse de potentiel solaire. Toitures du Grand Paris*, étude réalisée pour l'APUR, 2015 [lien de téléchargement]
10. MENARD Raphaël, « Un Petit Dessin vaut mieux qu'un long discours » (p64 à 71), Perspectives Durables, *L'Architecture d'aujourd'hui*, 2011
11. REISER, *L'écologie*, Glénat, 2010
12. RIFKIN Jeremy, *La troisième révolution industrielle. Comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde*, Éditions Les Liens qui libèrent, 2012
13. MAC KAY David JC., *L'Energie durable, pas que du vent*, Oxford, De Boeck, 2012. Titre original: *Sustainable Energy - Without the hot air*. Cambridge, UIT Cambridge, 2009
14. SMIL Vaclav, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015
15. MENARD Raphaël, *La Renaissance des Fabriques. Un monde possible en 2050*, 2015
16. MENARD Raphaël, « Mutations des programmes » (p27 à 31), dans *Architecture = durable*, Catalogue de l'exposition du Pavillon de l'Arsenal, 2008
17. MIT, *The Future of Solar Energy*, 2015

Fig. 246. Diagramme comparant les différentes techniques de concentration optique du flux solaire.



#14 L'architecture des fossiles (temps IV.2 .3 .4)

Deuxième partie de l'architecture des fossiles, postérieure à l'essor du pétrole et du gaz. Un chapitre en trois séquences : le règne des fossiles, des rebroussements en gestation, la démesure qui dure.

Le règne des fossiles (temps IV.2)

Étendue temporelle :

- 1859 *Premier puits de pétrole par Drake aux Etats-Unis*
- 1850 *Convertisseur Bessemer : affinage de la fonte brute en acier*
- 1870 *Premiers essais de béton armé par Payne et Hyatt*
- 1880 *Premières centrales à charbon produisant de l'électricité*
- 1900 *Début du bitume (dérivé du pétrole) sur les routes*
- 1900 *Début de la climatisation dans les grands immeubles*
- 1930 *Début de la polymérisation et de la plasturgie*
- 1950 *Utilisation de l'aluminium pour la structure*
- 1950 *Premiers containers Liberty ships par Sea-Land Service*
- 1952 *Début du verre structural Glasbau Hahn, Frankfurt am Main*
- 1973 *Embargo de l'OPEP. Premier choc pétrolier*

Énergies nouvelles :

- Gaz*
- Pétrole*
- Usage civil et militaire de la fission nucléaire*
- Fusion nucléaire non contrôlée (bombe H)*

Matières nouvelles :

- Plastiques*
- Alliages métalliques*

Quelques architectures du temps IV :

- 1904 *25 bis, rue Benjamin-Franklin par Auguste Perret*
- 1932 *Immeuble Clarté par Le Corbusier*
- 1954 *Le Pavillon de l'Aluminium par Jean Prouvé*

Incroyable pétrole

1859, point de départ

Dans *Or noir : La grande histoire du pétrole* [1], Mathieu Auzanneau revisite toute l'histoire moderne et contemporaine au prisme du lien entre nos sociétés et ce vecteur énergétique omniprésent. Le pétrole offre une incroyable densité énergétique : 42MJ par kilogramme¹ soit trois fois plus que des résidus de biomasse et à comparer aux 17MJ par kilogramme du bois séché² (sur la biomasse, voir #10). La combustion d'un litre de pétrole dégage autant d'énergie thermique que la chaleur dégagée par un corps humain pendant près d'une semaine. Carburant d'un moteur à pistons, un litre de pétrole permet de dégager plus de 3kWh d'énergie mécanique, soit autant d'énergie que les trente heures de travail cumulé d'un forçat.

Des geysers de richesse

Dans *Power Density*, Smil [2] cite l'incroyable valeur de flux d'extraction de certains puits de pétrole. En divisant la production annuelle d'un gisement par son emprise physique, Smil [2] en déduit une densité moyenne de puissance : l'équivalent de 20 000 watts par m². Une grandeur *hors de proportion* avec les flux que l'humanité avait pris l'habitude de patiemment récolter : la biomasse autorise la récolte d'au maximum quelques dixièmes de watts par m² (#10). On comprend ainsi l'atout du *capitalisme fossile* [3] : la richesse se concentre en des points singuliers sur la géographie du monde, de véritables geysers de puissance quasi-gratuite (Fig. 247), vendue ensuite avec des marges *hors d'échelle* [4]. Dans *Or noir* [1], Auzanneau détaille en particulier la fulgurante richesse de *Rockefeller. The man who sold the world comme chantait David Bowie.*

L'automobile, catalyseur du pétrole

Pour Bonneuil et Fressoz [5], le pétrole signe le départ de la *Grande Accélération*. L'ère du pétrole est concomitante avec le développement de la mobilité individuelle, Auzanneau [1] relate que son essor est intimement lié au succès de la *Ford T* (Fig. 248) : ce succès du capitalisme moderne permet enfin un usage de cette huile légère dont on ne savait que faire, hormis l'éclairage par les lampes éponymes. Singh [6] rappelle que dès 1900, les progrès en thermodynamique³ et l'augmentation de la température de la vapeur ont permis d'accroître le rendement et de le porter à 17%. Aujourd'hui, le rendement de conversion atteint les 40%.

« Mais c'est bien la Seconde Guerre mondiale qui produit la rupture décisive. Elle marque un saut énergétique par rapport à la Première. En moyenne, le soldat américain de la Seconde Guerre consommait 228 fois plus d'énergie que celui de la Première. » [5]

Fig. 247. Puits de pétrole à Bakou en 1873



Fig. 248. La Ford T et le moteur à explosion, grand essor du pétrole.

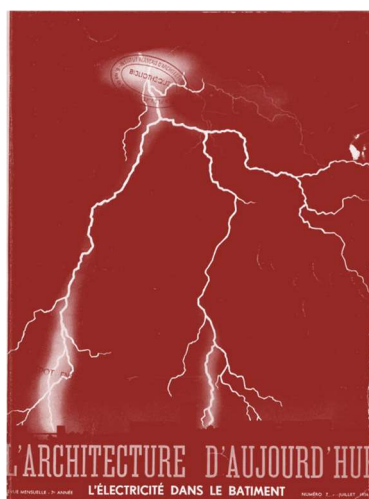


¹ Soit 11,6kWh/kg

² Et jusqu'à 30MJ avec la pyrolyse du bois et la fabrication du charbon de bois.

³ Notamment les trois cycles séparés d'expansion

Fig. 249. *L'Architecture d'aujourd'hui*, 1936



Fabuleuse électricité

Energie à diffusion quasi-instantanée

Au début du vingtième siècle, cette deuxième révolution s'enclenche par le règne du pétrole et par l'émergence d'un vecteur énergétique à haute qualité énergétique, la *fée électricité* célébrée par Raoul Duffy. Les vecteurs finaux se simplifient, sont moins sales (électricité) et se stockent facilement en concentrant l'énergie dans peu de masse et peu volume. Petit à petit, la seconde révolution industrielle permet l'externalisation de la logistique de la *matière-énergie* grâce à la mise en place des grands réseaux énergétiques¹. Les bâtiments deviennent moins dépendants des flux de matières² : les utilités centralisées, extérieures souvent aux villes, se chargent de gérer ces flux³. La ville s'affranchit progressivement de la gestion de ces flux de matière ; les bâtiments donnent alors l'illusion de ne consommer des matériaux que pour leur édification, leur rénovation ou leur aménagement intérieur.

« En 1936, le cycle de vie de l'électricité se développe encore à l'échelle régionale. Il existe des compagnies locales de distribution et une cohérence entre producteurs, transporteurs et consommateurs locaux. Les questions qui se posent aujourd'hui en termes de transition énergétique, notamment l'Energiewende en Allemagne sont très proches de celles de la France de 1936. [...] Une carte nous rappelle qu'il y avait des centrales de production à Saint-Ouen, à Gennevilliers, à Saint-Denis, à Ivry etc. Aujourd'hui, elles ont disparu, poussées hors les murs pour différentes raisons : le foncier, le risque... Non seulement la production a été reléguée dans l'arrière-cour de l'urbain – la campagne ou le périurbain –, mais on a également assisté à la disparition physique du réseau de distribution. A Paris, par exemple, toutes les lignes sont enterrées. On a littéralement perdu le fil. Symboliquement, le rapport à l'énergie est rendu abstrait. » [7] (Fig. 249)

L'électricité est magique, elle est une sorte de « donneur énergétique universel », un « rhésus O- de l'énergie » : elle permet l'éclairage, la transformation aisée en énergie mécanique, en chauffage, en communication, en transformation chimique. L'électricité permet la quasi-totalité des besoins électriques finaux. Selon cette métaphore sanguine, la chaleur à basse température aurait pour groupe AB+, et serait un « receveur énergétique universel ».

Brève histoire de l'électricité

En amont de cette révolution et de l'invention de ce fantastique vecteur énergétique, Singh⁴ [6] évoque la filiation des sciences et des techniques ayant permis son émergence. Depuis la découverte accidentelle de la magnétite et de la description de ses propriétés au 13^{ème} siècle par Petrus Peregrinus de Maricourt, puis les traités sur le magnétisme et les forces électrostatiques au cours du 16^{ème} et 17^{ème} siècle, les progrès en mathématiques

¹ Électricité, réseau de chaleur etc.

² Bois, charbon ou fioul

³ Combustibles fossiles, combustibles fissiles

⁴ Singh, pp137-138

au début du 19^{ème} siècle permettent l'avancée de travaux théoriques profonds avec les physiciens Henry Cavendish, Charles Coulomb et Siméon Denis Poisson, avant les ampoules de Thomas Edison en 1882. La première automobile à avoir franchi les cent kilomètres par heure et d'ailleurs électrique : la *Jamais contente* du belge Camille Jenatzy en 1899 (Fig. 250).

Un chronogramme énergie-matière d'un moteur de voiture

La voiture

Ce deuxième épisode de la démesure de la modernité, de l'émergence de l'hypertrophie est assurément celui de la voiture : l'ajout d'un nouveau besoin énergétique à très forte empreinte « énergie-matière-climat », la mobilité individuelle motorisée de l'ère thermo-industrielle. Les quelques scénarios ci-dessous (Fig. 251) détaille les besoins énergétiques et les émissions associées en fonction de l'usage et des véhicules. Selon un scénario moyen, l'empreinte individuelle de la voiture correspond à l'émission de près de 2 tonnes de CO₂ par an et à un flux moyen d'énergie d'environ mille watts : ces besoins sont dix fois supérieurs donc à notre flux métabolique. (chapitre #7).

Fig. 250. *La Jamais Contente, première voiture à franchir les 100km/h en 1899 : elle est électrique.*

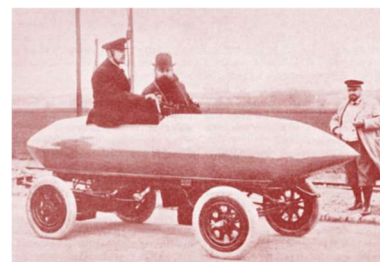
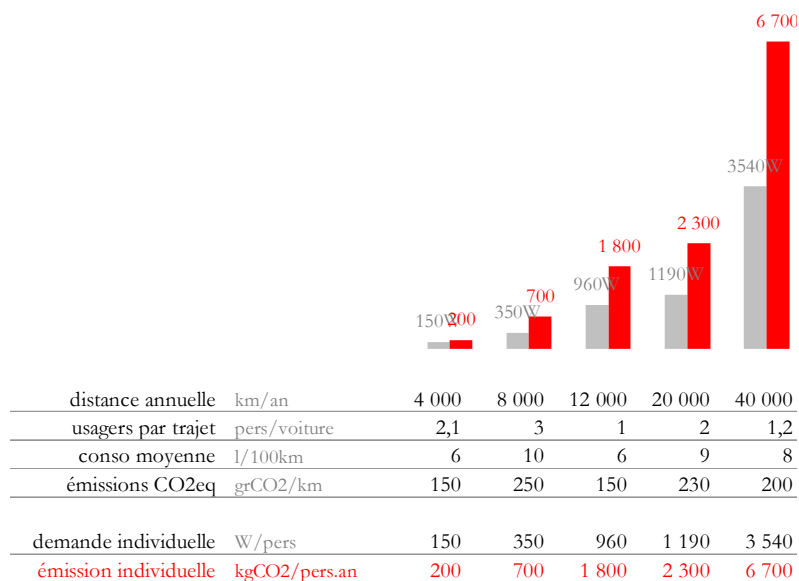


Fig. 251. *Conséquences énergie-climat des usages de l'automobile en fonction des usages et selon l'efficacité du véhicule thermique utilisée.*



Le moteur thermique

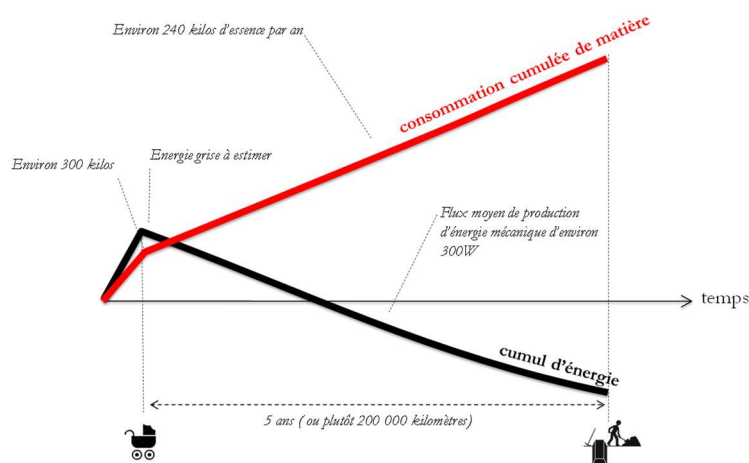
Fig. 252. Un moteur de voiture



Le calcul qui suit s'intéresse à une sous-partie de l'automobile : son moteur. En première approche, nous considérons qu'un moteur automobile pèse environ 300 kilos, que la durée de vie de cette « petite utilité énergétique » capable de transformer l'énergie chimique contenu dans les hydrocarbures en énergie mécanique, est davantage du fait de la durée réelle d'utilisation, plutôt que liée à l'âge du véhicule (Fig. 252).

En effet, usuellement, la vétusté de l'automobile est d'abord caractérisée par la distance parcourue. Pour notre évaluation, nous choisirons comme valeur caractéristique 200 000 kilomètres, distance parcourue sur 5 années, soit une moyenne de 40 000 kilomètres par an. Nous faisons l'hypothèse d'une consommation d'essence moyenne de 8 litres au cours de ce long usage : le moteur aura donc consommé environ 240 kilos d'essence par an en moyenne¹. En considérant que le rendement de conversion aura été en moyenne de 20%, l'énergie mécanique annuelle produite est d'environ² 2900 kWh d'énergie mécanique, soit un flux moyen de production d'environ de 330 watts. Ainsi, analysé comme un organisme, ce moteur de voiture aura transformé une quantité considérable de matière, sans compter d'ailleurs l'ingestion de l'oxygène comme comburant (Fig. 253).

Fig. 253. La photo d'un moteur de voiture (celui de la 504). Le chronogramme énergie-matière d'un moteur thermique en intégrant le poids du combustible. Nota, ajouter une courbe rouge en pointillé, hors carburant.



¹ 1600 litres d'essence sur les 5 ans et avec une densité de 0,75kg par litre

² 1600 litres par environ 33MJ/l soit environ 14700kWh d'énergie mécanique

L'architecture démiurgique

Déchainement d'énergies

Ce déferlement de puissance, cette disponibilité en énergie permet une architecture « hors de contrôle », toute puissante, pouvant tout commander [8]. Cet *open bar* énergie-matière renverse les rôles, il retourne la direction des influences des temps précédents (chapitres #7 et #9). Avant les fossiles, l'architecture devait composer avec la disponibilité mesurée des matières et des énergies : leur rareté conditionnait le champ des possibles de la faisabilité constructive. Avec la puissance *hors d'échelle* des énergies fossiles [9], l'architecture peut désormais tout se permettre.

Architecture → *Matière* → *Energie*

Le génome constructif, le code architectural, la ligne de commande du dessin, l'aphorisme ou le croquis de l'architecte, la note d'intentions peuvent tout choisir et (presque) tout engendrer. L'architecte a les pleins pouvoirs, il pénètre l'ère de l'« architecture carbone », l'« architecture de tous les fossiles » : les énergies fossiles comme intrants du processus de construction et de transformation de la matière, énergies fossiles pour l'exploitation de l'œuvre construite et l'usage de l'édifice.

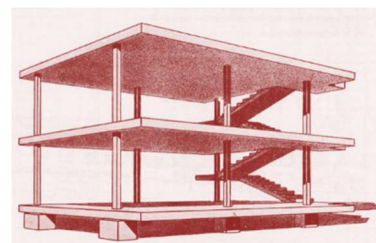
Perte du biosourcé

Comme le rappelle John R. Mac Neill dans la préface de son livre [9], les énergies fossiles induisent tout, y compris la capacité de transformation de la lithosphère, de la croûte terrestre. Gratter, fouiller, extraire les matières du sol de façon de plus en plus profonde coûte peu, l'énergie étant presque gratuite [5]. Aussi la modernité architecturale découvre des ingrédients nouveaux pour composer la structure et l'enveloppe de l'édifice (Fig. 254). Certains de ces matériaux, souvent composites comme le béton, permettent de renouveler totalement la composition architecturale. Les cinq points de la Modernité, la maison Domino n'existerait pas sans le béton, qui lui-même n'aurait pas obtenu des parts de marché identiques dans le vocabulaire constructif global sans les énergies fossiles. L'architecture oublie l'usage du biosourcé (chapitre #29), l'art du réemploi et l'opportunisme frugal des disponibilités locales de la matière (chapitre #17).

Perte de savoir

La Grande Accélération [5] est celle aussi de la démographie. Les besoins de reconstruction suite aux guerres du 20^{ème} siècle réclament des procédés de construction massifs et à très grande échelle. Le code architectural devient générique. L'essor de l'industrialisation et de la construction modulaire forcent la perte des savoirs locaux [10]. Les chantiers de relogement et de reconstruction ont largement recours à l'usage du béton préfabriqué, dans une logique d'optimisation du flux de production et les chemins de grue des futures cités dortoirs dessinent les voiries pour les décades à venir. À l'heure du pétrole peu cher, Hubert Lempereur rappelle que les

Fig. 254. *Maison Domino. Une histoire de la course à la hauteur des tours.*



grandes figures de la Modernité sont rétives à toute intention relative à l'efficacité énergétique :

« Malgré le développement spectaculaire des isolants industriels, il est toute une école constructive qui n'a jamais cessé de croire en une réponse fondamentale et non techniciste aux enjeux thermiques et énergétiques de l'architecture. Un architecte aussi important qu'Auguste Perret avait excellemment représenté ce point de vue selon lequel l'isolation était seulement destinée à protéger "contre les variations excessives de température extérieure". »¹

Fig. 255. *Seconde partie du Temps 4 (entre 1850 et 2000) : la grande accélération et l'achèvement vers une croissance fondée sur les stocks fossiles tant du point de vue de l'énergie que de la matière.*

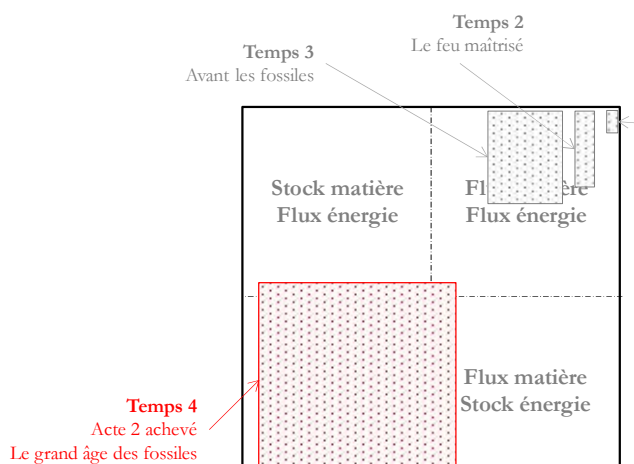
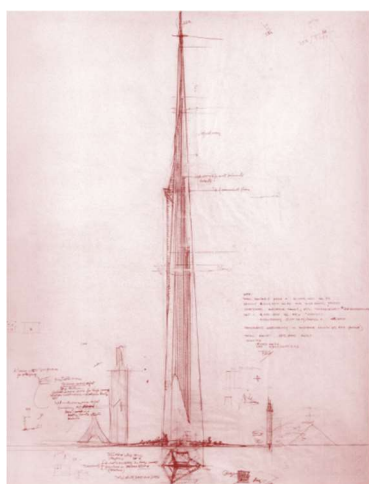


Fig. 256. *1 mile tower de Wright*



La figure du gratte-ciel

La fin du 19^{ème} siècle et surtout les premiers temps du 20^{ème} siècle voient naître une nouveauté bouleversant les imaginaires. La conquête du ciel, les dirigeables, le premier vol des frères Wright (1906), le rôle déterminant de l'aviation au cours de la Première Guerre Mondiale : et si l'architecture allait elle aussi à la conquête de l'altitude pour tutoyer les nuages ? Et si le bâtiment-machine empruntait les briques techniques de ces engins volants sophistiqués ? Par la prouesse du béton, par la qualité de résistance mécaniques des aciers, par l'effet papillon d'innovation technique telle que l'invention des taquets sécurisant les ascenseurs [11], l'architecture fait naître un nouvel archétype, une nouvelle espèce dans le zoo des constructions : la tour, le gratte-ciel. Les grandes figures de l'époque rivalisent de concept pour tutoyer les cieux : la *1 mile tower* de Wright (Fig. 256), le *plan Voisin* de Le Corbusier, les tours de Tony Garnier...

¹ D'Architectures #256, sept 2017, «Isoler dans un monde 'conservateur-libéral-socialiste'».

Figures urbaines de la densité morphologique

Les tours se condensent, elles font apparaître les figures de l'hyperdensité morphologique, l'essor du quartier de tours, l'émergence de formes urbaines nouvelles comme le *manhattanisme*. À l'horizontal, des figures nouvelles de l'architecture apparaissent, qui emprunte leurs inspirations aux infrastructures : le *plan Obus* de la Corbusier (Fig. 257), les bâtiments kilométriques, les utopies mégastructurelles des architectures japonaises au cours des années 1960-70 (voir les ISU, les Infrastructures Solaires Urbaine, #16). Le monde est entrain de franchir un ordre de grandeur, sauter une mantisse : toutes les échelles peuvent être largement amplifiées. L'énergie est abondante, les machines peuvent développer des puissances immenses qui autorisent tous les exploits. À chaque amélioration dans l'utilisation des matériaux (comme par exemple l'utilisation de super-fluidifiants), une nouvelle figure *hors d'échelle* apparaît, comme la *Grande Arche de La Défense*, avec ses bétons performants et ses 300 000 tonnes [12].



Fig. 257. *Plan Obus*

Des rebroussements en gestation (temps IV.3)

Étendue temporelle

- 1952 *Le smog de Londres tue des milliers de personnes*
- 1972 *Rapport Meadows, Limits to Growth*
- 1973 *Embargo de l'OPEP. Premier choc pétrolier*
- 1979 *Révolution iranienne. Second choc pétrolier.*
- 1986 *Accident centrale nucléaire de Tchernobyl, Ukraine, ex-URSS*

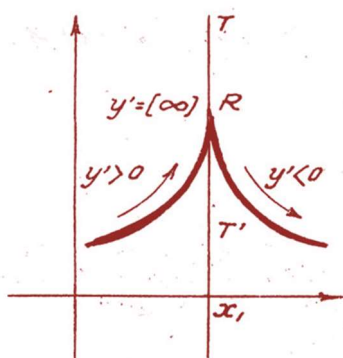
Énergies nouvelles

- Gaz de schiste*
- Huiles de schiste*
- Sables bitumineux*
- Surgénérateur nucléaire*
- Tokamak pour essai de fusion contrôlé*

Architectures et urbanismes

- 1933 *Dymaxion House*
- 1935 *Broadacre City par Frank Lloyd Wright*
- 1950 *Chandigarh et Grille Climatique par Xenakis et Le Corbusier*

Fig. 258. *Un point de rebroussement*



« En 1965, quelques temps avant Buckminster Fuller, le politicien américain Adlai Stevenson lançait les prémices de la métaphore du Spaceship Earth lors d'un discours aux Nations Unies : nous, terriens, sommes une communauté d'astronautes ; notre station internationale est de forme sphérique ; sur cette sphère, notre habitat dispose de ressources finies pour garantir notre survie et pour initier notre développement collectif et durable. Depuis un demi-siècle, et nonobstant l'évocation de cet imaginaire, nous restons désespérément englués dans les mirages du premier principe de la thermodynamique et nous sommes toujours soumis au règne tyrannique du cycle de Carnot : l'illusion de la permanence des ressources énergétiques fossiles, transformables à souhait en travail mécanique [13]. Le citoyen a perdu toute mesure de cette profusion énergétique [14]. Selon des axiomes en phase avec cette ignorance énergétique, notre économie reste fondée selon les préceptes d'une croissance continue de création de richesses. Pourtant, cette simplification mathématique de nos théories économiques atteint son asymptote : la vitesse de notre expansion consumériste -en quantité et en intensité- nous projette depuis quelques décades contre la frontière du big crunch de notre survie collective [8]. Les forces de rappel induites par les externalités sociales et environnementales nous font de fait entrer dans l'ère du deuxième principe : celle de l'entropie (pour caractériser notre désordre et l'entremêlement inextricable des déchets et pollutions) ; irréversibilité (très certainement déjà acquise pour le climat). » [15]

Fuller

L'émergence d'une vision systémique

En 1961, Buckminster Fuller avec son *World Game* popularisait et transformait en jeu l'exploration prospective, l'interprétation de tendances de fond (Fig. 259). Une partie du dessin du monde est prévisible, certains futurs sont plus probables que d'autres. À leur manière, les climatologues du GIEC poursuivent ce projet en explorant les tendances lourdes du climat planétaire des décades à venir.

La quête d'une technologie efficace

Buckminster Fuller est un Elon Musk avant l'heure. Iconoclaste, Fuller entretient ses liens avec le complexe militaro-industriel, possède une technophilie certaine qu'un Norman Foster tentera de se réapproprié à bon compte un demi-siècle plus tard. Il y a une passion conjointe pour la mécanique, la *Dymaxion Car* pour Bucky, le jet et l'avion pour Foster, l'aviateur. Dans cette quête d'une modernité technologiquement efficace, il y a l'idée qu'industrialisation et efficacité doivent se jouer à grande échelle : les maisons *Dymaxion* résonnent avec la théorie des *Synergetics*... En France, l'éclectisme d'un Jean Prouvé appartient au même paradigme. Prouvé pratique des autopsies en croquis des 2CV lors de ses cours célèbres du Conservatoire des Arts et Métiers (Fig. 261). En parallèle, depuis Nancy, il étudie l'industrialisation de maisons économes et confortables.

L'efficacité de la matière

Fuller explore davantage l'efficacité énergétique que la production locale d'énergies. On peut regretter qu'il n'ait pas exploré davantage le domaine des renouvelables. Fuller est une figure centrale de l'émergence du temps VI (#17) et fort de son aura, il contribue grandement aux recherches autour des géométries et des structures de très grande portée, autour des dômes géodésiques notamment (Fig. 260). Il explore la syntaxe géométrique de la légèreté et théorise un calepin savant de la sphère, qui sera nommé plus tard en hommage, la fullerène (C60).

La mort de la Modernité

Il y a quelque chose de pourri au royaume du Danemark

Dans son ouvrage, *Une question de taille* [16] et dès son prologue, Olivier Rey relate l'expérience crépusculaire de l'opération Pruitt-Igoe, nom du quartier dessiné par l'architecte Minoru Yamasaki¹, opération gigantesque, hors norme par sa taille. Construit en 1955, ce programme de logement social à Saint-Louis dans le Missouri, se composait de trente-trois barres de onze étages et de deux mille huit cent soixante-dix appartements.

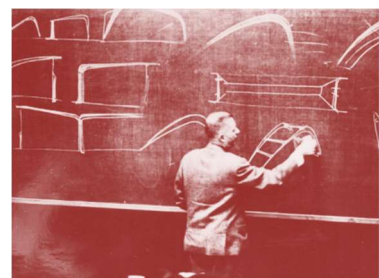
Fig. 259. *La carte du World Game*



Fig. 260. *Le dôme au-dessus de Manhattan par Buckminster Fuller*



Fig. 261. *Jean Prouvé au tableau*



¹ Rey nous rappelle qu'il est également l'auteur des tours jumelles du World Trade Center

Fig. 262. *Pruitt-Igoe*

D'inspiration moderniste, ce quartier sera pourtant un retentissant échec, conduisant à des violences urbaines et à l'exclusion sociale. Devenu icône d'un mal urbain, l'énergie grise de ces monstres de béton sont détruites entre 1972 et 1976 (Fig. 262). Rey [16] rapporte aussi les mots de Charles Jencks :

« L'architecture moderne est morte à Saint-Louis, Missouri, le 15 juillet 1972 à trois heures trente-deux de l'après-midi (ou à peu près), quand le tristement célèbre programme Pruitt-Igoe, plus exactement plusieurs de ses barres, ont reçu le coup de grâce en étant dynamités. »¹

Quantification de l'impact de Pruitt-Igoe

Quelle quantité d'énergie grise a été dilapidée pour uniquement dix-sept ans ? En supposant que la taille moyenne des logements était d'une cinquantaine de mètre-carré, que l'énergie grise nécessaire à l'édification était de 1000kWh par unité d'espace, Pruitt-Igoe avait donc réclamé environ 150 millions de kWh, soit l'équivalent de 100 000 barils de pétrole. Sur sa courte vie, l'amortissement de la dette constructive de Pruitt-Igoe correspondait à un flux moyen de près d'un mégawatt. Plus loin dans la première partie, intitulée « Ambiance générale », Olivier Rey [16] spécifie un trait de la post-modernité, « le changement d'horizon temporel ». La modernité sous-tendait un avenir infini, la post-modernité convoque un avenir incertain. 1972 marque la date de parution du fameux rapport du Club de Rome [17] avec comme point fondateur la finitude des stocks terrestres et la nécessité de stabiliser la concentration croissante des exutoires : le futur est décidément moins sûr (#18).

Les Meadows

Limits to Growth

Tous les flux nécessaires à la vie et à la société peuvent se décrire en débit, en crédit et en stock : eau, énergie, matières, population, économie, pollution... C'est sur la base de ce schéma métabolique et systémique, et dans le cadre d'une commande du Club de Rome, largement financé à l'époque par Volkswagen, que l'équipe emmenée par les Meadows avait élaborée en 1972 le modèle global conduisant aux différents scénarios du rapport devenu mondialement célèbre (et traduit en français), *Les Limites de la Croissance (dans un monde fini)* [17]. Ce rapport synthétisait et interprétait les résultats des simulations issues de la dynamique des systèmes. Le moteur de calcul, l'algorithme *World3* modélisait les interactions entre ressources fossiles, démographie, pollutions, alimentation, production des terres arables etc. (Fig. 264). Il est extrêmement touchant de découvrir l'épopée de la création de ce rapport, de l'importance et du rôle-clé de Donella Meadows à travers le documentaire *Last Call* [18].

Fig. 263. *Les auteurs de Limits to Growth*

¹ Cité p11 et extrait de *The Language of Post-Modern Architecture*, p9

Le vaisseau terrestre modélisé

De façon médiatique, ce rapport [17] était l'un des premiers à tirer le signal d'alarme planétaire. Nos modes de vie n'étaient pas soutenables. Tôt ou tard, toutes les croissances se heurteraient à une asymptote, à un déclin ou à une chute rapide. *Limits to growth* [17] anticipait le déclin des énergies fossile, la perte de rendement des terres arables, les transitions ou les krachs démographiques à venir comme l'urgence d'une bonne prise en compte des exutoires environnementaux : acidification des océans, augmentation de concentrations des polluants, importance des gaz à effet de serre etc.

Ignis Mutat Res, 2011

Limits to growth est associé à la venue de Denis Meadows à Marne sous l'invitation de Sébastien Marot pour le lancement du programme de recherche *Ignis Mutat Res* (Fig. 265). Il était touchant de voir comment les théoriciens s'étaient réunis à Marne autour de cette conférence, dont Yves Cochet que j'avais invité à participer à notre équipe de recherche, *Reforme* [15] dans le cadre de ce programme. Pendant cette intervention, et presque quarante ans après le signal d'alarme du rapport, Meadows nous invitait à la résignation de la résilience et avait cessé de croire à la capacité du monde d'avoir réadhéré à temps aux trajectoires de permanence. Nous devions nous préparer aux chocs à venir, ce dont il sera question avec l'architecture du temps VII au chapitre #18.

Une bifurcation loupée

Le monde aurait pu être resolarisé plus tôt

Ainsi naît ce sentiment de gâchis, de temps perdu, d'opportunités louppées et d'irréversibilité. La transition des années 1970-80 a été ratée. Carter fait installer des panneaux solaires sur les toits de la Maison Blanche qui seront démontés par Reagan lorsqu'il le remplacera [19]. L'humanité n'a pas encore atteint les pics de découvertes des ressources, l'émergence de la conscience écologique percole lentement, les technologies renouvelables immatures technologiquement sont encore chères, hormis l'hydraulique (chapitre #8) et le solaire thermique (chapitre #11). Dans sa thèse, Paul Bouet [20] souligne les exemples du four solaire d'Odeillo et du mur Trombe et cite Jacques Michel :

« Je crains que les jurys ou les charnières de décision ne puissent intellectuellement saisir l'intérêt d'une architecture qui remplace l'homme dans les conditions de nature. La vue des options actuelles d'urbanisation ou de constructions d'un modernisme dépassé ou d'un passéisme de refuge confirme cette impression. Le sous-développement de l'architecture et de l'urbanisme pourrait se régénérer avec l'application d'une conception climatique tenant compte des orientations, de l'apport solaire, de sa protection et utilisant le formidable potentiel industriel cette fois

Fig. 264. Extrait de résultat de *World3*

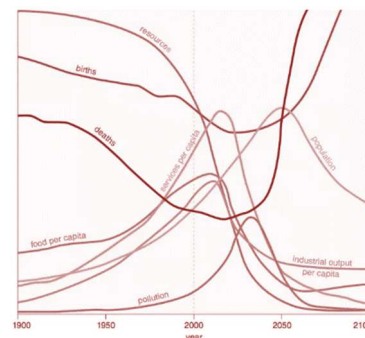
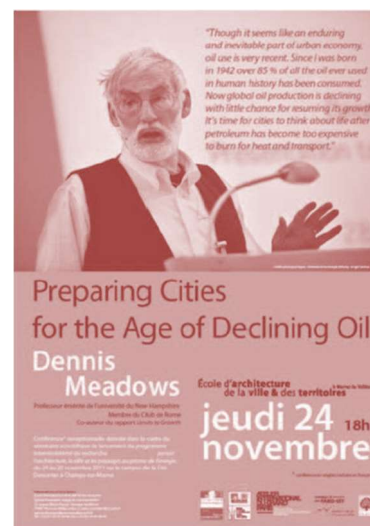


Fig. 265. Denis Meadows en 2011, à l'école d'architecture de la ville et des territoires à Marne-La Vallée pour le lancement du programmes *Ignis Mutat Res*.



au service de l'humain et non pour le placer dans un aquarium climatisé. En somme, le programme « Corbuséen ». »¹

À ce stade, l'absence d'une « masse critique », d'une proportion suffisante de prise de conscience empêche cette *transition de phase* des modes de vie, d'une bifurcation culturelle et technologique généralisée.

La démesure qui dure (temps IV.4)

Étendue temporelle :

- 1984 *Mise en service de Superphénix*
- 1986 *Point bas du contre-choc pétrolier, baril à \$10*
- 2009 *Point bas du pétrole à 40 dollars*

Énergies nouvelles :

- Essais de fusion contrôlée*
- Réactions à fission nucléaire de nouvelles générations*

Matières nouvelles :

- Corian*
- Matériaux composites*
- Alliages métalliques*
- Nanoparticules*

Architectures et urbanismes

- 1995 *Bibliothèque Nationale de France, D. Perrault architecte*
- 2002 *Début des travaux de Palm Islands*
- 2010 *Ouverture tour Burj Khalifa, aux Émirats arabes unis, 828m*
- 2014 *Inauguration de la Fondation Louis Vuitton, 10t/m²*

Le hors d'échelle contemporain

Gourmandise énergétique

L'essor rapide de la culture de la consommation, la mondialisation de l'automobile, l'accroissement du trafic aérien conduisent à une augmentation très rapide de la consommation énergétique annuelle par habitant des pays développés. L'amélioration du niveau de vie, couplée à l'évolution de la population terrestre, affole la ponction sur les ressources fossiles (Fig. 266). Pour nourrir une population grandissante, désireuse de diversité et de profusion alimentaire, l'agriculture entame une mue profonde afin d'augmenter artificiellement ses rendements et donner une place prépondérante à la production carnée d'origine animale.

¹ *L'Architecture d'aujourd'hui*, 1974

« Cette période voit la diversification massive des mix primaires avec les apparitions successives du pétrole, du gaz et des mix primaires en amont de la naissance du vecteur électrique : hydroélectricité, matières fissiles pour les centrales thermonucléaires. La ponction sur les stocks se déploie à large échelle. Durant cette période, la diversité des mix ainsi que l'épuisement des stocks proches (notamment le charbon) concourent à accroître de façon drastique la distance moyenne d'approvisionnement. Selon Kim et Barles, en 2000, elle était de 3850 kilomètres pour Paris. La distance maximale était de plus de 15000 kilomètres, soit presque l'antipode de l'Île-de-France. »¹ [15]

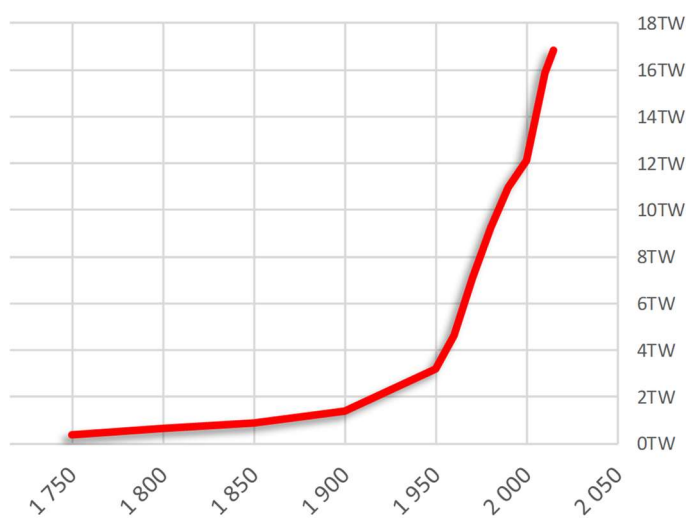


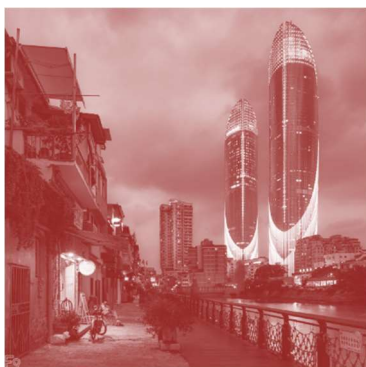
Fig. 266. Évolution du flux mondial d'énergie primaire depuis 1750 et le début de l'exploitation des énergies fossiles et fissiles. Une amplification d'un facteur 70 des besoins énergétiques humains tandis que la population a décuplé en trois siècles.

En état de superposition

Comment annoncé en introduction (chapitre #2), les derniers épisodes de notre épopée en sept temps n'avancent plus de façon séquentielle. Nous vivons simultanément plusieurs « modernités ». Nous sommes en *état de superposition*, en situation de chevauchement des paradigmes (ce temps-ci, ainsi que ceux décrits dans les chapitres #16, #17 et #18). Notre période contemporaine est à la fois celle de l'exploration de trajectoires compatibles avec une limitation du réchauffement climatique à +2°C (le temps VII, #18) ; celle de l'investigation de scénarios 100% renouvelables (le temps V, #16) ; la recherche d'une bienveillance, d'une courtoisie et d'un respect de la manne limitée des matériaux (le temps VI, #17). Nous profitons encore de la démesure des fossiles [8], et nous poussons cette aliénation, cette addiction à son paroxysme : nous abordons cet état-là dans ce qui suit.

Power of ten

¹ *Reforme*, p37

Fig. 267. *Tours en Chine*

De fait, l'architecture des fossiles règne encore. Le temps IV court toujours. Au cours du temps IV.2 (#13), nous avons entraperçu l'émergence d'un nouvel archétype, la tour, l'architecture de grande hauteur, des constructions réclamant plus de matières par unité de surface qu'un ouvrage classique¹. Dans la troisième partie, en digression de l'analyse d'un projet sur lequel je suis intervenu, la passerelle Simone de Beauvoir à Paris et la tour Wind-it, nous verrons comment la taille influe de façon non linéaire sur la quantité de matière nécessaire à une construction (#24) et donc sur les externalités environnementales induites lors de leur édification : énergies fossiles consommées lors du processus de fabrication, matières non renouvelables utilisées, émissions de gaz à effet de serre induites, pollutions diverses engendrées... En se rendant annuellement à la foire internationale de l'immobilier à Cannes, le *Mipim*, on peut constater le succès de cet archétype [11] et de sa large prévalence dans les pays du Golfe et en Asie. Après les Trente Glorieuse occidentales, les pays appelés pendant un temps les « pays émergents », dont les BRICS, ont emboîté le pas : Sao Paulo, Moscou, Mumbai, Shanghai (Fig. 267), Riyad et Cape Town possèdent leurs imposants quartiers de tours.

La compétition planétaire

Fig. 268. *Fondation LVMH par Frank Gehry, près de 15 tonnes par m² utile.*

Le paradigme d'une compétitivité économique devenue planétaire, la mondialisation et sa circulation fiévreuse des flux de matières et d'information, catalyse les développements les plus fous, en franchissant de nouvelles mantisses dans les dimensions spatiales : la tour du Burj Khalifa et ses 828 mètres à Dubaï dessinée par l'agence SOM, la Fondation LVMH dans le bois de Boulogne à Paris par Frank Gehry (Fig. 268), bâtiment à deux niveaux ayant sans doute réclamé la plus grande quantité de matière et d'énergie pour un ouvrage de cette dimension² : ce sont deux exemples iconiques ayant suscités beaucoup de concentration et de moyens pour toutes les parties prenantes de leur concrétisation. De façon générique et dans certaines régions, la rareté et la pression foncière encouragent les poldérisations les plus démentes comme à Singapour (et ses conséquences sur le trafic du sable [21]), les développements immobiliers les plus aberrants comme les îles Palm ou encore *The World*. Dans le récit prospectif *La Renaissance des Fabriques* [22], je rêvais d'un terme à cette course effrénée à la densité et à la taille :

¹ Notamment pour résister à des efforts horizontaux plus importants liés à la fois à la prise au vent accru et à un bras de levier plus important. À noter aussi, les contraintes et les conséquences de résistance aux séismes sur le dimensionnement des structures des tours.

² Sous le manteau, on m'a transmis le chiffre d'une masse totale de 100 000 tonnes pour édifice de 7 000m² de surface utile soit une densité surfacique record de plus de 14 tonnes par m², valeur au moins dix fois supérieure à un bâtiment usuel. Vu la sophistication des matériaux mis en œuvre, il est probable qu'énergie grise et carbone gris soient au moins supérieurs à ce facteur.

« 2033 marque le début de la décroissance urbaine et le début d'une planification réfléchie de la mappemonde des densités, orchestrée sous l'égide de l'UN-Density. Le rural revenait en force, y compris pour les métropoles de moyenne importance comme Paris : il n'y avait plus que trois millions d'habitants dans la boucle non achevée du Grand Paris Express. Il faut dire que les violentes émeutes urbaines générées par le choc économique du brutal ralentissement chinois de 2022 avaient porté un coup sévère au « désir métropolitain ». À commencer par les villes du Golfe Persique qui étaient le théâtre d'affrontements très violents. Dubaï, Abu Dhabi et Doha étaient redevenues vides de vie. »

L'hypertrophie contemporaine

« Le sens de l'histoire n'est pas l'essor, ou la maturation, mais l'enflure. Si l'on pouvait demander à une intelligence extraterrestre d'observer notre monde et d'énoncer sa principale caractéristique, elle répondrait sans doute : il est boursouflé. »¹

De façon bien moins subtile qu'Olivier Rey [16], je commençais mes premières interventions en école d'architecture en dénonçant cet état de fait. J'ai souvenir d'une conférence donnée² en 2006 que j'avais intitulée « Les Trente Pétroleuses ». Je mettais le doigt sur le *bors d'échelle* de l'automobile contemporaine (Fig. 269), rappelé plus tard dans un article rédigé pour *l'Architecture d'aujourd'hui* en 2011 [23] :

« La fin des dinosaures – les SUV et autres CrossOver, les monospaces et les 4x4 ? L'impasse de l'hyperconfort et finalement de l'hypermoi (la mode du premium et toutes ces bêtises). A-t-on réellement besoin de vitres et de sièges électriques par exemple ? La fin de la militarisation de l'espace public : des objets qui en reprennent sinon la morphologie voire l'aspect (exemple la couleur mate disponible de la dernière création de Zuffenhausen, par exemple) : le citoyen automobile se blinde dans son énorme bouclier de métal prenant la forme agressive du Sport Utility Vehicle. Ou comment, en 50 ans, l'automobile a au moins doublé son poids moyen et son emprise spatiale sur l'espace public : la sécurité a définitivement trop bon dos (et l'aphorisme de Souchon n'est pas loin (2)) Rappel des faits : - 1950, 2CV Citroën, 600kg, 5m² au sol et 25 chevaux. - 2010, Audi Q7, 2.500kg, 10m² au sol et 300 chevaux. La puissance de feu de nos projectiles automobiles n'en finit pas de croître. À quoi donc ont pensé les constructeurs hormis à rendre nos désirs obèses ? »³

La dénonciation la plus efficace et la plus poétique de cette hypertrophie, de cette paresse est sans doute le merveilleux film d'animation *Wall-e* [24] (Fig. 270) mais on se souvient aussi des premières scènes de *Les dieux sont tombés sur la tête* (1980) avec cet habitant typique de la *suburbia* sud-africaine qui effectue une centaine de mètres depuis sa maison type Levitt avec sa voiture pour aller poster une lettre.

Fig. 269. Dessin pour AA 2011

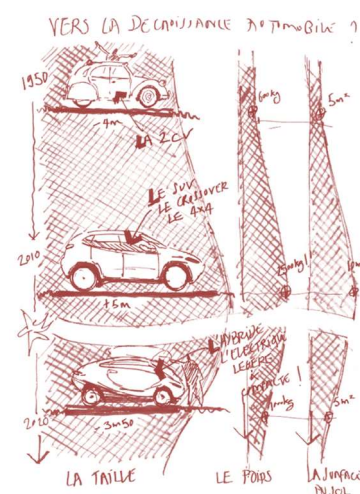


Fig. 270. Extrait de *Wall-e*



¹ Une question de taille, p205

² à l'École d'Architecture de Paris-Belleville à l'invitation d'Alain Dervieux

³ AA, 2011

Fig. 271. *Bo Bardi. Bo Bardi à Sao Paulo. Le MASP, inauguré en 1968, est suspendu à deux énormes portiques qui supportent une charge de 9 200 tonnes, il en résulte un espace libre de 74 mètres.*



Fig. 272. *CCTV à Pékin par OMA*



Fig. 273. *La Bibliothèque François Mitterrand par Dominique Perrault.*



L'iconisme aveugle et les défis à la gravité

La modernité appelle volontiers à une libération de l'architecture, à un design décomplexé poussant l'iconisme à son paroxysme. L'architecte devient un demiurge total, planétaire. Puisque l'énergie n'est pas une contrainte, puisque la matière se prête à toutes les contorsions, à toutes les singularités, l'architecture devient de l'information à l'état pur, la promesse construite de complexités digitales jamais vues, l'exploration de géométries et de formes se prévalant de leur singularité, renforçant l'individualité de son commanditaire, des *selfies* de béton, de verre et d'acier. Les figures topologiques et typologiques explorent les porte-à-faux les plus incroyables, les portées les plus folles : bâtiment emblématique et prêtant peu à la polémique, Lina Bo Bardi explore un premier surcoût de matière singulier avec son musée, le MASP à Sao Paulo (1968), et porte le *plan libre* à son apothéose (Fig. 271).

Quarante ans plus tard, pour un programme et une géographie tout autre, Koolhaas n'a crainte lui aussi de prescrire beaucoup de matière, beaucoup d'énergie grise¹ pour l'immeuble de la CCTV à Pékin (2012) avec un imposant porte-à-faux (Fig. 272) : pense-t-il comme Jacques Herzog tachant de justifier les vertus écologiques de la future tour Triangle à Paris que cet immeuble vivra mille ans ? L'auteur vente l'aboutissement de la *venustas*, prétexte à l'amortissement asymptotique de son œuvre éternelle.

Aberrations énergétiques, quelques projets de Dominique Perrault

Au-delà de la matière, du point de vue l'énergie, les contre-sens les plus absolues sont légions. Dominique Perrault et le projet de Très Grande Bibliothèque, la future bibliothèque François Mitterrand (Fig. 273), en faisait sans doute malgré lui la preuve en 1986. Avec ce projet, Perrault opère un retournement climatique total. Alors que les livres doivent être conservés à 18°C, dans des conditions hygrométriques extrêmement sévères, ces derniers sont rangés dans des tours-étagères, avec un plan d'étage peu compact (en L) et dont les façades fonctionnent comme de gigantesques murs-trombe (#16). Au début des années 2010, lors d'une visite avec la direction de la bibliothèque, j'apprenais que la température qui régnait dans la lame d'air avait parfois dépassé les soixante degrés. Il est incroyable d'avoir entériné la conception d'une telle ineptie, sans contrôle tant du point de vue des concepteurs² que de la maîtrise d'ouvrage.

« De plus en plus d'ingénieurs participent à des processus techniques dont ils ignorent le fonctionnement, mais qui ruinent le monde. » écrivait le philosophe Bernard Stiegler. De fait, à la fin des années 1980, peu de temps avant la fermeture centrale solaire de Thémis, la France proposait sans le savoir, de conserver les ouvrages les plus précieux derrière des fours solaires (#16). Par-dessus le marché, poussant la figure de l'aberration à son paroxysme, Perrault plaçaient les futurs lecteurs dans le soubassement de l'édifice, dans ce socle faiblement éclairé par de ténébreuses cours anglaises³. Quelle tristesse. J'ai fait l'expérience à plusieurs reprises des salles de lecture de ce bâtiment

¹ Et de carbone gris.

² Les ingénieurs qui devaient accompagner à l'époque l'équipe de Perrault.

³ Je serai curieux de cartographier la lumière naturelle pénétrant dans ces espaces.

dans le cadre de mes recherches pour mon mémoire *Le classement mode d'emploi* [25] et j'en retiens une sensation intensément mélancolique et d'une architecture sans humanité.

L'immeuble Berlier

Peu de temps après, Perrault récidivait comme maître des contre-exemples énergétiques avec l'immeuble industriel Berlier (1990) en bordure du périphérique parisien, avec ses brise-soleils intérieurs placés derrière les façades entièrement vitrées (Fig. 274). L'architecture perdait tout, la lumière, les vues et gagnait les charges énergétiques de la climatisation d'une protection solaire totalement inefficace. Malheureusement des références comme l'immeuble Berlier créent des émules, des *patterns* reproduites par les étudiants en école d'architecture, des erreurs que l'on répète en se propageant tels des *virus de mauvais design*, des persistance rétinienne trompeuses.

Une centrale nucléaire, autre architecture hors de proportion

Dans les années 1980 triomphantes, la France du TGV, du Minitel, d'*Ambitions*, le show télévisuel de Bernard Tapie, on continue d'aspirer à l'indépendance énergétique. Nous n'avons pas de pétrole mais pleins d'idées... pour les centrales nucléaires. Aussi, au-delà des contresens architecturaux, la France poursuivait ses expériences à l'échelle infrastructurale. La deuxième phase du programme électronucléaire était déclenchée. Avec à la clé, quelques chiffres *hors d'échelle* vis-à-vis des investissements en matière : il faut en effet douze millions de tonne de sable pour construire une centrale nucléaire. Amorti sur la durée de vie, la production d'un kWh électrique par une centrale nucléaire réclame la consommation d'une trentaine de grammes de matière. À l'échelle de la consommation courante d'électricité d'un logement en France¹, cela représenterait donc l'équivalent² de 150 kilos de matière sableuse. Clap de fin de la corvée de bois, nous sommes devenus aveugles à notre empreinte sur le réel.

*

Fig. 274. *Immeuble Berlier, autre aberration solaire.*



¹ Hors chauffage.

² 5000kWh annuels d'électricité multipliés par 30 grammes.

Références citées

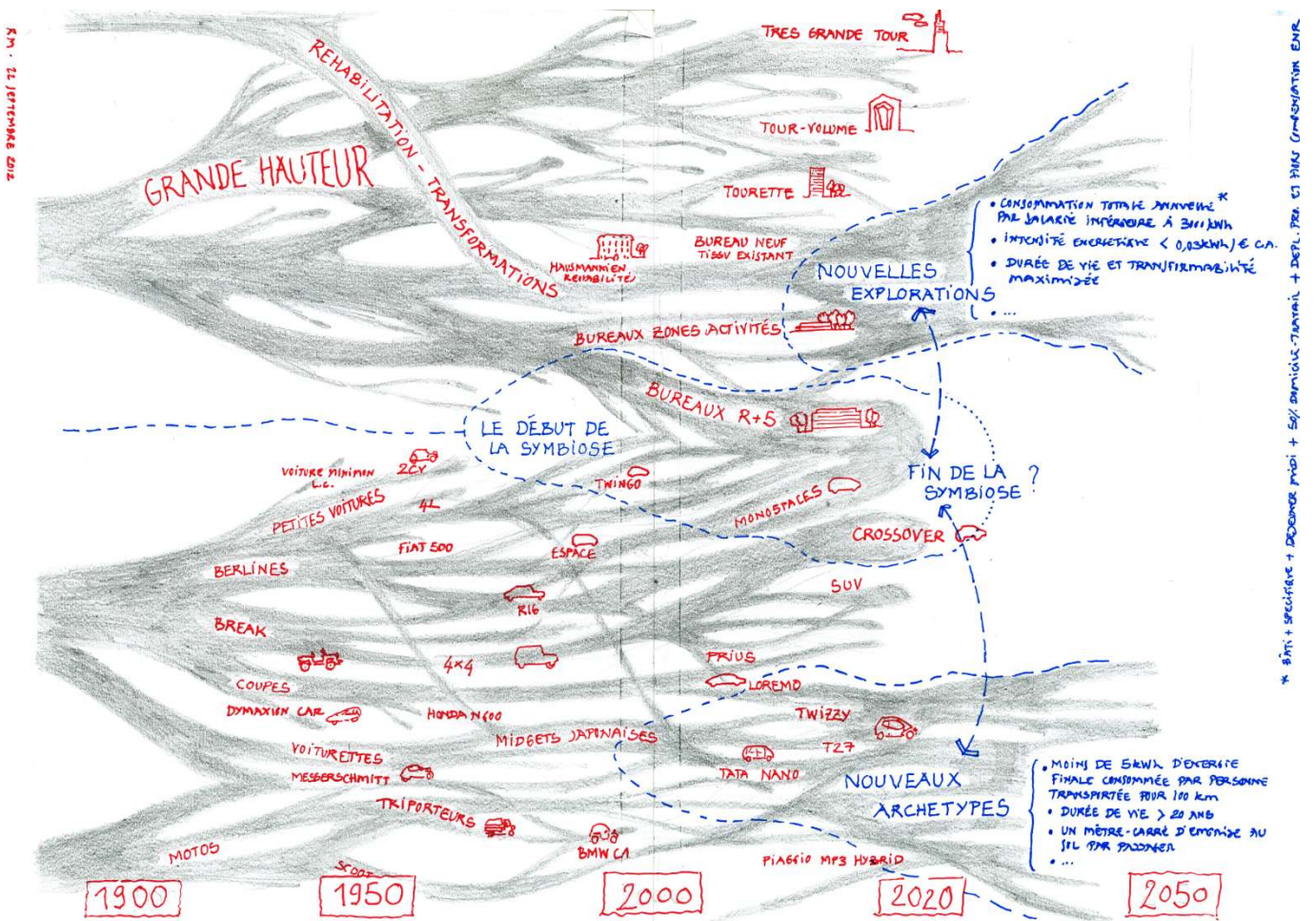
1. AUZANNEAU Mathieu, *L'or noir, la grande histoire du pétrole*, La Découverte, 2015
2. SMIL Vaclav, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015
3. MALM Andreas, *L'anthropocène contre l'histoire. Le réchauffement climatique à l'ère du capital*, La Fabriques éditions, 2017
4. ANDERSON Paul Thomas, *There Will Be Blood*, film d'après le roman *Pétrole! (Oil!)* écrit par Upton Sinclair en 1927, 2007
5. BONNEUIL Christophe, FRESSOZ Jean-Baptiste, *L'Événement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Seuil, 2013
6. SINGH Madanjeet, *L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature*, Unesco France Loisirs, 1998
7. MENARD Raphaël, interview par Tony Côme pp128-131, relecture de l'Architecture d'Aujourd'hui de juillet 1936 consacré à l'électricité dans le bâtiment, *L'Architecture d'Aujourd'hui*, numéro 400, mai 2014
8. COCHET Yves, *Pétrole Apocalypse*, Fayard, 2005
9. MAC NEILL, John R., *Du nouveau sous le soleil. Une histoire de l'environnement mondial au 20^{ème} siècle*, Seyssel, Éditions Champ Vallon, 2010. Titre original *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*, 2000
10. ROTOR, *Déconstruction et réemploi. Comment faire circuler les éléments de construction*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2018
11. KOOLHAAS Rem, *Delirious New York*, 1978
12. COSSE Laurence, *La Grande Arche*, Gallimard, 2016
13. WINGERT Jean-Luc. *La vie après le pétrole, de la pénurie aux énergies nouvelles*. Paris, Éditions Autrement, Frontières, 2005
14. GRANDJEAN Alain, JANCOVICI, Jean-Marc, *Le plein s'il vous plaît*, Seuil, 2006
15. MENARD Raphaël et al., *Reforme, rapport final de recherche*, programme Ignis Mutat Res, 2014
16. REY Olivier, *Une question de taille*, Stock, 2014
17. MEADOWS Donella H., RANDERS Jorgen, MEADOWS, Dennis. *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*, Rue de l'échiquier, 2012
18. CERASUOLO Enrico, *Last Call*, documentaire, 2013
19. PERLIN John. *Let it Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy*, New World Library, 2013
20. BOUET Paul, xxx
21. DELESTRAC Denis, *Le sable, enquête sur une disparition*, documentaire, 2013
22. MENARD Raphaël, *La Renaissance des Fabriques. Un monde possible en 2050*, 2015
23. MENARD Raphaël, « Un Petit Dessin vaut mieux qu'un long discours » (p64 à 71), Perspectives Durables, *L'Architecture d'Aujourd'hui*, 2011
24. STANTON Andrew, *Wall-e*, film d'animation, 2008

25. MENARD Raphaël, *Le Classement, Mode d'Emploi*, Mémoire sur les organisations du savoir et les classifications bibliographiques, 67 pages, 2002
26. MENARD Raphaël, *Work in Process, nouveaux bureaux, nouveaux usages*. Exposition au Pavillon de l'Arsenal. Article « Don Drapper, la voiture et le climat », p237 à p265, 2012

Fig. 275. *Wasson Oil and Gas Field, Yoakum-County, Texas, photographie Mishka Henner, 2013*



Fig. 276. Arbres phylogénétiques des architectures dédiées au tertiaire comparées à celle des automobiles [26]



#15 Le solaire passif et l'urbanisme solaire (3/3)

L'architecture, une énergie renouvelable en puissance. Le trou, l'ouverture, la fenêtre : des capteurs solaires. Une section complète l'arborescence des énergies solaires avec le solaire passif. Une production qui entretient un lien étroit avec les questions urbaines. La seconde partie, prospective, fait état des capacités d'intégration solaire dans les tissus urbains denses.

La fenêtre, un capteur solaire

Le solaire passif et l'architecture solaire

Le percement et la fenêtre

En s'opposant au mur, à l'opacité de l'enveloppe, en laissant pénétrer l'énergie thermique et lumineuse à l'intérieur de la construction, la fenêtre est un capteur solaire essentiel. Le percement transforme toute construction en un dispositif capteur d'énergie. Sa position, son orientation, sa dimension, sa constitution conditionne son efficacité et ses vertus. Ontologiquement, l'architecture est une énergie renouvelable. Il y a deux mille ans, au 1^{er} et 2^{ème} siècle, près d'Islamabad au Pakistan, les ruines de Sirkap démontrent le souci de la parfaite orientation des rues, permettant à chaque maison de bénéficier d'un ensoleillement optimal [1]. Avant cette époque lointaine, entre 2100 et 2700 avant J.-C., les constructions de l'Égypte du Moyen Empire utilisaient le flux solaire pour le chauffage de l'eau des sanitaires. Singh précise que la ville égyptienne d'Oùnou, baptisée plus tard Héliopolis par les Grecs, était un centre important d'enseignement de l'architecture solaire : l'information et les savoirs des bonnes pratiques se capitalisaient et se diffusaient déjà [1].

La fenêtre au secours du bois ?

Au 5^{ème} siècle avant J.-C., prémices de tensions à venir, l'abattage sauvage du bois créa une pénurie qui engendra un attrait pour l'architecture à faible consommation d'énergie. Un mouvement analogue à l'épisode du temps V, l'*architecture-énergie* qui naît au 20^{ème} siècle (#16). Vers le 1^{er} siècle, l'apparition du verre¹ dans la construction changera le destin du percement ; Singh rappelle que les fouilles d'Herculanum à Pompéi exhibèrent des fenêtres dotées de vitres [1]. Quoi que l'isolation d'un vitrage simple soit extrêmement faible² et comparable à celle d'une feuille de papier, la

¹ Le verre était employé en Mésopotamie pour faire des perles vers 2500 av. J.-C.

² La conductivité d'un vitrage simple est comprise entre 5 et 6 watts par m² et par degré.

feuille de verre, bien calfeutrée, limite les pertes convectives tout en continuant de bénéficier des apports solaires et lumineux sans courant d'air.

Une définition énergétique de la baie

La fenêtre : une centrale énergétique en puissance

Toute architecture est un dispositif solaire, un système efficace, ou au contraire, une forme qui tourne le dos au gisement disponible. Le solaire, dit passif, est très étroitement associé au bioclimatisme. Il en constitue l'un des piliers : l'art de positionner judicieusement les fenêtres afin de bénéficier des apports solaires hivernaux (Fig. 277). Une architecture avec ses baies judicieusement disposées est une géométrie à albédo variable : les percements font entrer l'énergie lorsque celle-ci est nécessaire et utile ; réciproquement, les baies bloquent le rayonnement solaire en cas de trop-plein d'énergie.

Capter l'énergie via un solide transparent.

Le solaire passif peut être associé à une stratégie de réduction de la demande, plutôt qu'à un productible particulier de l'offre. Les bâtiments passifs exploitent la ressource solaire pour afficher des besoins de chauffage très réduits. Dans une autre veine, de façon contemporaine, Anne Lacaton et Jean-Philippe Vassal explorent le vocabulaire typologique du « bioclimatisme *low-cost* » en détournant les systèmes constructifs des serres horticoles (Fig. 278). De façon historique, Perlin [2] explore les vertus énergétiques de la transparence et cite notamment les recherches effectuées entre le 16^{ème} et le 19^{ème} siècle autour des enjeux thermiques et du contrôle de la chaleur en horticulture.

La fenêtre : outil de production ou de réduction de la demande ?

Nous considérerons que cette production d'énergie correspond à une forme dérivée du *solaire thermique* (chapitre #11), en disposant d'un plan de captage vertical essentiellement orienté au sud dans l'hémisphère nord (et au nord dans l'hémisphère sud). Il suppose par ailleurs une bonne irradiation solaire directe, sans quoi la baie vitrée, analysée comme un capteur solaire, ne sera pas compétitive par rapport à une paroi opaque (cette dernière étant en général bien plus isolante¹). Enfin, des études doivent être conduites pour éviter tout risque d'inconfort thermique en situation estivale voire de mi-saison : il ne s'agirait pas d'engendrer une demande énergétique supplémentaire nécessaire au rafraîchissement pour assurer le confort des espaces. Du point de vue de notre taxinomie énergétique, nous pouvons aussi nous interroger sur la position dans cette arborescence des murs-Trombe et des capteurs pour lesquels le fluide calorporteur est de

Fig. 277. *La leçon de musique par Vermeer, 1662-1665*



Fig. 278. *Maison Latapie par Lacaton & Vassal.*



¹ Pour un bâtiment contemporain, les parois opaques disposent en général de valeur de conductivité surfacique inférieure à $0,3\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ tandis que pour une fenêtre, en considérant l'ensemble du châssis menuisé, il faut retenir des valeurs comprises entre 1 et $1,5\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

l'air¹ : nous les rangerons du côté du *solaire passif* en considérant qu'ils appartiennent davantage à la baie, à la façade et donc à la verticalité de l'architecture (#16).

Combien de fenêtres ?

Le solaire passif est une récolte spécifique, un peu comme le sont le solaire à concentration (chapitre #13), l'éolien et l'hydraulique (#8) : elle ne concerne finalement qu'une partie réduite des surfaces continentales et ne fait évidemment sens qu'à proximité des populations humaines. Au même titre que les autres énergies renouvelables, que représente le gisement mondial du solaire passif ? Il serait intéressant d'investiguer l'ordre de grandeur de ce potentiel. Une manière décalée d'évaluer cette ressource pourrait consister à estimer le nombre moyen de fenêtre par humain. En ce qui me concerne, voici mon bilan : environ 8 m² de transparence², dont le rendement bioclimatique est sans doute déplorable, hormis pour deux fenêtres exposées sud et sans masque dans mon logis.

5% des besoins d'une société à 2000 watts ?

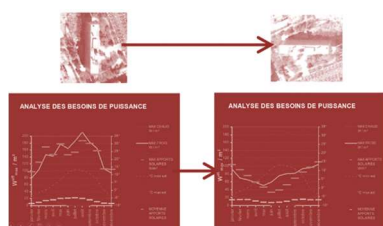
Une manière différente d'approcher cette estimation consiste à considérer qu'en France, la surface d'emprise cumulée est d'environ 60 m² par individu, que le ratio de façade est d'environ de moitié³ avec 30% de fraction vitrée : nous disposons alors d'environ 10m² de baies par personne et en moyenne, sous nos latitudes, le quart de cette surface propose un gisement digne d'être exploité, soit 2 à 3 m² par personne⁴. Autrement dit, dans nos géographies, si nous retenons un flux moyen disponible d'une trentaine de watts en période de chauffe sur les façades exposées, le gisement maximal serait d'une centaine de watts thermiques par individu. Ainsi, même pour des sociétés redevenues à 2000 watts, ce potentiel semble donc limité.

Du bon filtre

Avant d'évaluer avec davantage de précision les rendements du solaire passif, il est utile de rappeler que la bonne gestion des apports solaires estivaux est un enjeu capital. La baie doit être un *filtre géométrique*, refusant les apports solaires lorsque ces derniers surviennent en période climatique clémente ou chaude. Dans cette situation, l'architecture devrait préférentiellement réfléchir l'énergie solaire, opposer cette charge énergétique supplémentaire, la retourner vers l'atmosphère (#27).

De façon un peu provocante, lors d'une conférence à Belleville en 2006, je tentais de mettre en évidence l'absence de bioclimatisme de la Cité Radieuse de Marseille. L'orientation est-ouest fait certes pénétrer le soleil en

Fig. 279. *Rotation de la Cité Radieuse de Marseille et impact sur la demande en chauffage*



¹ Une cheminée solaire par exemple.

² Onze fenêtres dans mon domicile familial (9 fenêtres et 3 velux) soit environ 3 baies par personne et donc 3m² de capteurs par résident. À mon bureau, environ deux trames, soit environ 5m² qui me seraient associés.

³ Soit 30m² de façade par personne.

⁴ Ordre de grandeur du flux hivernal en façade sud ~10W/m² donc gisement potentiel d'environ 30W_{th} par personne ce qui demeure faible.

profondeur le matin et le soir mais l'exposition ouest est absolument défavorable en situation estivale. Cette orientation contredit aussi l'optimisation des apports solaires gratuits hivernaux. Je m'étais alors amusé à tester sous les premières versions du *ClimElioth* une rotation à 90° de l'orientation de la Cité Radieuse pour constater une belle diminution de la demande de chaleur (Fig. 279).

L'invention des brise-soleil furtifs

Dans le registre des inventions, l'idée du *brise-soleil furtif* est née en 2010 autour d'un projet de bureau à Paris, alors qu'Elioth intervenait en tant que consultant façade. La stratégie consistait à déterminer une géométrie de brise-soleils permettant le blocage des rayons solaires sous incidence haute¹ mais à permettre une totale transparence depuis l'intérieur, d'un *certain point de vue* (Fig. 280). Cette proposition n'a finalement pas été intégrée dans le projet². Dans d'autres circonstances, je trouverai à réutiliser le concept du brise-soleil furtif, sorte d'anamorphose (#29) solaire d'une grande richesse potentielle.

L'émergence du vitrage isolant. Conditions de sa pertinence

Un peu plus de matière pour moins d'énergie : l'invention du double vitrage

Dans *Delirious New York* [3], Koolhaas rappelle l'impact déterminant de l'invention par Otis des taquets anti-recul, viabilisant le transport vertical par les ascenseurs, eux-mêmes *éléments* essentiels à l'émergence du gratte-ciel. De façon analogue, à l'orée des années 1930, le solaire passif doit sans doute sa pertinence climatique (et donc les conditions de son expansion) à l'invention du vitrage isolant avec la naissance du *Thermopane* [2] (Fig. 281). Avec son volume d'air intérieur encapsulé, par la limitation de la convection de sa couche d'air intérieur grâce à une épaisseur optimisée, le vitrage isolant permet la division d'au moins par deux des déperditions conductives par rapport à un simple vitrage³. Les doubles fenêtres étaient une pratique courante en Europe Centrale, en Europe du Nord et en Scandinavie. Cependant, le courant convectif du matelas d'air emprisonné génèrait une performance isolante médiane, à mi-chemin entre celle du simple vitrage et celle du double vitrage [5]. Elle réclamait aussi un dédoublement des huisseries.

Fig. 280. *Principe du brise-soleil furtif.*

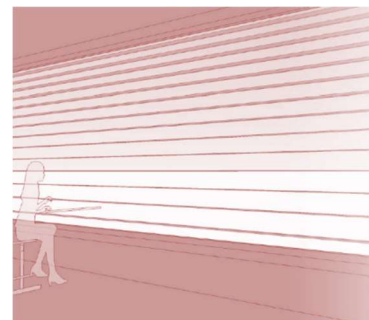


Fig. 281. *Publicité pour le Thermopane.*



¹ Par exemple à 50° au-dessus de l'horizontal.

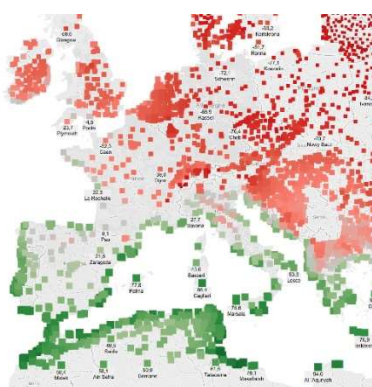
² C'est parfois le risque de l'ingénieur trop ingérant dans le processus de design, l'architecte tient à rappeler qu'il détient d'abord la paternité du projet et le *final cut* sur tout choix de design.

³ Soit le passage d'un coefficient U d'environ 5W/m².°C à environ 2-3 W/m².°C pour les premières générations de vitrage isolant. Des valeurs de 1W/m².°C deviennent courantes de nos jours grâce aux couches à basse émissivité, au remplissage par des gaz rares et la limitation du pont thermique du joint de scellement.

Fig. 282. Keck, *House of Tomorrow*, 1932



Fig. 283. Carte du rendement moyen annuel (en watt par m² de vitrage exposé) d'un simple vitrage positionné en façade sud et sans masque. Bilan énergétique basé sur la différence entre le flux solaire moyen en façade sud et hypothèse d'un facteur solaire de 85% et les échanges conductifs basés sur les valeurs de degré-jours en base 21 et l'hypothèse d'un conductivité moyenne (U_w) de 5 watts par m² et par degré-Celsius.



Le bénéfice de l'irradiation solaire couplé à une bonne isolation devient possible en 1934 avec le *Thermopane* [5]. Les frères Keck exploitent cette potentialité avec leurs maisons solaires (Fig. 281), prototypes d'utopie, celle de l'autonomie énergétique dans le contexte de l'étalement urbain américain, rebond de la révolution soutenable de la basse densité promise par Wright et sa *Broadacre City*. Dans *The Solar House*, Denzer¹ narre l'épopée solaire américaine qui débute avec Fred Keck et sa *Crystal House* de 1934 [4] et l'horizon d'une *suburbia* renouvelable. Dès 1938, la MIT Solar House dispose même d'un stockage solaire intersaisonnier. En 1943, Frank Lloyd Wright dessine le Solar Hemicycle. En 1945, le livre *Solar Orientation in Home Design* énonce les principes et les vertus des casquettes solaires. En 1948, Maria Telkes, une physicienne du MIT, met au point une maison solaire, autosuffisante aux trois quarts de ses besoins globaux [6].

Les enjeux énergie-matière-climat

Quelle efficacité ?

Les conditions nécessaires à l'émergence de la fenêtre comme capteur solaire sont donc réunies. Cette baie de la modernité ferait pénétrer plus d'énergie qu'elle n'en perdrait (Fig. 283). Dans la suite, nous allons préciser cette assertion en tachant de déminer les raccourcis de pensée d'une pensée parfois unique de la durabilité, ou de réflexes de solutions dite durables. Nous nous poserons les questions suivantes : en décidant d'observer l'architecture et ses baies comme un capteur solaire en puissance, quels sont les rendements solaires typiques du solaire passif ? En anticipant les conséquences du changement climatique, quelles sont les géographies pertinentes pour cette forme particulière de production d'énergie thermique et lumineuse ? Quelles sont les formes urbaines adaptées et celles optimisant la récolte du solaire passif ? Enfin, les contraintes géométriques liées au prospect solaire ne sont-elles pas génératrices d'ennui formel et d'une pauvreté des formes urbaines ? (#16)

Matière du verre

Quelle quantité de verre réclame en général une fenêtre ? Un vitrage isolant courant est composé de deux feuilles de verre de 6mm, soit environ 30 kilos de verre par mètre-carré de fenêtre. En supposant que la somme des transparences rapportée à la surface de plancher est d'environ 15%, le verre pèse pour environ 5 kilos par mètre-carré de plancher (chapitre #29). Aujourd'hui, la fabrication d'un kilo de verre réclame environ 0,65kg de silice. À la différence du sable du béton [11], le verre peut employer le sable des continents et des ergs. Lors du processus industriel, ce même kilo réclamera la consommation d'environ 537 litres d'eau [12].

Energie grise et carbone gris de la fenêtre

D'après les données récupérées par Souviron [12], la fabrication d'un kilo de verre génère l'émission d'un peu plus d'un kilo de CO₂ : 1,22kg

¹ Voir <http://solarhousehistory.com/resources/>

CO₂eq. Selon l'estimation précédente, le verre d'une fenêtre d'un mètre-carré serait à l'origine de l'émission d'environ 35 kilos de CO₂. De façon plus élargie, il y aurait lieu d'estimer les impacts environnementaux liés à l'émergence du vitrage *low-e* (ou basse émissivité) en 1983 et le dépôt de couches d'oxyde au service de la baisse de la demande énergétique. Récemment, depuis la base de données INIES, les valeurs pour un vitrage s'étendent d'un peu plus de 10kg CO₂ jusqu'à plus de 50kg CO₂ pour un vitrage sophistiqué de chez Saint-Gobain (et sans doute des valeurs équivalentes chez les grands industriels du verre) (Fig. 284). La transparence a un prix en architecture, faire entre la lumière et la chaleur coûte environnementalement. La position des percements et l'intégration du verre suppose des stratégies réfléchies, des réflexions contextualisées comme nous allons le découvrir.

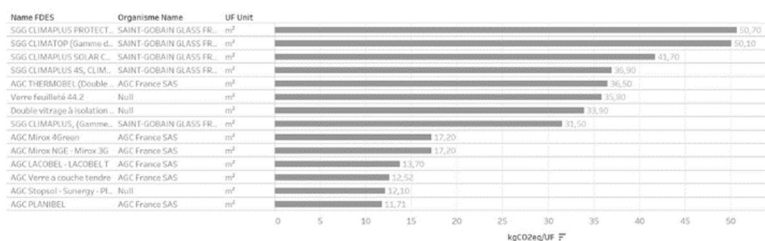


Fig. 284. Extrait de la base de données INIES sur les vitrages, mars 2018 (Elioth)

Le rendement en question

Comparaison entre double et triple vitrage

Une étude de cas selon l'intensité climatique et le système de chauffage

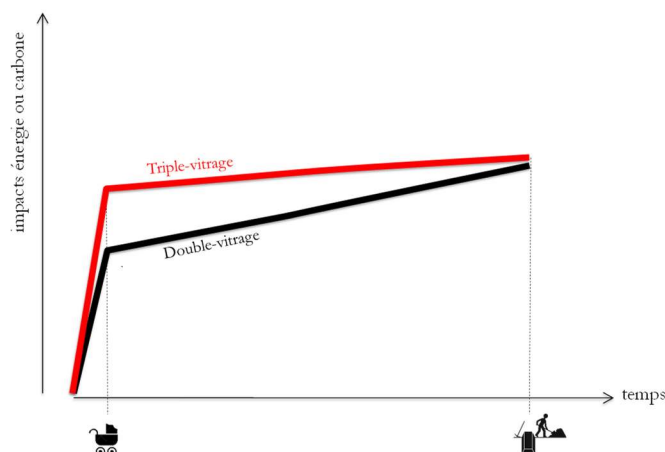
Afin de préciser la sensibilité énergie-matière d'un vitrage, le graphique (Fig. 295) établit le bilan cumulé sur une durée de vie de 15 ans, en comparant l'écart d'émissions de gaz à effet de serre¹ entre un double et un triple vitrage, selon l'intensité climatique² et le ratio d'émissions de CO₂ des émetteurs de chaleur. Nous percevons que dans le cas d'un chauffage au bois ou d'une chaleur produite par l'énergie solaire, la question de l'intérêt de l'incorporation d'un triple vitrage peut se poser³ (cases rouges)

Fig. 285. Bilan comparé entre double et triple vitrage : le cas d'un climat clément et d'un système de production de chaleur faiblement émetteur en gaz, à effet de serre.

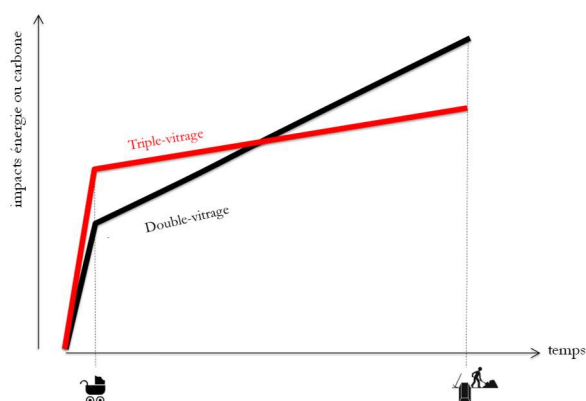
¹ En kg CO₂e.

² Exprimé en DJU, pour degrés-jours unifiés.

³ Ou encore avec une pompe à chaleur couplée à un mix électrique peu émetteur.



En effet, si la source de production de chaleur n'émet pas ou émet faiblement des gaz à effet de serre, le surcoût constructif originel du triple vitrage ne parvient pas à être remboursé (dans une métrique en CO₂). Le triple vitrage (ou la transparence sophistiquée) n'atteint jamais le point d'équilibre par rapport à une solution plus simple et rudimentaire (Fig. 285, en haut). À l'inverse, dans le cas d'une source de chaleur fortement émettrice¹ de CO₂, et dans le cas d'un climat rugueux, le triple vitrage est clairement intéressant (cases vertes) et il finit par être rentable écologiquement et économiquement (Fig. 285, en bas).



Un autre exemple

Un vitrage isolant en hiver exposé au sud

L'analyse précédente interrogeait le dilemme performance d'isolation et émissions de gaz à effet de serre. Nous questionnons à présent les vertus

¹ Par exemple chauffage électrique dans un pays où le mix électrique est fortement fossile.

bioclimatiques à l'échelle du vitrage et le compromis entre isolation et capacité de gains d'énergie par la transparence. Pour borner cette première analyse avec quelques ordres de grandeur, nous nous placerons dans les conditions d'une journée d'hiver, quelque part entre 45 et 50 degrés de latitude Nord. En ce mois de décembre, le thermomètre flirte avec le gel ; il est 11 heures du matin et le flux solaire récupérable en façade sud est d'environ 200 watts par mètre-carré de façade exposée au sud. À l'intérieur de l'édifice, règne une douce température de 20°C ; la fenêtre au sud dispose d'un vitrage isolant, datant des années 2000.

Bilan de rendement

Dressons un premier bilan : d'abord les apports, environ 150 watts¹ par m² ; puis, les déperditions, environ 50 watts² par m². Les apports nets sont donc d'environ 100 watts par m² à comparer aux 200 watts par m² incidents. Dans cette situation, le rendement de conversion de l'énergie solaire est de 50%. Mais en hiver, il fait très souvent nuit et le rendement sur la journée est alors bien plus faible.

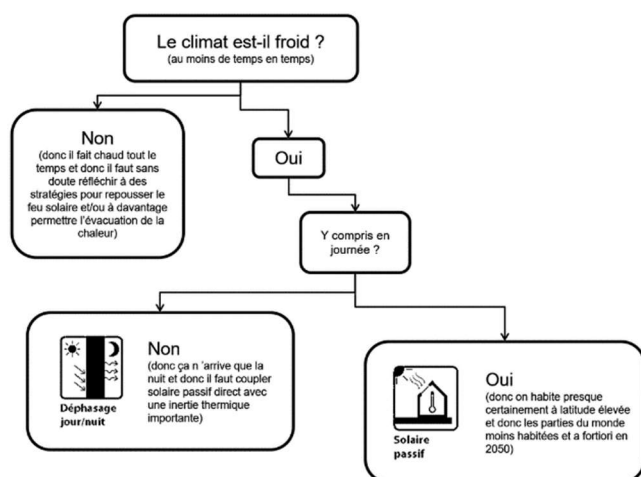


Fig. 286. *Le logigramme du solaire passif*

Dans un chapitre précédent, et lorsque nous décrivions le solaire thermique (#11), nous notons que ce dernier limite cet inconvénient en stoppant le mouvement du fluide caloporteur lorsque la ressource solaire n'est plus là.

L'isolation variable comme turbo à rendement

¹ En effet le vitrage possède un facteur solaire de 0.75, une valeur assez classique et le flux entrant correspond donc au produit des 200W par 75% soit 150W

² En considérant que le facteur U, la conductivité thermique de l'ensemble fenêtre est d'environ 2,5W/m².°C

Fig. 287. *Maison de Steve et Holly Baer à Corrales, Nouveau-Mexique, 1973*



Comment éviter cette « pathologie » du solaire passif ? Sans doute grâce à une isolation variable. Dans nos contrées, il devrait être obligatoire de prévoir un volet¹ pour renforcer l'isolation de notre fenêtre lorsque le feu soleil est couché. En 1973, Steve Baer proposait un archétype essentiel avec sa maison située à Corrales dans le Nouveau-Mexique, aux Etats-Unis [7] (Fig. 287). Sa solution de mise en œuvre du solaire passif était diablement efficace : des volets, tels des ponts levis, qui réfléchissent le soleil de la journée pour augmenter le flux solaire capté ; qui se referment la nuit pour limiter les pertes thermiques ; des bidons d'eau stockés dans les étages intérieurs pour augmenter l'inertie thermique² et diffuser doucement la chaleur solaire accumulée pendant la journée [13]. Notre *Duc de Lille* est un hommage à Baer, il démontre comment le solaire passif peut prendre l'échelle de l'infrastructure urbaine (chapitre #16).

Le solaire passif : une récolte spécifique

De la latitude

Le logigramme ci-contre explicite les prérequis pour récolter l'énergie solaire selon la technique du solaire passif (Fig. 287). À la différence d'autres flux comme le solaire thermique (chapitre #11) ou le solaire photovoltaïque (#13), le solaire passif n'est assurément pas une solution globale. Il n'a de sens que pour les climats induisant des besoins chauds élevés, et situés dans les latitudes dont la valeur absolue dépasse 45 à 50 degrés, situation géographique nécessaire autorisant une réception intéressante de l'énergie solaire sur un plan vertical, lorsque le soleil est bas à l'horizon en saison hivernale. Or, une partie très minoritaire de la population mondiale vit à ces latitudes : rappelons en effet qu'en 2017, plus des deux tiers de la population mondiale vit et habite dans la bande tropicale (#19). Autrement dit dans des géographies où les courses solaires sont presque toutes similaires : un soleil situé l'essentiel de son temps au zénith.

Une évaluation plus fine du rendement

Un exemple à Nancy

Pour préciser cet enjeu des rendements, nous l'illustrons avec la ville de Nancy et les données climatiques représentatives de son climat, sur la période de temps correspondant habituellement à la période de chauffe dans les logements, du 15 octobre au 15 avril. En abscisse, les températures extérieures sont représentées (en °C) ; en ordonnée figure le flux solaire impactant un mètre-carré d'une paroi verticale orientée au sud (en W par m²).

¹ Ou un rideau intérieur isolant

² L'eau possède en effet une excellente capacité thermique volumique. Un mètre-cube d'eau dont la température varie de dix degrés stocke ou déstocke l'équivalent d'environ 10kWh d'énergie thermique.

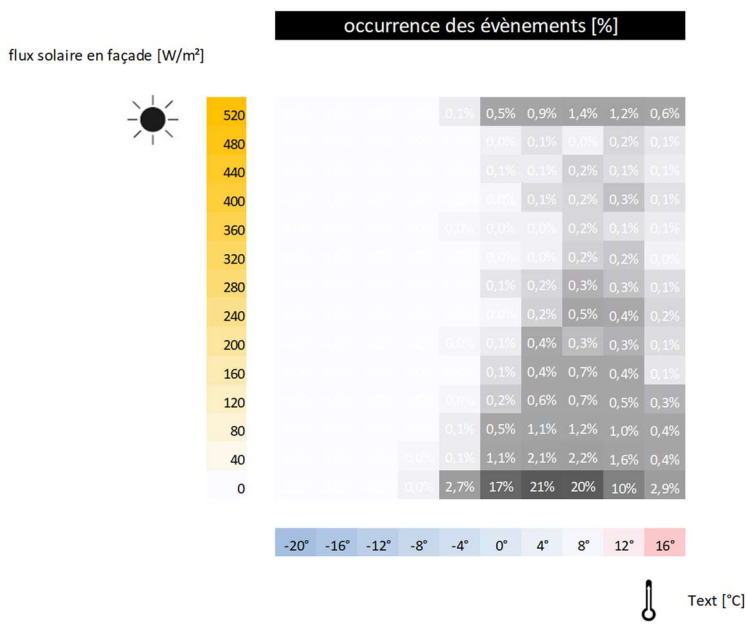
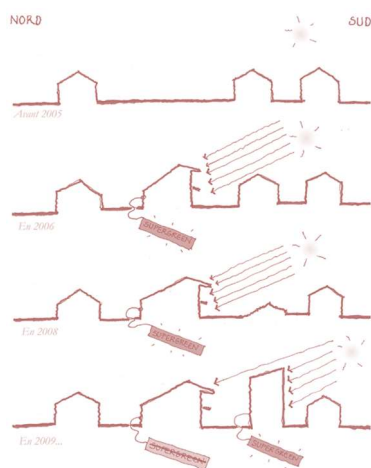


Fig. 288. *Statistiques climatiques à Nancy pendant la période de de chauffe (entre 15 octobre et 15 avril). Analyse comparée entre flux solaire incident en façade sud et température d'air extérieure : occurrence des évènements en % du temps global. Étude RM, novembre 2015. Base Meteonorm, climat actuel.*

À chaque intersection, nous mentionnons le pourcentage de temps correspond à cette situation climatique. Évidemment, une grande partie de ces évènements correspondent à des situations pendant lesquelles le flux solaire est nul. Les cases plus grises correspondent aux évènements les plus denses dans le temps. Entre le 15 octobre et le 15 avril, le flux moyen solaire frappant la façade sud est d'environ 55 watts¹ par m² exposé. En journée, il est en moyenne de 205 watts par m². Pour un simple vitrage, le bilan est donc négatif : il perd plus d'énergie par conduction qu'il n'en gagne avec les apports solaires gratuits (Eq 5, plus loin dans de chapitre). Pour un double vitrage², le rendement serait alors d'environ 30% (Eq 6). Et pour un triple vitrage³, il s'approcherait des 40%.

¹ En comptant la nuit
² U ~ 1,8W/m².°C et FS ~0.75 (FS pour facteur solaire)
³ U ~1W/m².°C et FS ~0.65

Fig. 289. *Un scénario fictif du solaire passif en coupe nord-sud ou comment la permanence des conditions de prospect conditionne la durabilité de la production solaire passive.* [8]



Rendements moyens à l'année et à l'échelle de l'architecture

Ce rendement doit toutefois être comparé à la totalité de l'énergie solaire reçue au cours de l'année par le bâtiment. Dans cet article, notre projet était en effet d'évaluer le rendement du solaire passif ; dans ce cas, la performance moyenne est plutôt faible. En effet, pendant la période de chauffe hivernale, la façade sud (sans masque) recevra environ¹ 250kWh par m². Imaginons alors un bâtiment cherchant à maximiser le solaire passif, et dont la façade sud serait vitrée aux deux-tiers et dont le rendement moyen des vitrages serait supérieur² à 50%. Si les façades d'un étage courant font environ 2,5 mètres de hauteur et que la profondeur du bâtiment est de 10 mètres³, le solaire passif générera annuellement environ 20kWh de chaleur par mètre-carré de plancher. Vu que le gisement solaire horizontal est d'environ 1000kWh par m² et par an à Nancy, le rendement rapporté au plancher tendrait vers un très modeste 2%. Nous sommes donc bien loin des performances du solaire thermique, surtout quand ce dernier est couplé à des systèmes de stockage (#11).

L'urbanisme du solaire passif

Rendements sur un tissu urbain

Toutefois, ce rendement global étant rapporté à la surface d'un plancher d'étage, nous pourrions décider d'édifier un bâtiment de grande hauteur. Si celui-ci dispose de dix étages, le rendement passera alors à 20%, en cumulant les rendements des différents niveaux. Mais cette construction produira nécessairement de l'ombre en hiver sur son environnement et sur une distance correspondant à peu près à trois fois sa hauteur totale⁴. Ainsi, à l'échelle urbaine, nous concluons que le rendement global du solaire passif ne sera jamais très élevé. Pour préciser cette assertion, si nous considérons que notre bâtiment est épais d'une dizaine de mètres et qu'il est haut de 25 mètres, il doit alors être éloigné d'environ 75 mètres de son prochain pour respecter les règles de masque mutuel. Dans ce cas, le rendement urbain du solaire passif chute donc à moins de 3%⁵...

¹ 55W * 6 mois * 30j/mois * 24h.

² Nous avons vu précédemment qu'un triple vitrage atteignait difficilement cette valeur sous le climat nancéen et que cela supposait sans doute de mettre en place une isolation variable comme un volet par exemple

³ Ce qui est assez étroit, surtout comparé à l'Unité d'Habitation de Le Corbusier qui fait 24 mètres de large.

⁴ Le soleil est environ à 30° au-dessus de l'horizon

⁵ 20% * (10m/75m)

Les villes solaires aléatoires ou la recherche de la grammaire du soleil

« Le recours aux principes de l'architecture bioclimatique est souvent rappelé aux concepteurs lorsqu'il s'agit de parvenir à la définition de bâtiments énergétiquement vertueux. Cette grammaire sous-tend un jeu savant des volumes qui optimise le fonctionnement naturel du bâtiment pour des conditions climatiques données. En matière de logement par exemple, cela suppose de privilégier au maximum les baies vitrées au sud afin de bénéficier d'apports de chaleur gratuits en hiver ; des systèmes de protection solaire extérieure réduisent conjointement le flux incident hors de la période de chauffe. Qu'en est-il cependant quand l'horizon est partiellement masqué du côté méridional ? Comment parvient-on à répartir de façon équitable le droit au soleil lorsqu'il s'agit de constituer un fragment de ville ? Comment passe-t-on de l'optimum individuel à la maximisation globale ? BedZed¹, dessiné par l'agence de Bill Dunster, a fourni une première réponse en organisant les logements selon des barrettes orientées essentiellement est-ouest et dont l'épannelage en coupe nord-sud est tel que chaque barrette ne produit pas de masque en hiver à celle située en aval dans la direction septentrionale. Comment généraliser ce principe aux différentes formes urbaines ? [...] Le problème posé se résume dès lors à cette interrogation : pour un spectre urbain donné, quelle forme urbaine se fait le moins d'ombre à elle-même ? Énoncé différemment, quel arrangement spatial des volumes permet de maximiser les apports solaires en période de chauffe ? Quelle grammaire morphologique est susceptible d'assurer un fonctionnement équitable du bioclimatisme ? Dans le cas d'une intervention au sein d'une morphologie déjà constituée et donc avec des conditions de masque données, quelle géométrie optimale maximise l'ensevelissement hivernal du programme ? » [8] (Fig. 294)

Quelques expériences d'urbanisme solaire

Dans la veine des travaux de Ralph Knowles [9], les recherches conduites autour des *Villes Solaires Aléatoires* (Fig. 290) tachaient d'explorer des grammaires de formes évitant le recours à des tracés urbains triviaux, privilégiant les vides (et donc les voiries) selon des orientations est-ouest, et générant ainsi des prospectus solaires propres à faire bénéficier de façon homogène les bienfaits du solaire passif [8]. Avant *Bedzed* ou encore le quartier solaire dessiné par Rolf Disch au sein du quartier Vauban à Freiburg-im-Brigsau, John Perlin rappelait dans *Let It Shine* [2], les prémices de l'urbanisme solaire par Bernhard Christoph Faust en 1826 et sa *Sonnenstadt* qui obéissait déjà aux lois solaires (Fig. 291). Mais à quelles fins ? Les contraintes formelles que supposent l'optimisation du solaire passif en valent-elles la chandelle au regard de la faiblesse des rendements urbains annoncés ? N'est-il pas plus efficace de maximiser la production en toiture, en recourant par exemple au binôme solaire thermique et stockage intersaisonnier ? (chapitre #11)

Futurs possibles de l'urbanisme guidé par le soleil

Avant de fermer les voies d'exploration du solaire passif, la conclusion des algorithmes générant les *Villes Solaires Aléatoires* montrait qu'il existe bien un « espace de formes possibles » plus complexe et plus riche que l'« urbanisme trivial du solaire passif », à savoir des formes bâties continues

Fig. 290. Des images des villes solaires aléatoires

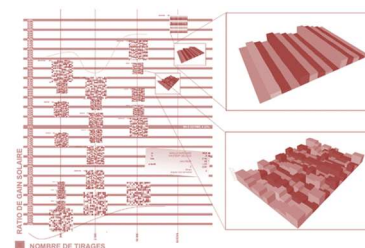
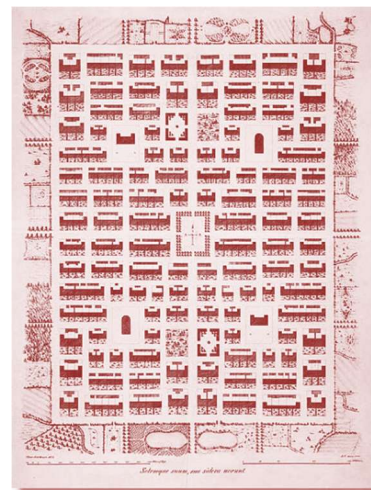


Fig. 291. Bernhard Christoph Faust, *Sonnenstadt*, 1829.



¹ Pour *Beddington Zero Energy Development*.

s'étendant d'ouest en est. Cela a quelque analogie avec les automates cellulaires explorées par Stephen Wolfram dans *A new kind of science* [10]. Nous pourrions donc composer une ville d'*Infrastructures Solaires Urbaines* « non canonique »¹ permettant de bénéficier d'une récolte optimale du solaire passif : un programme d'investigation pour le futur (chapitre #21) ?

Petite synthèse du « solaire architectural »

À l'échelle de la baie

Prévoir une isolation variable de la baie et faire en sorte que le vitrage devienne plus isolant quand le soleil n'est pas là (quitte à devenir opaque)

Prévoir une porosité solaire variable de la baie et savoir éviter les apports estivaux et de mi-saison.

Évaluer le surcoût en énergie grise du solaire passif : attention à ne trop consommer de ressources pour optimiser un gisement faible. Le solaire passif doit rimer davantage avec *low tech* que double-peau hyper-technologique.

À l'échelle de l'architecture

Anticiper la question inertielle et voir comment les apports diurnes génèrent un doux confort hygrothermique pendant la nuit.

Évaluer les gains solaires rapportés à la surface de plancher pour dépenser l'énergie constructive aux bons endroits.

Comparer le solaire passif au gain du solaire thermique (ou au solaire photovoltaïque couplé à une pompe à chaleur) avant toute décision.

À l'échelle du paysage et du tissu urbain

Se poser la question des masques à incidence basse.

Imaginer le futur et la volatilité des conditions de masque [8].

Évaluer le rendement solaire urbain équivalent.

Type de production pour le solaire passif

Rendement

Selon la convention d'une valeur négative comme un apport, le flux de puissance f perçu par une baie peut s'écrire (en watts par m² de fenêtre):

$$\text{Eq 5.} \quad f = -\varphi \cdot g \cdot \sin(\theta) + \Delta U \cdot \Delta T$$

Où :

¹ Au sens mathématique du terme.

- $\varphi \cdot \sin(\theta)$ est le flux solaire incident, projeté sur la normale à la fenêtre [W par m²]
- g est le facteur solaire du vitrage
- ΔU est l'écart de conductivité surfacique du vitrage comparée à la valeur moyenne de l'enveloppe [en W par m² et par °C]
- ΔT est l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur [en °C]

Le rendement s'écrit alors :

$$\text{Eq 6.} \quad \eta = \frac{f}{-\varphi} = g \cdot \sin(\theta) - \frac{\Delta U \cdot \Delta T}{\varphi}$$

Synthèse

Chaleur à basse température pour le chauffage

Baies de captage situées en général sur les façades exposées pendant la saison de chauffe (peut également s'implanter en toiture)

Plutôt faible emprise bâtie pour éviter les masques sur les orientations exposées en situation hivernale (hauteur solaire à basse incidence)

Fonctionne aux latitudes plutôt élevées en valeur absolue

Rendement max.	80%
Contenu exergique	10%
1 kilo de simple vitrage ¹	40W _{th} de capacité
1 kilo de simple vitrage	350kWh thermiques produits sur la durée de vie à Lorient en façade sud et sans masque
	1400kWh thermiques produits sur la durée de vie à Héraklion en façade sud et sans masque
Durée de vie	Au moins 30 ans
Facteur de charge	25%

*

¹ Soit l'équivalent de 0,07m² d'un vitrage de 6mm d'épaisseur

Bibliographie

1. SINGH Madanjeet, *L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature*, Unesco France Loisirs, 1998
2. PERLIN John. *Let it Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy*, New World Library, 2013
3. KOOLHAAS Rem, *Delirious New York*, 1978
4. DENZER Anthony, *The solar house. Pioneering sustainable design*, Rizzoli, 2013
5. LEMPEREUR Hubert, « Histoire de l'isolation », feuilleton en sept épisodes, *d'Architecture*, 2017
6. BONNEUIL Christophe, FRESSOZ Jean-Baptiste, *L'Événement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Seuil, 2013
7. BORASI Giovanna, ZARDINI Mirko, *Désolé plus d'essence. L'innovation architecturale en réponse à la crise pétrolière de 1973*, Centre Canadien d'Architecture, 2008
8. MENARD Raphaël, « Mutations des programmes » (p27 à 31), dans *Architecture = durable*, Catalogue de l'exposition du Pavillon de l'Arse-nal, 2008
9. KNOWLES Ralph L., *The Solar Envelope: its meaning for energy and build-ings*, Energy and Buildings, n°35, 2003, pp.15-25
10. WOLFRAM Stephen, *A new kind of science*, Wolfram Research, 2002
11. DELESTRAC Denis, *Le sable, enquête sur une disparition*, documentaire, 2013
12. SOUVIRON Jean, *Producing Transparency, An energy and material flows analysis of glazing and membrane façades and their potential of hybridisation*, mémoire de fin d'études des Ponts Paristech, directeur d'études Cyril Douthe, 2016
13. LOPEZ Fanny. *Le Rêve d'une déconnexion. De la maison à la cité auto-éner-gétique*, La Villette, 2014
14. MENARD Raphaël, AZZOPARDI Paul, LEMASSON Alice, TA-BASSO Edoardo, *Guide d'interaction énergie-climat, volume 1, enveloppes*, ISBN : 978-2-8760-2048-1, 134 pages, Egis, Novembre 2011

Fig. 292. Rendement solaire moyen d'un simple vitrage ($U=5W/m^2 \cdot ^\circ C$ et $FS = 90\%$)

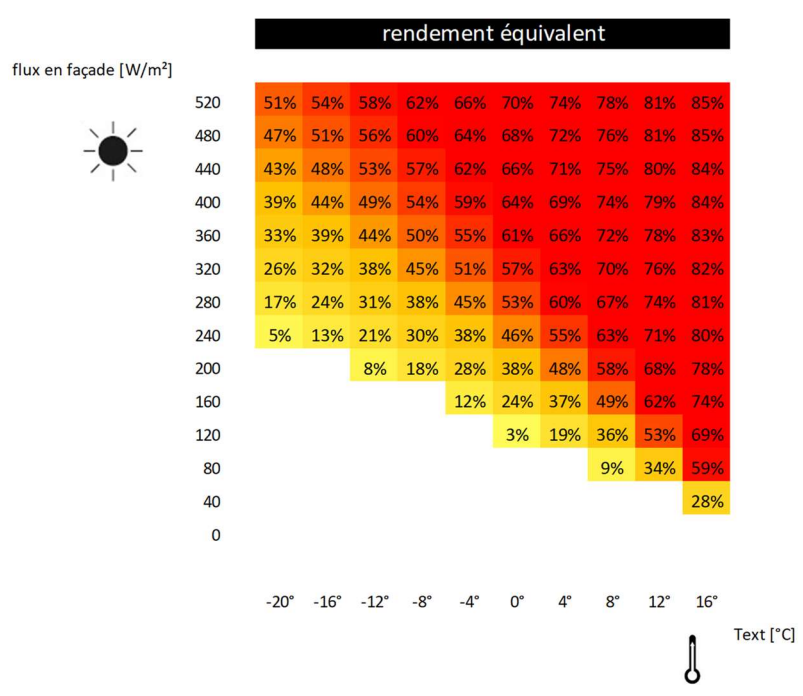


Fig. 293. Rendement solaire moyen d'un double vitrage ($U=2W/m^2 \cdot ^\circ C$ et $FS = 70\%$)

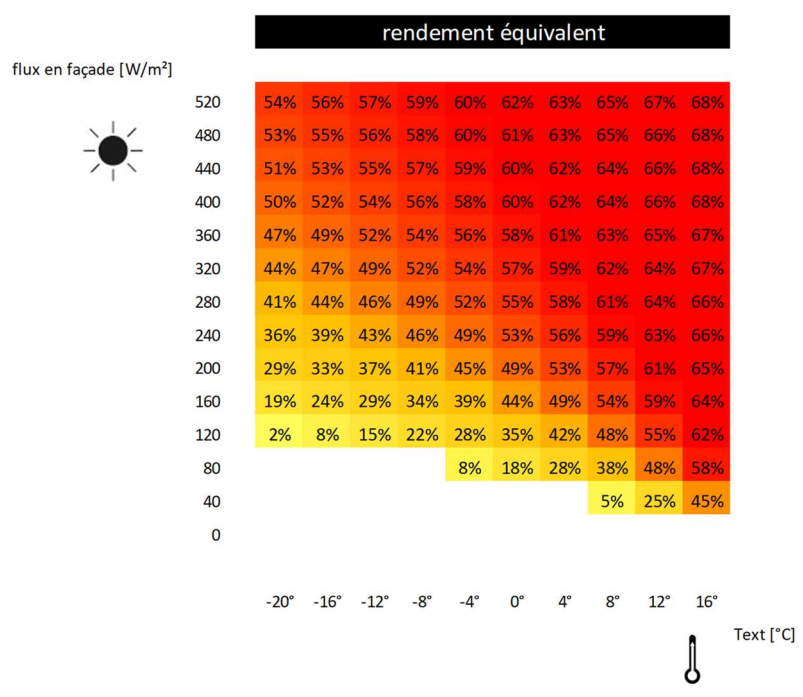


Fig. 294. Extrait des villes solaires aléatoires.

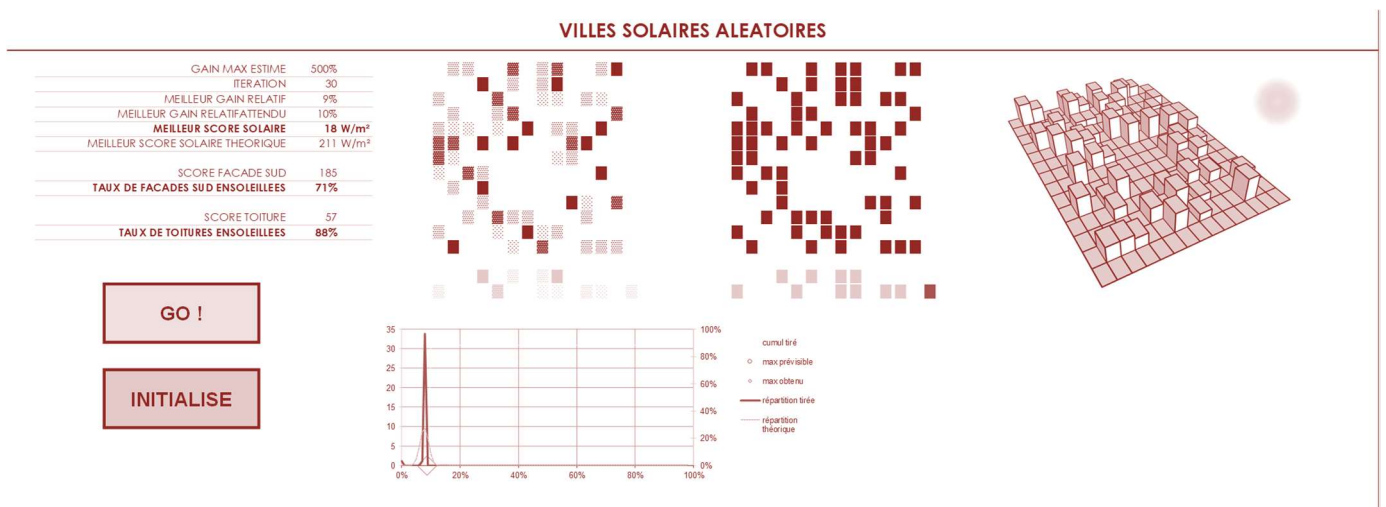
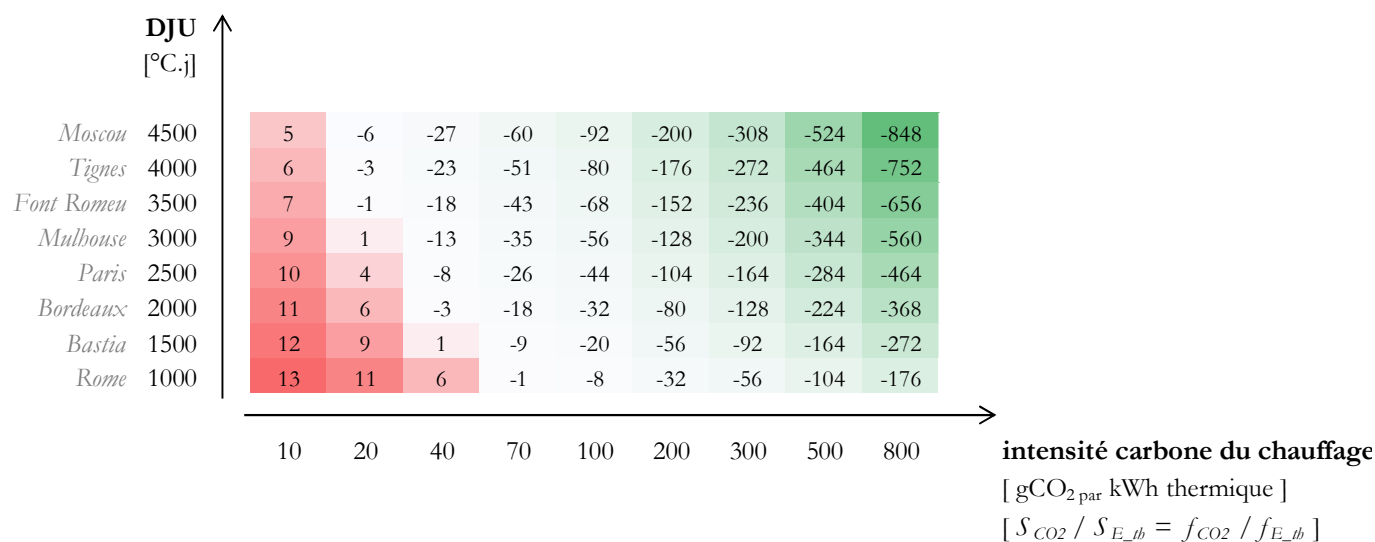


Fig. 295. Bilan cumulé sur une durée de vie de 15 ans en kgCO₂eq de l'écart d'émissions CO₂ selon le climat et le ratio d'émissions de CO₂ des émetteurs de chaleur. Le rendement du coût de production de la chaleur solaire amortie sur 20 ans. 100kWh gagnés par an, cumul de 2000kWh sur la durée de vie, soit 18grCO₂ par kWh pour le double vitrage et 24grCO₂ par kWh mais il faudrait prendre l'écart marginal de carbone gris en lieu et place d'une paroi opaque.

écart de bilan carbone sur la durée de vie entre triple et double vitrage [kgCO₂/m²]



#16 L'architecture-énergie (temps V)

King Hubbert et la prophétie réalisée du pic pétrolier américain dans les années 1970. Les énergies renouvelables, la contre-culture et le refus du modèle dominant des utilités centralisées. L'émergence d'une architecture soucieuse de l'efficacité énergétique et explorant les possibilités de l'autonomie énergétique. Des typologies d'efficacité énergétique contraignant l'expression architecturale. Le discours dominant sur les vertus de la densité et la critique de l'étalement urbain.

Jalons temporels

- 1891 Premiers chauffe-eaux solaires commerciaux
- 1930 Thermopane, premier vitrage isolant
- 1954 Premier panneau photovoltaïque en silicium
- 1979 Panneaux solaires thermiques sur la Maison Blanche
- 1980 Éoliennes modernes à axe horizontal
- 1981 Cheminée solaire de Manzanares, Espagne, prototype de 50kW
- 1983 Vitrage à basse émissivité
- 2015 Début de la parité réseau du photovoltaïque

Énergies nouvelles

- Éoliennes modernes à axe horizontal de grande puissance
- Éoliennes à axe vertical de type Darrieus
- Solaire photovoltaïque
- Solaire thermodynamique et cheminées solaires
- Solaire passif avec vitrage à haute isolation
- Biogaz par méthanisation et biocarburants
- Centrales géothermiques

Matières nouvelles

- Silicium et semi-conducteurs
- Alliages métalliques
- Plastiques organiques

Quelques références

- 1930 Solarium tournant du docteur Jean Saidman, Aix-les-Bains
- 1930 Maison Dymaxion par Buckminster Fuller
- 1933 House of Tomorrow par Fred Keck
- 1935 Villa Girasole, Angelo Invernizzi
- 1957 MIT Solar House IV, Lexington
- 1994 Maison Heliotrop par Rolf Disch à Fribourg-im-Brisgau
- 2010 Nouveau refuge du Goûter, 720m² autosuffisants à 3835m
- Thomas Herzog, Behnisch & Partner, Rolf Disch,
- Norman Foster, Ralf Erskine, ...

L'architecture qui renonce aux énergies fossiles

« Hâtivement, sur les miettes fossiles restantes, nous sommes parvenus à édifier les infrastructures capables de produire en grande masse la diversité de ces machines techniques permettant de récolter l'énergie. La faucille de notre « néo-néolithique ». Commençons par les panneaux solaires ; à présent, le cercle vertueux énergétique et matériautique est engagé : ils s'auto-reproduisent, s'auto-recyclent sous le flux permanent des 169 watts par mètres-carrés qui irriguent en moyenne et en permanence la surface du globe. Telle la croissance des nénuphars, les panneaux solaires fabriquent des usines qui fabriquent des panneaux solaires. »¹ [1]

Repasser du stock au flux

Deux mutations avant la troisième

En l'espace de deux siècles, l'humanité a vécu trois mutations énergétiques. La première, associée à l'avènement de la révolution industrielle (chapitre #12) : une partie de l'humanité s'est progressivement « désolarisée » en découvrant puis en exploitant les stocks de solaire ancien, le charbon, tout en délaissant progressivement le solaire récent². Une deuxième période (#14), donnant l'illusion d'une « permanence énergétique » en puisant massivement dans les hydrocarbures, charbon, gaz et pétrole, ainsi que dans les stocks de matières fissiles (Fig. 296). Confronté à la finitude des stocks, le temps V anticipe la troisième transition, liée à la fin des énergies fossiles (ou à leur extraction facile). Un nouveau régime permanent est à inventer [2,3,4,5,6 et 7] alors que le « degré de solarisation » de l'humanité est devenu très faible (moins de 15%), alors que la population mondiale a largement augmenté en deux siècles (d'un facteur sept), bien que la quantité et la diversité des usages énergétiques ont explosé (au moins d'un facteur trois) et que les conséquences environnementales de la séquence des fossiles deviennent très prégnantes, par les pollutions qu'elles ont engendrées.

L'énergie avant les fossiles

Il y a un peu plus de deux siècles pourtant, la quasi-totalité de l'énergie consommée par l'humanité était fournie par des formes directes ou dérivées de l'énergie solaire (#9). Nos aïeux vivaient au rythme de la biomasse (0), forme renouvelable et renouvelée du cycle de l'énergie et de la matière, par la grâce du vivant et de la photosynthèse. Ça et là, l'énergie du vent était utilisée : moulins à vent, marine à voile. Parfois l'énergie des cours d'eau était utilisée pour déplacer des embarcations ou acheminer du bois par flottaison (#8).

Fig. 296. Le diagramme de solarisation de l'humanité au cours des différents temps.

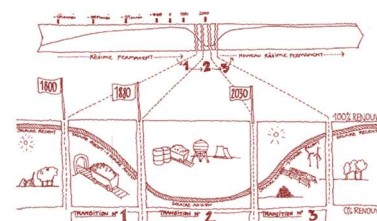


Fig. 297. Des glaneuses par Millet, 1857



¹ La renaissance des fabriques, p11

² De 1800 à 1880, en passant du bois au charbon

L'agriculture, science et culture de l'énergie

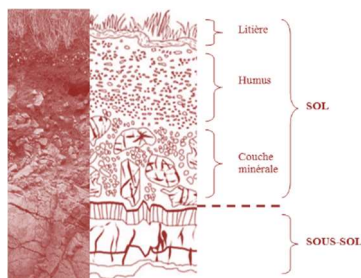
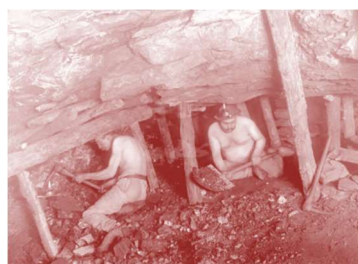
Depuis la révolution néolithique, l'homme avait domestiqué et optimisé la production de la biomasse par une lente sédimentation du savoir, ce dernier se transmettait d'abord de façon orale (#7) puis ensuite, avec le support numérique de l'écrit¹ (#9). Selon cette perspective, sciences et techniques agricoles étaient des savoirs de la matière circulaire et de l'énergie renouvelable (#10). Les cycles intriqués de l'énergie et de la matière étaient atmosphériques, ou situés dans les couches peu profondes du sol : l'humus, la terre et sa splendide complexité expliquée avec malice dans le documentaire de Coline Serreau, *Solutions locales pour un désordre global* [8]. Nous étions une civilisation du ciel et d'une « pellicule de sol » (Fig. 298).

Dilapider le stock !

En miroir, en cette première moitié du 21^{ème} siècle, la quasi-totalité de la consommation mondiale d'énergie est issue de nos stocks anciens, de matières énergétiques non renouvelables : charbon (Fig. 299), gaz, pétrole, fissiles nucléaires. Plus de 85% de notre consommation d'énergie primaire est gratté, puisé dans les sols, parfois à grande profondeur, jusqu'à trois mille mètres pour certaines extractions de pétrole [9]. Ce sera notre fugace civilisation du sol, ontologiquement transitoire, un épiphénomène de l'aventure humaine, une femtoseconde à l'échelle des temps géologiques. À l'échelle planétaire, nous n'avons encore que peu conscience que ce moment, celui du monde des fossiles, de l'énergie facile, cette période de sociétés massivement matérielles, sera extrêmement brève [10]. En pompant massivement notre « bas de laine de vieux soleil », cette trésorerie énergétique souterraine, ces élixirs de biomasse, nous sommes en train de dilapider en l'espace de quelques centaines d'années un trésor constitué pendant des millions d'années [11]. Une nuit d'orgie dans une cave de Montrachet (Fig. 300).

Uchronie d'une bonne gestion

Un bon père de famille, global, planétaire, un planificateur omniscient aurait évidemment sans doute agi différemment. Il aurait pris conscience que ces petites économies nichées dans le sol, auraient été de précieuses assurances-vie pour le futur. De fait, l'avenir sera plus qu'incertain comme nous le découvrirons au cours des prochains chapitres (chapitres #18 et #22). La raison aurait commandé prudence, une gestion rigoureuse de nos capitaux d'énergies et de nos matières fossiles. Le livre *The Road* [12] ou encore le récit d'une hypothèse probable de la fin des grands sauriens au moment du crétacé nous rappellent ce que devient le rythme du monde sans flux d'énergie, si le ciel est obscurci. Une météorite ou une explosion volcanique peuvent conduire à un amoindrissement momentané du flux solaire : nos capacités renouvelables seraient alors largement diminuées.

Fig. 298. *Coupe typique d'un sol*Fig. 299. *Mineurs de fond procédant à l'abattage du charbon, Joseph Philibert Quentin*Fig. 300. *Extrait de La Grande Bouffe de Marco Ferreri (1973)*

¹ En considérant que la transcription de l'oral par une suite de codes graphiques, et ces derniers étant en nombre fini selon les alphabets, considérons alors que cette transcription s'apparente à une numérisation.

Mais désolé... plus d'essence [13]. Plus de trésorerie énergétique à l'échelle globale, les batteries de secours à plat, car nous avons dilapidés la cave en pleine euphorie et complètement de saouls de croissance [14].

Bientôt la fin des croissances

Il y a quelque chose de pourri au royaume des fossiles

Dans sa préface à l'édition française de *Something New under the Sun*, l'auteur et historien John R. Mc Neill écrit [15] (Fig. 301) :

« Lorsque j'ai commencé à travailler sur ce livre au début des années 1990, je pensais que l'élément qui avait le plus fortement marqué l'histoire environnementale mondiale du 20^{ème} siècle avait été l'accroissement de la population. Lorsque j'eus achevé ce travail, mon opinion avait changé, et c'est le système énergétique basé sur les énergies fossiles que je considérais comme la variable essentielle dans l'histoire environnementale moderne ; j'ai tâché de souligner son importance dans ce livre. Je pense maintenant, dix ans plus tard, que si c'était à refaire, j'insisterais plus encore sur les énergies fossiles. »

Smil [16] rappelle qu'en 2010, 80% de l'énergie électrique produite dans le monde était d'origine thermique et que cet âge thermo-industriel a commencé en 1880 avec les premières centrales à charbon, mises au point par Edison. Dans son *Réinventer le feu*, Amory B. Lovins [3] énonce que « environ 78% de toute l'activité humaine sont alimentés en extrayant et en brûlant les résidus décomposés de marécages datant de temps immémoriaux » et ajoute en note que ce sont en fait 90% lorsqu'on exclut la biomasse récupérée comme le bois et le fumier. En complément à cette sentence, Lovins dessinait l'utopie d'un monde débarrassé des énergies fossiles. Nous allons voir dans ce chapitre comment une partie de la production architecturale tentera d'emboîter le pas à cette vision. [3]

« Et si combustible ne rimait plus avec nuisible ? S'il n'y avait plus de changement climatique, de marées noires, de coups de grisou, d'air encrassé, de paysages dévastés ni de biodiversité sacrifiée ? Plus, non plus, de pauvreté énergétique. Plus de guerres, de dictatures ni de terrorismes liés au pétrole. Plus de pénuries ni de coupures d'alimentation. Plus d'inquiétude à avoir. L'abondance énergétique et rien d'autre. Salulaire et abordable, pour tous et pour toujours. »

Enquêtes sur les raretés à venir

Avant cet horizon¹, avant la transition vers un nouveau régime permanent, un monde où les flux renouvelables seraient supérieurs au flux des besoins, dès les années 1960, un certain nombre d'enquêteurs commencèrent à tirer les sonnettes d'alarme dans le rugissement thermique des Trente Glorieuses, du côté du monde occidental. Un géophysicien américain du nom de Marion King Hubbert² qui travaillait dans les laboratoires de recherche de la *Royal Dutch Shell* à Houston [9, 10 et 11], modélise puis théorise les courbes de production de puits de pétrole. Hubbert accède

¹ Qui rejoint d'ailleurs celui décrit par l'architecte Winy Maas, l'un des associés de l'agence MVRDV, en épilogue de l'ouvrage *Green Dream*

² 5 octobre 1903 - 11 octobre 1989

Fig. 301. *Couverture de Du nouveau sous le soleil, édition française de Something new under the sun par John R. Mc Neill.*

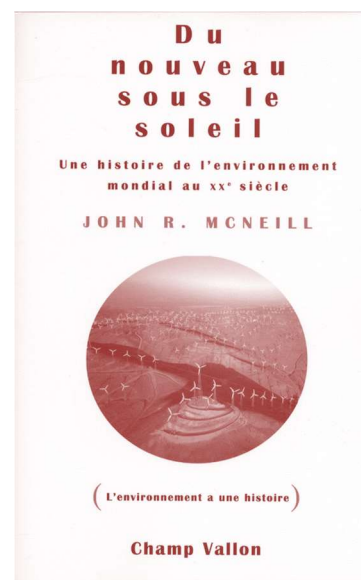
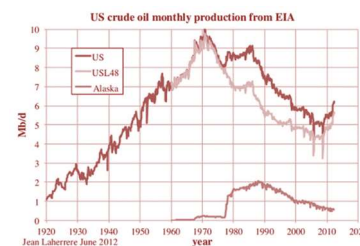


Fig. 302. *Courbe de production américaine et rythme de découverte.*



rapidement à une certaine notoriété en prédisant le pic de production du pétrole américain (Fig. 302) dans les années 1970. Ce sera le pic de Hubbert, avant de se généraliser sous le nom de pic pétrolier ou *peak oil*.

Les stations-service planétaires sont bientôt vides

De façon générale, ses courbes de déplétion anticipent le déclin à venir des plus grands puits de pétrole (dont le plus important, Ghawar¹ en Arabie Saoudite) et prédisent une tension inéluctable sur la ressource pétrolière, lorsque le rythme d'extraction deviendra supérieur au rythme des découvertes de nouveaux gisements [9 et 10] (Fig. 303). Avec la conscience de ces « murs de raretés », de ces asymptotes des gisements terrestres, une science de la finitude des ressources s'ordonne. Des théories économiques hétérodoxes [17] prolifèrent dans un schéma distinct de l'économie classique, de la foi dans le marché autorégulateur, et du libéralisme économique sans contraintes sur les ressources naturelles.

Une demande croissante en énergie et en exergie

Au cours des cent dernières années, en parallèle de la croissance de la demande énergétique², nous pourrions aussi constater une augmentation de la valeur moyenne de la qualité énergétique de nos usages finaux. Des besoins accrus en mobilité, en éclairage, en communication, en traitement et stockage de l'information... Le taux d'exergie de nos besoins finaux d'énergie n'en finissent pas de croître (chapitres #3 et #4). Notons qu'une partie importante de notre quantité d'énergie est dévolue à la récupération de la qualité d'un vecteur énergétique : nos automobiles et leurs moteurs thermiques filtrent l'exergie des hydrocarbures pour leur motion en produisant beaucoup de chaleur, les centrales thermiques électriques procèdent de façon identique pour générer la qualité exergique de l'électricité. Les machines thermodynamiques, soumises au cycle de Carnot, ne sont rien d'autres que des « filtres à exergie » : elles « tamisent » un flux d'énergie pour en récupérer la substantifique moelle, de l'énergie mécanique, facilement convertible en électricité et en rayonnement.

La dette de la connaissance

L'augmentation massive de la demande exergique mondiale nourrit l'inflation de la production de savoir, particulièrement dans les domaines scientifiques et techniques. Le 20^{ème} siècle est une période incroyable pour les innovations technologiques et les découvertes scientifiques [18]. À titre d'illustration, on pourrait estimer l'énergie nécessaire à la découverte du boson de Higgs. Elle serait sans doute colossale : énergie grise pour l'édification du collisionneur du CERN (Fig. 304), facture énergétique annuelle de l'installation, déplacements aériens des chercheurs, consommation électrique des serveurs et des fermes de calcul... Créer de la connaissance coûte en énergie et en matière (chapitre #1). De façon similaire, la com-

Fig. 303. Une plateforme pétrolière offshore.



Fig. 304. Le CERN et ses machines.



¹ Ghawar est le plus grand gisement pétrolier au monde. Il est situé en Arabie Saoudite et s'étend sur une surface de 280 km de longueur et de 30 km de largeur.

² En flux moyen par terrien, soit en W/cap

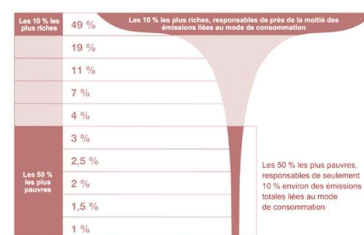
munauté de chercheurs et d'ingénieurs travaillant sur le réchauffement global¹ émettent des gaz à effet de serre lorsqu'ils se rendent à des colloques, font tourner des modèles de calcul sur des calculateurs, eux-mêmes connectés à des centrales électriques dont certaines brûlent des hydrocarbures. La question devrait être à chaque fois celle-ci : cette dette entropique, cet investissement en exutoires écologiques en vaut-il la peine ? Ce coût écologique, ce que j'inflige de façon irréversible à mon environnement, produit-il des ferments d'avenir, des promesses de lendemains meilleurs (#1) ? Nous pourrions poser la problématique de façon analogue au sujet des investissements consacrés à la fusion nucléaire contrôlée. Le projet international ITER a englouti 34 milliards d'euros. Même en cas de succès de l'expérimentation, comment peut-elle devenir une technologie à fort déploiement avant l'échéance de 2050 ? Il semble parfois facile de se réfugier derrière le chaos, un « après moi le déluge » puisque Schumpeter a énoncé que des destructions pouvaient être parfois créatrices.

Une autre croissance ?

Le début des déplétions du début du 21^{ème} siècle mettra-t-il à mal la grande accélération du savoir ? Au tournant du millénaire, la planète économique commence à être chahutée avec la résurgence de crises économiques et financières globales : krach boursier de 2001-2002, crise des *sub-primes* de 2007-2009 et des crises touchant localement des régions ou des pays de façon spécifique². Comment trouver une trajectoire d'équilibre pour la création de valeur ? Comment élaborer un scénario contemporain de captation de la « valeur solaire », de ce flux externe arrosant notre vaisseau terrestre d'une énergie de haute qualité de façon permanente [19] ? Est-il possible d'inventer une transition nous permettant de se défaire du *hold-up* de richesse accumulée depuis la nuit des temps ? Une mutation qui réduirait les inégalités criantes dont les émissions de gaz à effet de serre sont l'un des nombreux marqueurs (Fig. 305) ? Selon cette trame, nous pourrions imaginer que la préemption des énergies fossiles, que ce *shoot* d'héritage solaire soit uniquement dédié à l'édification des infrastructures capables d'engendrer durablement la valeur. Dans ce cas de figure, la perfusion au capital ancien pourrait ensuite commencer à s'éteindre progressivement. Renzo Piano se confesse en transposant cette mutation nécessaire sur nos villes [20] :

« En grandissant, tu apprends assez vite que les mots modernité et progrès sont deux pièges infernaux, et qu'on continue à te tromper en leur nom. On continue aussi à te tromper avec un autre mot, qui a été fondamental dans ce pays et en Europe : le mot croissance, un autre piège, en somme... L'idée de croissance sans limites nous a fait ériger des bâtiments, non des structures dans lesquelles une société puisse vivre et s'organiser. De l'après-guerre aux années 60, les villes ont éclaté en empiétant sur la campagne et les communes environnantes, en donnant vie à une sorte de conurbation continue. Aujourd'hui enfin, après avoir tant péché, nous commençons à comprendre que la croissance ne peut être que durable. Et alors, nous avons commencé à réfléchir, dès les années 80, sur la façon dont

Fig. 305. *La pyramide des émissions de CO₂ par décile de la population mondiale en 2015. La moitié la plus pauvre de la population mondiale n'est responsable que de 10 % des émissions de CO₂. En revanche, les 10% les plus riches de la planète sont responsables d'environ la moitié des émissions de CO₂. Source, Oxfam.*



¹ GIEC ou IPCC en anglais

² Brésil, Russie, Grèce, Venezuela, Chine...

nous avons construit les villes : au lieu de les faire exploser, il fallait tenter de les faire imploser, il fallait résorber les vides urbains provoqués par les processus de désindustrialisation ; nous devons essayer de récupérer ces trous noirs, provoqués par les zones industrielles qui se libéraient au fur et à mesure que la ville, en grandissant, rendait nécessaire le déplacement des activités productives... Nous avons pris conscience, en somme, de la nécessité de récupérer les espaces piégés par la croissance démesurée des villes... Il faut, en somme, au lieu de continuer à les faire exploser, nous devrions plutôt compléter les tissus de la ville. Au lieu de croissance sans fin, il vaudrait mieux penser à une croissance durable, grâce à elle les banlieues pourraient se transformer en villes. Tel est notre grand, notre véritable enjeu pour les 50 prochaines années. »

L'émergence de scénarios locaux d'autonomie énergétique

Sur le terrain de l'énergie, depuis la fin du 20^{ème} siècle, on note l'apparition d'ouvrages à dimension nationale¹ montrant des similitudes méthodologiques : scénarios de descente de la demande en parallèle de stratégies encourageant et crédibilisant l'émergence d'un mix renouvelable contextuel (#10). Citons l'ouvrage de Lovins s'adressant aux Etats-Unis, les travaux de David Mac Kay pour le Royaume-Uni [4] et les scénarios de l'association *négaWatt* pour la France² [6]. Avant cela, Ivan Illich nous mettait en garde quant au mirage et au danger d'une profusion abondante et renouvelable :

« Même si on découvrait une source d'énergie propre et abondante, la consommation massive d'énergie aurait toujours sur le corps social le même effet que l'intoxication par une drogue physiquement inoffensive, mais psychiquement asservissante [...] À mon avis, dès que le rapport entre force mécanique et énergie métabolique dépasse un seuil déterminable, le règne de la technocratie s'instaure. [...] Entre des hommes libres, des rapports sociaux productions vont à l'allure d'une bicyclette, et pas plus vite. »³

Les rêves de l'autonomie énergétique

Un cadre nécessaire

L'énergie en usage

C'est au sein de cette crise, de la prise de conscience de ce nouveau paradigme énergétique à construire, qu'architectes et ingénieurs se sont saisis de cette question pour les transposer à l'échelle du projet architectural et urbain. À des fins didactiques, et à l'échelle de l'architecture, j'écrivais en 2011 [21] :

¹ Premier scénario *négaWatt* en 2001 en France par exemple

² L'association *négaWatt* préfaçant d'ailleurs la version française du livre de Lovins.

³ Ivan Illich, *Energie et Equité, OC1, p385-391* cité par Olivier Rey, *Une question de taille*, p 43.

« Les concepteurs ont une responsabilité essentielle sur l'« inné énergétique » de notre paysage bâti. Pour le bâtiment en exploitation, nos ingénieurs sont évidemment de talentueux chasseurs pour économiser les kilowattheures de consommation. [...] »

En effet, l'architecture autonome en énergie serait d'abord excessivement efficace en usage et tout comme la toise de la sobriété pour une automobile¹, la profession a pour repère la demande énergétique annuelle rapportée à la surface². Il est toutefois utile de circonscrire cette vertu d'usage par selon plusieurs scénarios comprenant trois variables différentes : (i) l'efficacité énergétique rapportée à la surface (qui dépend aussi de l'implantation géographique de l'architecture) ; (ii) l'intensité d'usage, autrement dit l'emprise individuelle et enfin, (iii) l'intensité carbone de production de l'énergie calorifique. Le tableau ci-après (Fig. 306) exhibe alors l'ampleur de l'empreinte énergétique en usage : un rapport de à un à trente.



Fig. 306. Le scénario A conjugue tous les paramètres les plus faibles et l'empreinte énergie-climat est la plus faible. À l'inverse, le scénario F paye le plus lourd tribut en termes d'émissions annuelles rapportées à l'usage, du fait du mix carbone défavorable (exemple d'une chaleur par effet Joules et d'un mix électrique essentiellement charbon par exemple). Les scénarios G et H sont les plus intensifs énergétiquement, néanmoins le scénario G parvient à minorer son impact carbone en recourant à une solution peu émettrice.

Heartbreaking

Avant de présenter quelques architectures représentatives de ce temps V, de cette quête des libérations des énergies fossiles (Fig. 307), il est utile de relire l'article *Heartbreaking*, écrit par Sébastien Marot [22]. Il rappelle les trois types d'architecture de l'énergie, décrits par Fernandez-Galliano dans son ouvrage *El Fuego y la Memoria* [23] et il est certain que l'architecture du temps V coïncide fréquemment avec cette caricature résumée par Marot [22] :

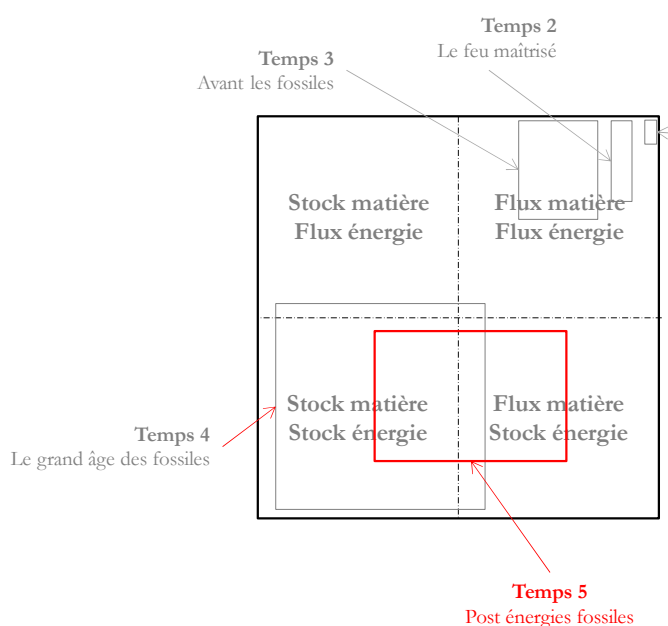
« La première qu'il associait à la première loi de la thermodynamique (celle de la conservation de l'énergie), et qu'il appelait héliotechnologie ou l'hélio-ingénierie, est essentiellement mécaniste et focalisée sur l'énergie de maintenance (celle

¹ Exprimée en consommation pour cent kilomètres.

² Et souvent exprimée en kWh_{EP} par m² et par an.

des processus abrités par le bâtiment). De loin la plus répandue parmi les architectes engagés dans les questions environnementales, elle envisage le bâtiment comme « une usine domestique de production énergétique », combinant toutes sortes de capteurs solaires, de turbines éoliennes ou de digesteurs de méthane, c'est-à-dire comme une machine. » [...] Pourtant, Fernandez-Galliano considèrerait les bâtiments à haute performance énergétique comme passibles de la même critique : « Obsédée qu'elle est à maximiser les gains, à minimiser les déperditions et à optimiser son bilan, ce type d'architecture est un exemple vivant de l'approche mécaniste, réductrice, unidirectionnelle et monofonctionnelle du projet »¹

Fig. 307. Le temps V où la tentative de migrer d'un monde gouverné par les stocks d'énergie à celui organisé autour des flux.



L'énergie de l'édification

Dans le livret [21], je poursuivais :

« Mais prenons un peu de recul pour estimer la quantité globale d'énergie sur laquelle les concepteurs et maîtres d'ouvrage agissent : les choix de parti de construction, la durée d'obsolescence des différentes parties du bâti, le coût énergétique de la déconstruction... L'enjeu est de taille : il ne s'agit ni plus ni moins que de diminuer l'intensité énergétique de tout acte de construction. [...] »

Dès lors, cette architecture du temps V, souhaitant se défaire des énergies fossiles, cherchant à minimiser ses besoins énergétiques tout au long de sa durée de vie, testant l'intégration d'énergies renouvelables dans sa morphologie, réclame assurément une vision globale pour tenter d'échapper aux critiques d'un Fernandez-Galliano [23]. Nous verrons qu'à

¹ Luis Fernandez-Galliano, *Fire and Memory: On Architecture and Energy* cité par Sébastien Marot, *Hearthbreaking*, Marnes #4, p452

l'échelle de la ville, cette prise de recul sera plus touffue, mais plus créative et décomplexée.

Une nouvelle induction

L'architecture du temps V se caractérise par un retournement des liens de dépendance du triptyque *énergie, matière, architecture*. L'énergie prend à nouveau le pouvoir sur l'architecture et indirectement sur la matière, un peu comme au moment du temps II (chapitre #7), lorsque le feu et sa bonne gestion commandait une partie de l'organisation des espaces. Par quelques exemples et par une ébauche typologique, nous entreverrons comment le souci de l'énergie exercera son influence sur les formes et les matières d'un certain nombre de productions architecturales, et ce, dès les années 1930. La causalité se résumera selon le chaînage :

$$\text{Energie} \rightarrow \text{Architecture} \rightarrow \text{Matière}$$

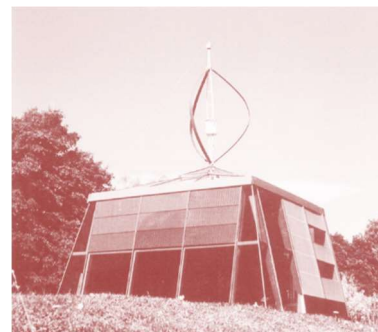
Quelques jalons architecturaux

Les mix renouvelables typiques

Dans ce qui suit, nous tenterons de décortiquer plusieurs stratégies, différentes réponses architecturales lorsque l'intention est clairement une démonstration de performances énergétiques. Aussi, ces petites utopies très locales d'autonomie posent toutes la nécessité d'autoproduction énergétique (Fig. 308). À ce titre, il est intéressant d'analyser les énergies renouvelables qui ont été intégrées aux différents projets. Certains projets parient sur un mix réduit et très local, permettant la redondance et le foisonnement de la production. Si l'on tentait de les classer selon une occurrence décroissante, une hiérarchie serait la suivante :

Solaire passif	chauffage et lumière
Solaire thermique	chauffage et eau chaude sanitaire
Solaire photovoltaïque	électricité (voir aussi chaleur)
Biomasse ¹	chaleur (voir parfois électricité)
Géothermie	besoins thermiques
Éolien	électricité ou énergie mécanique

Fig. 308. *La maison d'Alexander Pike et le foisonnement du solaire passif, du solaire thermique et de l'éolien.*



¹ Mais la production a lieu en général en dehors de l'emprise de l'architecture.

Fig. 309. *La première version de la Dymaxion House par Fuller, 1927*

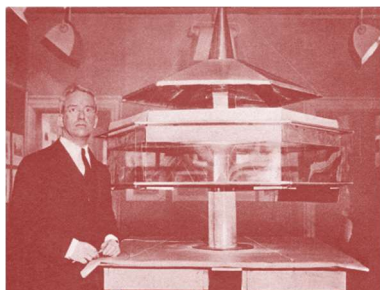


Fig. 310. *Recherches autour de la forme optimale en plan, en utilisant des algorithmes évolutionnaires sous Grasshopper, 2011.*

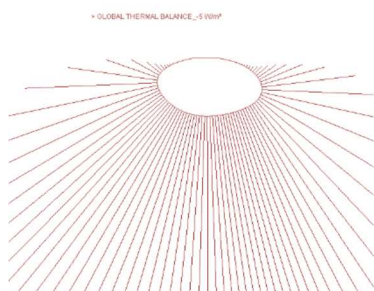


Fig. 311. *MIT Solar House IV, 1957.*



De la compacité d'abord

À l'échelle de la maison individuelle, l'architecture de la performance énergétique est souvent celle de la minimisation de l'interface avec l'extérieur, afin de réduire au minimum les pertes thermiques sur la totalité de l'enveloppe. Cette quête a conduit à la production d'archétypes comme les *zomes* de la contre-culture américaine [24] : une demi-sphère s'approche de la surface optimale du point de vue de la compacité [25]. La recherche de la minimisation absolue de la demande suppose aussi d'intégrer les pertes convectives, et d'aborder la forme architecturale du point de son aérodynamique comme la Maison *Dymaxion* par Buckminster Fuller (1930) [26] (Fig. 309).

En 2011, je conduisais quelques recherches autour de la forme optimale en plan : à une surface intérieure donnée, à une irradiation solaire déterminée en fonction des orientations, à une conductivité et une porosité solaire de l'enveloppe fixées, quelles est la forme optimisant le bilan d'énergie ? L'algorithme évolutionnaire cherchait les géométries des plans optimaux (Fig. 310)

Les bâtiments capteurs

En évoquant le solaire passif, nous avons d'ores et déjà parcouru quelques références de l'histoire de l'architecture, dans sa quête d'optimalité de production énergétique par ses percements (chapitre #15). Par le placement judicieux de ses baies, les constructions peuvent bénéficier des apports gratuits de la chaleur solaire, se protéger des irradiations estivales et optimiser la propagation de la lumière naturelle dans l'édifice. L'invention du vitrage isolant changea la donne et nous avons vu comme les frères Keck, dès 1933, créaient des premiers archétypes avec la *House of Tomorrow* [27]. Pour le solaire thermique, au-delà des essais d'intégration en toiture, ou sur les façades exposées (chapitre #11), il faut mentionner les constructions ayant intégré des volumes importants dédiés au stockage inter-saisonnier. Un premier exemple est la *MIT Solar House IV* à Lexington en 1957 (Fig. 311).

Les bâtiments héliotropes

Dans un registre tout aussi techniciste, et plusieurs décades en arrière, il existait déjà des prototypes de ce que nous pourrions appeler un *hyper-solaire passif*. Des architectures, en quête d'apports solaires maximum, suivent la course solaire, s'orientent comme des tournesols à l'instar des trackers du photovoltaïque (chapitre #13). En se tournant de façon perpendiculaire aux rayons du soleil, l'idée consiste à chercher constamment la plus grande puissance, comme un satellite spatial orientant continuellement ses panneaux solaires. Ces investigations ne sont pas si éloignées de celle d'un moulin à vent (#8), réclamant lui aussi d'être constamment orienté de façon optimale par rapport à la direction du vent. Dès 1930, et pour des objectifs sanitaires, le docteur Jean Saidman crée le solarium tournant à Aix-les-Bains (Fig. 313). Quelques années plus tard, Angelo Invernizzi donne vie à la Villa Girasole en 1935. De façon contemporaine, l'architecte Rolf Disch, le concepteur du quartier solaire à Vauban, positionne

sa maison *Heliotrop* sur les hauteurs du site. Sa maison, sorte de *showroom* technologique du solaire, conjugue la compacité cylindrique déjà mise à l'épreuve par les frères Keck dans les années 30 [27], avec des écrans en tubes sous vide et des panneaux photovoltaïques en toiture.

Les architectures transformées en piles énergétiques

Livrée en 2017 par l'agence Nicolas Michelin, la Maison de l'Île-de-France à la Cité Internationale Universitaire de Paris est un exemple récent. Pour l'approvisionnement en chaleur des 142 chambres d'étudiants, deux cuves de stockage d'eau chaude de 156 m³ sont incrustées dans la construction (Fig. 312). Placées derrière une calandre de capteurs solaires, ses piles thermiques permettent de bénéficier plus tardivement, à l'automne et en hiver, de la récolte énergétique de la façade sud-ouest. Au-delà de la démonstration, et du *genius loci* de l'exposition sans masque du fait du dégagement du périphérique parisien, cette réponse architecturale questionne et l'on pourrait en particulier regretter une carrosserie imposante, massive qui ne permettent pas davantage de donner à voir le savant dispositif solaire.

Les rêves de déconnexion

La contre-culture américaine des années 1960-70 est aussi une épopée de l'autonomie énergétique. Dans l'ouest américain, une poignée de néopionniers, de inventeurs-hippies conçoivent et bricolent des prototypes *low tech* avec l'autosuffisance en point de mire. L'un des représentants importants de ce mouvement, l'architecte Steve Baer produira quelques architectures intéressantes, dépassant le sympathique bricolage du zome construit selon les méthodes du *Whole Earth Catalogue* [24]. Pour l'un de ses maisons, Baer a composé sans doute l'un des systèmes solaires les plus efficaces pour fabriquer de la basse chaleur à haut rendement, tout en permettant un stockage diurne : un volet isolant la nuit mais aluminisé pour réfléchir l'ensoleillement et augmenter ainsi la pénétration solaire par la baie (Fig. 287, chapitre #15).

Fig. 313. *Solarium tournant à Aix-les-Bains*



Fig. 312. *Les bâtiments capteurs la Maison de l'Île-de-France à la Cité Internationale Universitaire de Paris, livrée en 2017 par l'agence Nicolas Michelin avec ses cuves de stockage inter-saisonnier.*



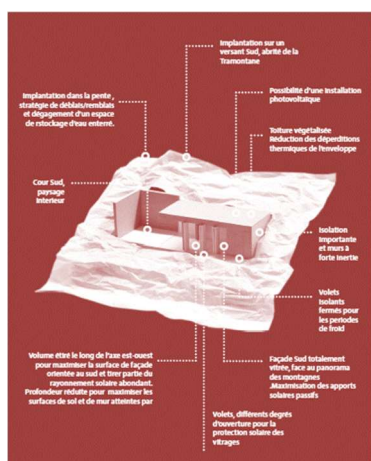
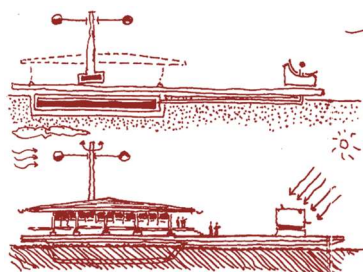
Fig. 314. *Un exemple de Diogène*

Fig. 315. *Croquis personnels pour une maison autonome, disposant d'une éolienne à axe vertical et un dispositif de concentration solaire (sur la droite du dessin). Le tout repose sur un « radeau de chaleur », avec une cuve tiède en sous-face de l'architecture légère. L'éolien à axe vertical génère directement de la chaleur par friction hydraulique.*



Derrière la vitre, des étagères comportent des bidons d'eau. L'eau possède en effet une inertie thermique volumique redoutable, bien supérieure à celle de la pierre et du béton. Ce sont les *Drum Wall* de Steve Baer. La nuit, le volet est fermé pour augmenter l'isolation du zome, les batteries d'eau tiède délivrent alors leur douce volupté thermique. Fanny Lopez dans *le rêve d'une déconnexion* détaille les productions de cette période et s'attache sur la maison d'Alexander Pike [28].

Les micro-déconnexions pédagogiques : Diogènes

Ces recherches d'autonomie énergétique ont aussi donné lieu à des expérimentations pédagogiques. En premier lieu, les *Diogènes*, au cours de quatre promotions du *DPEA Architecture post carbone* de 2011 à 2016. L'exercice avait pour objet la définition d'une architecture de petite dimension (Fig. 314), modeste mais précise, mise en forme spécifiquement pour une combinaison unique de lieu et d'usage. Cette organisation avait ici pour objectif, au-delà des vertus classiques et incontournable de l'architecture, de réduire radicalement l'empreinte énergétique du projet. Les étudiants devaient s'intéresser autant à la consommation énergétique nécessaire à l'établissement d'un climat favorable au sein d'une géographie spécifique qu'au contenu énergétique des matériaux et produits mis en œuvre. L'exercice permettait donc d'imaginer puis de dessiner et enfin de valider numériquement comment médiation climatique, frugalité énergétique et nécessités physiques de la construction¹ peuvent interagir pour alimenter la forme et l'usage du projet.

Le mur Trombe-Michel

La particularité des architectures du temps V est qu'elles épousent souvent le raffinement de la machine. Tant les édifices héliotropes, que ceux transformés en silos de chaleur, les constructions de l'autonomie énergétique sont des prétextes à inventions, soit parce que l'architecture courante doit intégrer un greffon énergétique, soit parce que l'édifice est une démonstration énergétique. L'histoire du mur Trombe-Michel et ces prototypes architecturaux appartiennent à la première catégorie. Ce dispositif, mis au point par l'architecte Jacques Michel et de Félix Trombe, se situe à mi-chemin entre le solaire passif et le solaire thermique. Le mur Trombe-Michel est d'abord une sorte de fausse fenêtre, une stratégie pour récupérer l'énergie solaire frappant une partie opaque de l'enveloppe d'une construction [29]. Cette « *shadow box active* » est une fenêtre qui ne dit pas son nom. Toutefois, en couplant à la fois l'inertie potentielle de la paroi opaque, tout en exploitant le tirage thermique dans la lame d'air entre l'élément de transparence et l'opacité, le mur Trombe produit un dispositif à la fois conductif, convectif et rayonnant. Et cette complexité thermique l'apparente davantage à un dispositif de type « solaire thermique ».

¹ Propriétés physiques des matériaux, gammes des opérations et transformations possibles avec ces matériaux, économie de moyens, ...

La maison « Tricaud » et le mur Trombe-Michel

Située non loin du four solaire d'Odeillo dans les Pyrénées Orientales, la Maison Tricaud (Fig. 316) est l'exemple d'une construction exploitant le mur Trombe-Michel. Sur place, un poster¹ résumait les consommations énergétiques associées au maintien d'une température de 18°C : une autonomie mesurée et assurée à 69% par l'énergie solaire², 28% grâce au bois (8300kWh) et 3% par l'électricité (1038kWh)

« Construite en 1978, c'est l'exemple le plus achevé de l'architecture solaire thermique. Elle associe des murs verticaux et des murs inclinés, qui combinent les principes du mur Trombe et du chauffe-eau solaire. Orientés à 15 degrés à l'Ouest et inclinés à 70 degrés par rapport à l'horizontale pour capter un maximum d'énergie. Ils sont conçus comme des murs Trombe et contiennent un absorbeur de chauffe-eau solaire dans la lame d'air, sous le vitrage. Contrairement aux chauffe-eaux classiques, c'est directement l'eau de consommation qui circule dans des tuyaux noirs de section rectangulaire, fixés sur une plaque en cuivre noir. L'ensemble est posé sur un mur noir de 40cm d'épaisseur. L'inertie du mur permet de maintenir hors-gel l'eau qui est dans l'absorbeur. Dans cette maison, l'utilisation du solaire peut couvrir jusqu'à 70% des besoins annuels en chauffage et en eau chaude. » « En 1974 et 1975, Félix Trombe et deux de ses collègues font construire, à titre privé, un immeuble solaire comportant trois habitations indépendantes. Cet immeuble représente la 3ème génération de maisons solaires. À chaque habitation sa couleur, les murs Trombe sont peints en vert, bleu ou brun sombre. La contribution du solaire au chauffage est de 49%. »

Fig. 316. La maison Tricaud avec ses murs Trombe-Michel.



Le chronogramme typique d'une maison à énergie positive

Hypothèse : le high-tech solaire contemporain

J'ai été marqué par ces premières visites des références européennes, des jalons de l'architecture de l'énergie en ce début de 21^{ème} siècle : BedZED³ en banlieue de Londres, à Sutton, un îlot résidentiel de 82 logements, conçu par l'architecte Bill Dunster, livré en 2002 et visité en 2004 (Fig. 317) ; le célèbre quartier Vauban à Freiburg-im-Brigsau, en Allemagne et notamment son *Solar Quartier*, conçu par l'architecte Rolf Disch, vu une première fois en 2005 ou 2006, avant d'y retourner avec les étudiants du DPEA en 2015. De façon exagérée, le point commun à ses deux références distantes d'un bon millier de kilomètres pourrait se résumer à des maisons en bande, des tracés viaires selon l'axe est-ouest afin d'offrir un prospect solaire équivalent à tous les logements ; des formes construites excessivement simples, fortement isolées par l'extérieur et disposant d'une

Fig. 317. Le quartier BedZED dans le banlieue de Londres, au Royaume-Uni.



¹ Présenté dans la petite exposition hébergée dans le bâtiment principal de la centrale d'Odeillo.

² 20496kWh sur l'année

³ Pour Beddington Zero Energy (fossil) Development. Le projet couvre 1,7 hectare. Il comprend 2 500 m² de bureaux et de commerces, un espace communautaire, une salle de spectacles, des espaces verts publics et privés, un centre médicosocial, un complexe sportif, une crèche, un café, un restaurant ainsi qu'une unité de cogénération.

toiture largement couverte de panneaux solaires. Ces références construisent les bases de l'imaginaire de la maison à énergie positive : une *passivhaus*, additionnée d'un toit solaire et souvent techniquement sophistiquée.

Flux d'énergies

Le graphique ci-dessous (Fig. 318) illustre un signal temporel possible, un scénario envisageable de la demande d'énergie d'une maison à énergie positive depuis sa naissance et pendant ces premiers temps de vie. Sur la partie gauche de la courbe, l'édification rend l'architecture *débitrice* ; une fois en usage, la maison produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme : cela correspond à la première séquence du graphique au-dessus de l'axe des temps. A demi-vie, une nouvelle dette, un fossé de dépenses d'énergie grise liées à la rénovation avant de repartir avec un flux de production positif.

Fig. 318. *Chronogramme typique d'une maison à énergie positive (temps V) : la dette d'énergie grise sera-t-elle remboursée à terme par un surplus de production transmis à d'autres ?*

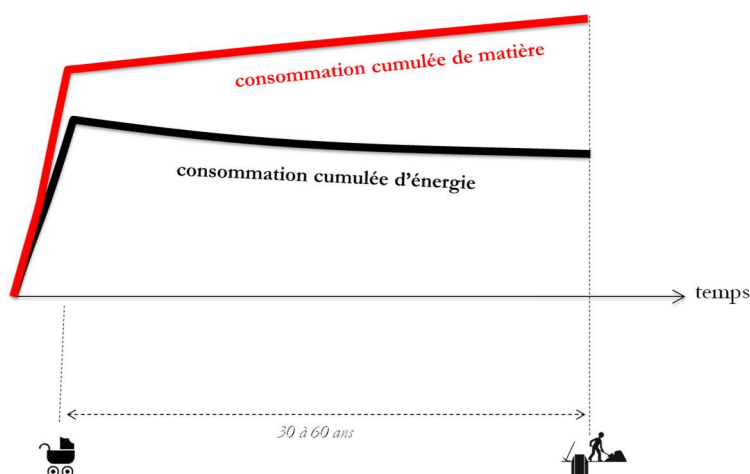
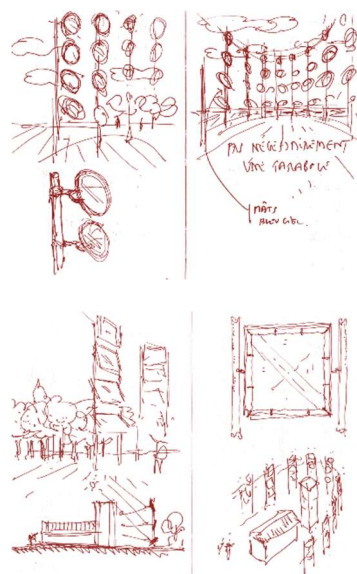


Fig. 319. *Recherches personnelles de micro-architectures autonomes en chaleur grâce à des dispositifs légers de concentration solaire qui convergeraient sur une petite pile thermique, bouillotte du logis constitué de réserve d'eau*



Dettes de matière

En 2014, pour le catalogue de l'exposition *Matière Grise*, ce paragraphe avait pour ambition de semer un doute sur la vertu supposée d'un bâtiment hautement efficace du point de vue énergétique [30] :

« Aujourd'hui, comment repère-t-on un bâtiment « durable » ? On scrute d'abord sa performance énergétique... en omettant l'ensemble des externalités engendrées par l'acte même de construction. Mais quel est réellement le surcoût écologique lié à la complexité constructive permettant a priori l'efficacité en usage ? Dans l'industrie automobile, une voiture hybride est certes plus sobre à l'usage, mais mesure-t-on l'impact d'une plus grande complexité constructive ? C'est invisible pour le conducteur, mais le constructeur automobile (et sa cascade de sous-traitants) voit sans doute, lui, sa facture énergétique augmenter. En architecture, les concepteurs sont volontiers friands des derniers vitrages ultrasophistiqués ou des technologies d'enveloppe, vendant une efficacité redoutable, digne de l'anorak que portait Jean-Louis Étienne pour une expédition polaire. Dans le cas d'un

bâtiment extrêmement performant, si l'on ne prête pas attention à sa « surconstruction », cela peut assurément conduire à un bilan global négatif. Le risque : chercher à trop désabiller Pierre Usage pour finalement survétir Paul Construit... Avec une dette certaine : le bâtiment plus performant peut faire payer d'emblée sa vertu. »

Temps de retour et bilan énergie-matière de l'architecture-énergie

En synthèse, le bilan énergie-matière d'une maison dite à énergie positive pourrait être tel que figuré ci-contre : un bâtiment coutant cher en matière et ne parvenant finalement pas à rembourser la dette de son énergie grise au cours de sa « vie positive » (Fig. 318). Plus tard, nous reviendrons sur la généralisation du dilemme avec comme exemple la *Dymaxion Car* de Buckminster Fuller (chapitre #20) : une belle carrosserie profilée en goutte d'eau pour améliorer l'aérodynamisme et donc l'efficacité énergétique, mais sans doute au prix d'un coût constructif plus important (Fig. 320). La vraie question est donc cette pente moyenne sur la durée de vie avec en ligne de mire : l'architecture *super-positive* : le bâtiment génère non seulement toute l'énergie dont il a besoin pendant sa durée d'exploitation mais il rembourse également la totalité de sa dette constructive¹ (chapitre #13).

Un manifeste matériautique

Dans le récit prospectif associé au projet de la *Fabrique de la Renaissance* [1], cet extrait posait le dilemme énergie-matière du bâtiment à énergie positive (Fig. 321) :

« Dès 2010, certaines démarches avant-gardistes (comme la Société à 2000W en Suisse) interpellaient sur la question constructive en mettant en garde sur la finitude des ressources. Quelle énergie grise ? Quel carbone gris ? Quelle permanence constructive ? Le BEPOS² ne traitait pas ces questions-là : il auscultait uniquement la performance énergétique en exploitation. Il y avait urgence à porter un regard total sur le cycle de vie de la chose construite pour éviter les contresens de choix de parti. Mais il fallait absolument anticiper la pénurie programmée de la plupart des matières primaires, situé en amont du flux de construction. Le sable commençait à manquer, idem pour le cuivre. Enfin, on comprenait aussi que le BEPOS était l'expression de cette « mise à distance », de cette abstraction de la performance technologique : à l'instar du smartphone de 2015, l'utilisateur n'avait aucune compréhension des mécanismes techniques intérieurs qui étaient à l'œuvre. Quel habitant comprenait (voire même connaissait) l'existence d'une ventilation double-flux dans son logis ? À quoi pouvait-bien servir cette boîte électronique nommée onduleur et qui semblait connecté aux panneaux solaires de ma toiture ? Il y avait une crise culturelle et citoyenne de technologies devenues « autistes » ; il fallait dorénavant que les technologies expriment leur fonctionnement, qu'elles soient ontologiquement pédagogiques et qu'elles soient surtout plus simples, plus appropriables et donc plus facilement réparables. Ce

Fig. 320. *Dymaxion Car*

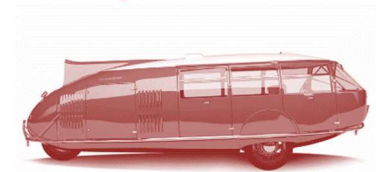


Fig. 321. *La Fabrique de la Renaissance*, dessin Diane Berg



¹ Comme le font maintenant les panneaux photovoltaïques selon une analyse de cycle énergétique : ils ont la capacité de générer dix descendants au moins (chapitre #13).

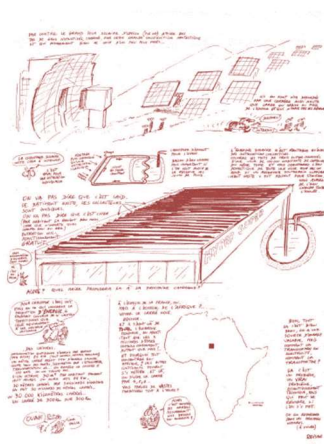
² Pour bâtiment à énergie positive.

n'était plus l'âge des high tech, ni l'ère promise par certains des low tech, mais celui des soft tech. Et pour finir sur l'avènement du post-BEPOS, le bâtiment ou l'îlot à énergie positive ne proposait pas de réponses sur le stock construit. Comment fallait-il s'y prendre pour faire évoluer rapidement les existants ? Mais la crise matériautique et la pensée des soft tech rappelaient aussi leur vertu : les exutoires générés par leur construction avaient déjà été largement amortis. Aussi ils offraient un gisement inespéré de matériaux, de géométries, d'agglomérats qui finissaient par rendre l'architecture semblable à un exercice littéraire à contrainte. Clin d'œil à l'Oulipo, naissait ainsi l'Ourchipo [...], ouvrir à architecture potentielle ».

L'urbanisme solaire et énergétique

Bouillonnement créatif et utopies solaires : le GIAP

Fig. 322. *Dessin de Reiser [31]*



Une hypothèse. L'urbanisme de l'énergie ne serait-il pas plus créatif, plus exubérant que les références d'architectures à énergie positive, ces dernières souvent trop scolaires, trop aliénées dans la juxtaposition de composants techniques à haute efficacité ? La joyeuse troupe du GIAP¹, rassemblant Maurice Touchais, Michel Ragon, Jean-Marc Reiser [31], Jean Noel Conan et Guy Rottier [32] produira certainement des images et des textes bien plus pimpants, hédonistes et jouissifs que les sages recherches de maisons trop bien élevées énergétiquement (Fig. 322). Il faut voir les propositions d'*Ecopolis* présentée à 1973 à l'Unesco à Paris lors du congrès international « *Le soleil au Service de l'homme* », ce manifeste d'urbanisme solaire, celui d'« une ville sans pollution » selon les termes des concepteurs.

La production plus que l'efficacité

Avec Reiser, l'esprit grivois des *Hara-Kiri Hebdo*, de *Charlie Hebdo*, de *La gueule ouvert* est marié avec le récit, l'imaginaire d'une écologie joyeuse et libérée [31]. Guy Rottier, niçois, chante le soleil [32]. Il raconte, il peint des odes à un dieu Soleil anarchiste. Ingénieur et architecte, il dessine et dimensionne des systèmes solaires savants aptes à conduire la lumière dans les profondeurs des villes (les lumiducs) tout en chantant l'architecture de loisirs, celles des caravanes-hélicoptères avec des réacteurs en bout de pales, et peint le bronzage des corps féminins.

En écrivant sa chanson, *Héliopolis* (2014), Florent Marchet avait sans doute été inspiré par l'œuvre de Rottier. Il faut parcourir la somme *Reiser, l'écologie* (2010) [31] pour découvrir un festival d'inventions, de bricolages truculents autour de l'énergie et du soleil. Ces architectures sont pour la plupart de papier (Rottier n'aura construit que trois édifices). Comme le relève Hubert Lempereur dans son histoire de l'isolation [33], Reiser (mais aussi Rottier) ne traite pas de l'isolation et ses propositions sont principalement orientées vers la production.

¹ Le groupement international d'architecture prospective.

Rêves de récoltes énergétiques urbaines

En Europe, dans les années 1970, les mouvements politiques écologistes balbutiant ont besoin de véhiculer de nouveaux imaginaires urbains. Par-delà le retour à la campagne, la vision urbaine est politique, elle est l'une des vitrines pour s'adresser à des électeurs devenus majoritairement urbains. En 1974, l'affiche de campagne du premier candidat écologiste à l'élection présidentielle, René Dumont, met en scène un Paris dont les toits se transforment en serre horticole, les toits à la Mansart intègrent des panneaux solaires et des éoliennes : une sorte de *Réinventer Paris* avant l'heure (Fig. 323). Dans son blog *TransitCity*, François Bellanger rapprochait avec pertinence cette image avec celle proposée par l'équipe Rogers dans le cadre du *Grand Pari(s) de 2008 ou l'invention d'une métropole post-Kyoto*. On pourra aussi se reporter au chapitre dédié au solaire à concentration pour voir une inspiration similaire entre Jean Nouvel et les Alexandroff [34] dans le cadre de cette même consultation [35].

Urbanisme du vent

Existe-t-il un urbanisme du vent, des villes décidant de fonder leur récolte énergétique à partir du flux éolien ? Les exemples sont plutôt rares, Copenhague et son littoral seraient sans doute un exemple pertinent. Quelques visions futuristes proposent de transformer le fut des éoliennes et leur embase comme des lieux d'habitation ou d'activité. Des plans massifs touchent aussi parfois d'optimiser la ventilation naturelle ou le confort en fonction des vents dominants. Le chapitre consacré à l'énergie éolienne précise les contraintes et les potentielles (#8). Citons cependant les propositions poétiques de Susumu Shingu (Fig. 324), le génial sculpteur ayant œuvré notamment dans quelques réalisations de Renzo Piano dont l'aéroport du Kansai au Japon. Shingu avait d'ailleurs rêvé créer une ville du vent [36].

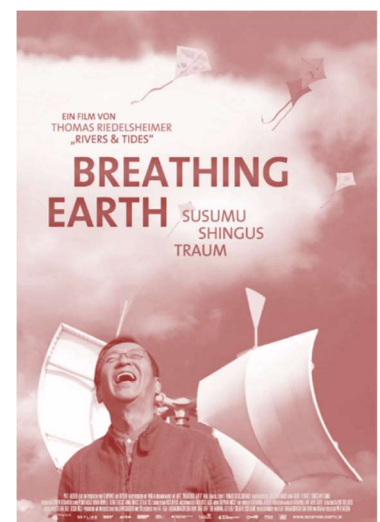
Le sage urbanisme énergétique contemporains et ses infrastructures

De façon plus courante (et nous dirons de façon plus scolaire), l'urbanisme énergétique s'appuie généralement sur les vertus supposées d'un réseau de chaleur ayant massivement recours aux énergies renouvelables. Quelques exemples intègrent du solaire thermique (chapitre #11) mais la plupart du temps, les chaufferies centralisées des écoquartiers¹ ont généralement recours au bois, mis en forme sous forme de pellets, ces granules conférant une certaine « liquidité » à la manipulation en continu du combustible. Le bois est renouvelable certes, mais le sujet de l'approvisionnement par camion peut être source de nuisances, comme aussi la filtration des émissions de particules fines. Du point de vue des « bassins versants énergétiques » [37] (chapitre #22), une centrale à biomasse récolte son énergie *en dehors* de l'écoquartier.

Fig. 323. Affiche pour la campagne présidentielle de René Dumont en 1974.



Fig. 324. Susumu Shingu.



¹ Vauban à Fribourg, Caserne de Bonne à Grenoble, B01 à Malmö ...

Fig. 325. Une ISU pour le Port de Saint-Malo. Une boucle énergétique par 169 et Elioth, 2017



Fig. 326. Un Popular Mechanics. Et les visions du futur.



Le bassin versant d'un écoquartier chauffé par le bois

Pour dimensionner cette question, pour imaginer le bassin versant énergétique invisible, imaginons un écoquartier avec une densité de 50 habitants à l'hectare et dont la surface d'emprise résidentielle serait de 40 m² par personne¹. En supposant ces logements hautement efficaces et qu'ils réclameraient par exemple 50kWh de chaleur par an², la densité de demande de chaleur serait alors de l'ordre d'un watt en moyenne par m² de sol urbain. Or, le flux de production de la biomasse³ est lui d'environ 0,1W par m². En conclusion, l'écoquartier, et uniquement pour ces besoins de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude, réclamerait une surface de récolte dix fois plus importante que sa taille ! Nous le verrons plus loin, mais nous touchons là les questions de densité critique (#22). L'urbanisme solaire post-années 1970 oublie parfois d'énoncer cet impact. Nous le révoquerons avec l'exemple de *La Renaissance des Fabriques* [1] et la question infrastructurelle associée aux ISU [38] (Fig. 325).

La technologie va-t-elle nous sauver ?

« L'humanité gémit, à demi écrasée sous le poids des progrès qu'elle a faits. »⁴

En route vers le eco-high-tech ?

Observons les visions du passé, leurs promesses d'émancipation grâce à la technologie. Le positivisme a toujours cours : certaines visions semblent se faire écho dans le temps, seuls les objets techniques évoluent. Les rêves d'autonomie énergétique appellent très fréquemment l'innovation technique à la rescousse. Un peu d'*ecotuning* dans cette image avec florès d'éoliennes à axe vertical de toute sorte, l'*Hyperloop* d'Elon Musk qu'on devine sortant de son tunnel, pleins de bidules dédiés aux énergies marines et puis un monorail suspendu comme nouvelle infrastructure de mobilité (Fig. 326)... Promesse du feu technique et de son pouvoir de libération et d'émancipation.

L'électrophilie du 21^{ème} siècle

Le *high tech*, l'ingénierie de haute volée semble aussi nous faire rêver à des lendemains meilleurs y compris dans le champ de la durabilité : la maison B10 de Werner Sobek (Fig. 328), le couplage entre la maison positive et la mobilité électrique [40], une *Smart* électrique trônant dans le salon. Un kit global ? Rappelons-nous les faux départs, comme la voiture électrique par exemple ; elle était pourtant prête dès les années 1990 mais le lobby politico-pétrolier en décidait autrement [39]. La course à la performance énergétique est aussi un marathon circulaire concourant au déclassement continu des existants et à l'accélération des mécanismes d'obsolescence.

¹ C'est alors 0,2 m² de logement par m² urbain.

² Soit environ six watts en moyenne par unité de surface.

³ Et donc du bassin versant de production.

⁴ Henri Bergson, *Les deux sources de la morale et de la religion*, p338 cité dans *Une question de taille*, p204

Une vision de symbiose

Il y a aussi parfois ses mises en perspective énergétique, renforçant la puissance prométhéenne de la technique. Je remémore cette pensée : je me trouve dans un TGV, lancé à pleine vitesse, traversant la plaine de la Beauce [41]. À vue, depuis mon wagon, un champ d'éoliennes et leurs rotors animés par le vent. À cet instant, un sentiment de symbiose technologique. La perception que le vent, capté par ses turbines éoliennes, permet mon transport à grande vitesse (Fig. 327). Venu de l'acier et du charbon, le chemin de fer deviendrait en quelque sorte « à voile », les wagons devenant virtuellement de gigantesques chars à voile par l'intermédiaire de la fée électrique et d'un système énergétique savant et renouvelable. Est-ce sensé ? Au démarrage, un TGV réclame 10MW de puissance.

Lancé à pleine vitesse, le flux appelé pour combattre la traînée aérodynamique et les frottements mécaniques est moindre. Une grande éolienne contemporaine produit 3MW lorsque le vent souffle à 40km/h¹. Ainsi, par-delà ces deux objets techniques, l'un et l'autre ne sont que les extrémités de la chaîne d'un transfert de puissance cinétique : chasser beaucoup de particules légères et peu rapides² pour transformer ce flot de puissance en une densité ramassée³ roulant à haute vitesse : 300km/h et une densité volumique sans doute voisine de l'unité. Nous passons notre existence à filtrer l'énergie, à la concentrer pour mieux la consommer. Comme pour la cuisine, nous passons notre vie à préparer l'énergie sous sa forme la plus efficace et la plus appétissante.

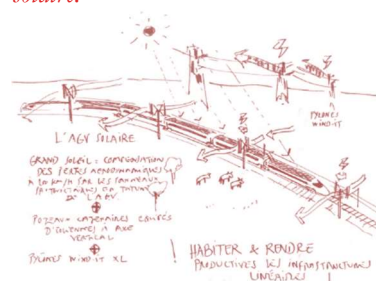
La croissance des renouvelables

Évidemment, bâtir, édifier ses infrastructures post-fossiles, cela représente un coût matière (les matières non renouvelables nécessaires pour les éléments de la génératrice d'une éolienne par exemple) et un coût énergétique (pour la fonte du silicium antérieure à la production de cellules solaires par exemple). Parmi les bonnes nouvelles de ce début millénaire, voyons comme une excellente coïncidence la compétitivité des énergies renouvelables, même si Bihoux alerte sur les besoins colossaux en métaux de la transition énergétique⁴ : « Les technologies requises pour limiter le réchauffement du climat feront grimper la demande de ressources naturelles. C'est, selon la Banque mondiale, un risque majeur pour l'environnement. ».

Fig. 328. La maison B10 de Sobek et sa voiture électrique associée.



Fig. 327. Le dessin dans AA400, « Un dessin vaut mieux qu'un grand discours » avec les éoliennes et le TGV solaire.



¹ À 50m de hauteur.

² L'air pèse à peine plus d'un kilo par m³

³ Le train et moi dedans

⁴ Muryel Jacque, Les Échos, 20 juillet 2017

Fig. 329. *Les tours jumelles à Manama*

Dans sa *Troisième Révolution Industrielle*, Jeremy Rifkin [42] anticipe même un coût de production nulle pour les renouvelables, un monde qui serait en route vers la *zero margin society*. Rifkin semble cependant oublier ses lectures de Georgescu-Roegen [43] alors qu'il rappelait lui-même lors d'une conférence qu'il donnait à HEC que du point de vue des matériaux, notre planète était un système fermé. Bihouix [44] répondrait sans doute qu'il faudrait des flux énergétiques gigantesques pour remettre de l'ordre dans le *Lego planétaire* des briques de matière dispersées sur la Terre !

Les miracles de la technique ?

Du côté d'Amory Lovins, on notera aussi une résolution de la transition énergétique, un passage vers un monde débarrassé des énergies fossiles, sans de soucis particuliers vis-à-vis des matériaux [3]. Par exemple, Lovins mise grandement sur les vertus des matériaux composites pour l'efficacité des automobiles. On retrouve chez Lovins [3] une appétence particulière pour une sorte *d'eco-high-tech* en résonance contemporaine avec un Elon Musk. Il cite aussi volontiers les exploits structurels de Michael Schlaich¹ en citant l'exploit de la division par huit ou par dix de la masse structurelle du stade Stuttgart « *en remplaçant la compression par la tension dans son travail de conception.* ». Pour l'architecture, les promesses de tours à énergie positive font parfois fleurir des éoliennes sur leur couronnement. Les tours jumelles à Manama au Bahreïn (Fig. 329) vont au bout de la démarche d'une certaine façon puisque la forme globale de l'édifice est complètement vers l'intégration efficace des trois éoliennes à axe horizontal. Le bilan de la production sera en revanche bien inférieur aux besoins de cette haute densité de forme.

Tensions avec l'architecture-matière

De façon plus modeste, les projets d'un Norman Foster (Fig. 330) ou d'un Thomas Herzog sont généralement orientés vers une recherche absolue de performances, comme si ces concepteurs profilaient un avion. Depuis de nombreuses années, la sympathique compétition internationale, le *SolarDecathlon*, donne parfois le sentiment de « placements de produits », d'une débauche d'artifices, comme des micro-salons des arts ménagers sensés présenter les pavillons de demain. Voilà la prochaine quête : veiller à la juste dimension de la matière, contrôler la dette énergétique liée à la construction et éviter les temps de retour qui peuvent parfois être infinis.

Fig. 330. *Le GLA par Norman Foster à Londres sur les rives de la Tamise.*

¹ On lui pardonnera l'erreur quant aux changements de prénom de Jörg en Michael, fils de Jörg.

Les dilemmes de l'architecture-énergie

Les plafonds de positivité

Densité morphologique maximale

Avant de conclure ce chapitre, en complément des mises en garde précédentes, il est important d'évoquer les limites physiques à l'autonomie énergétique et des densités morphologiques maximales (chapitre #22). Ce point rejoint celui soulevé dans le chapitre consacré aux constantes de l'architecture (#19). En 2008, je rappelais dans un article du catalogue de l'exposition *Architecture = durable* (Fig. 331) [45] :

« Il subsiste un étrange paradoxe quant au discours sur la densité : plus le tissu bâti est dilué, plus la surface offerte aux éléments – et particulièrement le soleil – est importante pour un mètre carré utile... Énonçons différemment le problème : imaginons une tour tertiaire installée dans la bande tropicale, où, pour simplifier, le flux solaire est principalement au zénith ; la récupération d'énergie renouvelable s'effectue alors nécessairement en toiture. Figurons-nous aussi une récupération très efficace de l'énergie solaire grâce à une toiture de type héliothermodynamique, avec une trigénération convertissant 25 % du flux en électricité, 25 % en froid et 25 % en chaud. Révons alors d'une capacité de stockage de ces différentes productions d'énergie. Dans la bande tropicale, le flux solaire annuel horizontal est de l'ordre de 2 000 kWh/m².an. Nous disposons donc d'une production de 500 kWh par mètre carré de toiture dans les conditions énoncées ci-dessus. Figurons-nous aussi que la tour est très sobre et que chaque mètre carré de plancher ne requiert que 25 kWh_{EF}/an pour chaque type d'énergie. [...] Nous voyons alors apparaître une limite théorique à l'autosuffisance énergétique du bâti qui, dans cette approche très optimiste, plafonne à une vingtaine d'étages au maximum ! L'éolien peut fournir un appoint mais cela suppose d'y dédier une très importante surface en élévation ; or, ajouter une dizaine d'étages aux vingt précédents implique d'augmenter encore la hauteur de la tour afin d'y loger des aérogénérateurs. »

Quelques mots sur les Infrastructures Solaires Urbaines

Comment bâtir des formes pérennes dont l'essentiel du mix énergétique -sur la totalité de leur cycle de vie- est issu des énergies renouvelables ? Dans une situation de demande énergétique intense, ce que sont les villes, il était donc aussi nécessaire de reposer la question des lieux résilients et efficaces pour faciliter nos récoltes en situation de densité. Voilà un extrait du manifeste des *Infrastructures Solaires Urbaines* (ISU) [37][38] (Fig. 332) :

« Avant, en ville, l'énergie venait du sol. Avant, c'était avant le gaz à tous les étages, avant la fée électricité dans toutes les pièces. Jadis, les combustibles de nos logis arrivaient depuis la rue. Ils fournissaient nos âtres, nos poêles, nos fourneaux et parfois nos éclairages. C'étaient le bois, le charbon, le pétrole à lampe. Une fois consommée, la chaleur fatale s'évacuait vers le ciel ; les toitures se devaient d'incorporer les échappements permettant la salubre évacuation de ces combustions. Aujourd'hui, nos canopées bâties conservent les traces de ces systèmes énergétiques. Paris et ses refends, ponctués par des conduits de cheminée en terre cuite. Le sol dictait la canopée urbaine. Le sol devait être

Fig. 331. Dessin pour illustrer le plafond de positivité. La densité morphologique impacte l'autonomie potentielle d'un bâtiment.

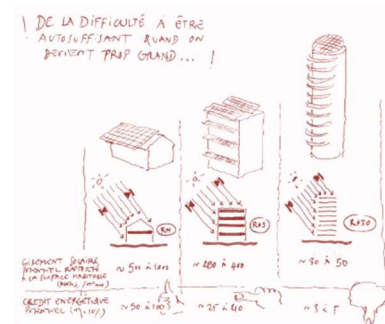
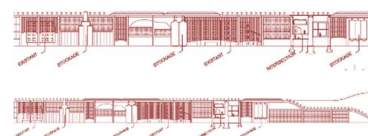


Fig. 332. Une ISU, infrastructure solaire urbaine.

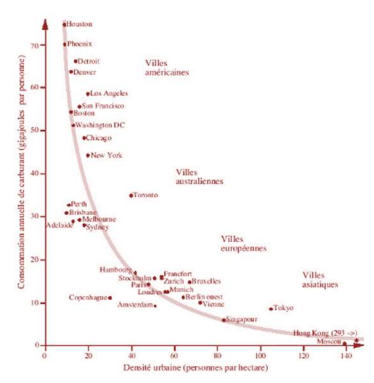


accessible et idéalement plat pour faciliter transport, logistique et livraison de combustibles qui venaient de l'extérieur de la cité. Quels usages subsistent ? Les feux de bois deviennent suspects. À la limite, les conduits non comblés participent à la ventilation naturelle en été. [...] »

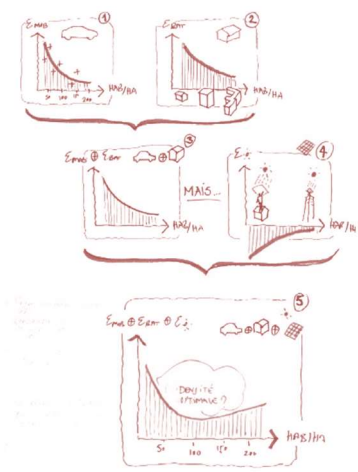
La densité en question

Autre densité, celle du contenu, de l'usage¹, parfois confondue avec la morphologie². Dans un article pour *L'Architecture d'aujourd'hui* [41], je résumais les conclusions de l'article *Dense cities in 2050, the energy option* (2011) et j'introduisais une controverse à l'idée que la densité urbaine serait la condition nécessaire de la vertu énergétique [46] (Fig. 333).

Fig. 333. Courbe de Newman et Kenworthy



Dessin pour AA [46]



« L'après-Newman et Kenworthy. En 1989, et après un travail de collecte de données de plus de dix ans, les chercheurs Newman et Kenworthy mettent en évidence la très forte corrélation entre densité urbaine et consommation annuelle de carburant par citoyen : plus la ville est lâche, plus la dépendance à l'automobile augmente (et en effet on peut montrer théoriquement qu'elle est à peu près proportionnelle à $d^{0,5}$). Aussi plus la ville est dense, plus le bâti est assez certainement compact et donc les consommations de chaleur plus faibles. Ainsi, il est facile de faire $1+2 = 3$ pour asseoir scientifiquement l'éco-superpouvoir de la ville dense. Mais attention : - à la spéculation foncière et à la perte de mixité sociale - à la perte du gisement d'autoproduction lorsque chaque citoyen peut être associé à une surface de captation de flux. Dans une étude en cours, je cherche à montrer que la densité raisonnée fournit peut-être l'optimum énergétique à venir, a fortiori lorsque la part de marché de la mobilité électrique aura dépassé la marginalité. De fait, le « catéchisme de la durabilité » peut avoir tendance à parer de vertus la ville dense et compacte, et donc d'une limitation de la demande énergétique selon des formes urbaines et des densités particulières. Sans doute pour deux raisons sous-jacentes. En premier lieu, la fameuse courbe des australiens Newman et Kenworthy qui montrait à la fin des années 80 la corrélation entre densité urbaine et demande énergétique associée à l'usage de l'automobile : l'habitant d'une zone peu dense était plus dépendant de son automobile et sa consommation annuelle de carburant était dès lors plus élevée que l'habitant d'une ville dense. »³

¹ Exprimée par exemple en habitants par hectare
² Exprimée par exemple en densité bâtie
³ Un petit dessin vaut mieux qu'un long discours

Et si les formes urbaines gouvernaient l'offre ?

Reforme

Les diagrammes (*d,e*) (pour densité-emprise, Fig. 334) établis dans *Reforme* (2014) [37] quantifiaient la densité de demande selon ces paramètres et circonscrivaient la portée de l'impact de la densité urbaine, selon le prolongement du papier *2050, the energy option* (2011) [46]. *Reforme* retournait aussi la question en interrogeant en contraposée l'effet de la forme urbaine sur la capacité d'un tissu à générer sa propre production d'énergies renouvelables.

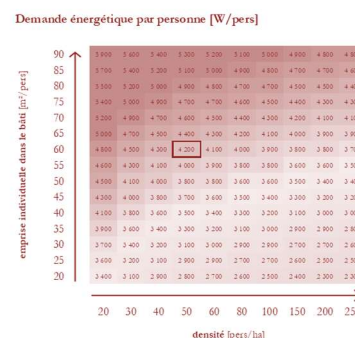
« À l'orée de la dernière partie de *Reforme*, nous interrogeons à présent la question de l'épiderme de récolte des territoires urbains. Dès lors, dans le déploiement de notre stratégie consistant à concentrer une partie de l'offre en paysage urbain, comment récolter efficacement sur une collection de toitures disparates, sans cohérence de taille et produisant des ombres réciproques ? Le soleil est en haut, l'agriculture se récolte à plat : champs de céréales, maraîchage, etc. Il est aisé de passer entre les sillons pour semer, récolter. Idem pour nos récoltes électriques : champs photovoltaïques, miroirs paraboliques des centrales à concentration... : il est facile de passer entre les panneaux pour l'entretien. [...] »

Le photovoltaïque déteste les masques partiels. Actualité récente, la publication du cadastre solaire¹ de Paris a révélé que le potentiel maximum de toitures solaires était de 300 000 à 400 000 m² : soit 0,3% de l'aire urbaine ! Rappelons-nous que le Grand Paris à 2000W réclamait-lui déjà au moins 5% de la surface... Toitures, pignons et refends de nos toits parisiens proposent une skyline pittoresque mais fabriquent une géométrie globale peu propice à la production énergétique. Ce chaos géométrique de l'épiderme urbain est un point de départ de nos réflexions sur les Infrastructures Solaires Urbaines. » [37]

Bruit géométrique, masques partiels et potentiel solaire

Pour corroborer ce dernier point, l'étude effectuée par Elioth [47] pour l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR) en 2015 illustrait la difficulté des tissus urbains traditionnels à optimiser la récolte solaire². La présentation de Nahid Mohajeri³ le 10 novembre 2015 au cours de l'atelier *2050 Sous le soleil exactement* corroborait cette synthèse. Aussi, lorsque le cadastre solaire de Paris a été produit en 2013, il avait été estimé que 3 à 4 % de la surface de toiture pouvait être équipée, soit 1,2 millions de m², l'objectif formulé à l'époque étant de 400 000 m². Un résultat de l'étude réalisée par Elioth pour l'APUR présentait elle, un potentiel deux fois plus grand, à 2,2 millions de m², soit 6 à 7 % des toits parisiens : cette proportion limitée restera la conséquence du « bruit géométrique » de nos canopées urbaines traditionnels.

Fig. 334. Un diagramme (*d,e*)



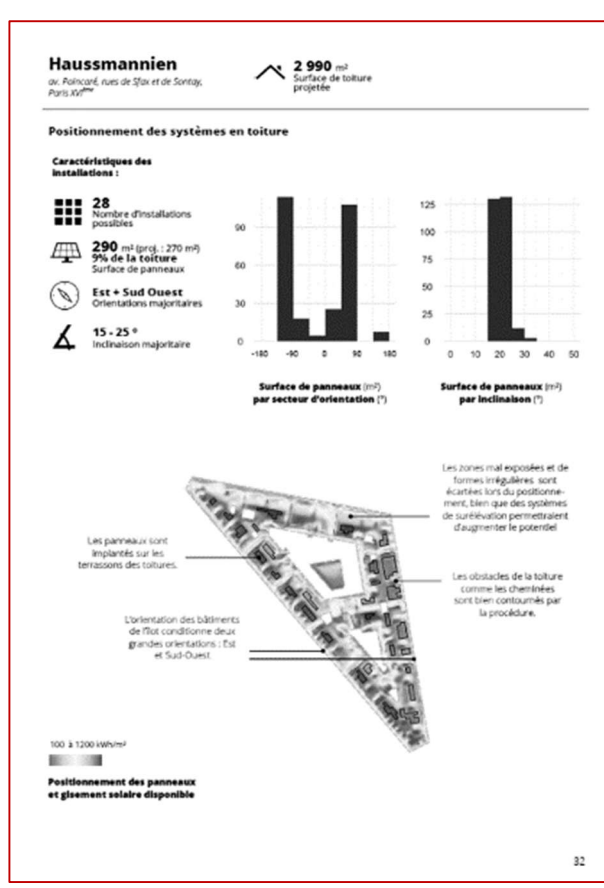
¹ Cadastre solaire de Paris mis en ligne par l'APUR.

² Cette dernière étant soit du *solaire thermique*, soit du *solaire photovoltaïque* dans le cadre de cette étude.

³ *Urban Density and Solar Energy*

« Dorénavant, la ville doit être résiliente pour assurer tout ou partie de ses besoins énergétiques. Produire ne serait-ce que le dixième des besoins, c'est sans doute la garantie de pouvoir assurer les fonctions vitales en cas de défaillance de la distribution d'énergie. Autoproduction et micro-réseaux sont nos indispensables garde-fous. Du fait de sa densité humaine, des besoins individuels stables ou croissants mais aussi de la raréfaction des combustibles externes, la ville se doit de produire localement une fraction de son énergie. Ne nous fions pas à la baisse très provisoire du prix des hydrocarbures : le 'contre-contre-choc' arrivera. Dans le futur, seules les énergies de flux (le soleil et ses dérivés, et dans une moindre mesure la géothermie) pourront assurer un approvisionnement pérenne. La ville doit alors faire descendre l'énergie directement depuis ses toits. Et, dans ce cas alors, le ciel impose la forme. Le soleil se capte à plat ; les cheminées empêchent cette nouvelle relation. La ville doit retourner sa forme : sa canopée doit dorénavant être homogène, douce et régulière pour faire entrer efficacement l'énergie vers l'intérieur. Les ISU commencent comme cela. »

Fig. 335. Extrait de l'étude pour l'APUR



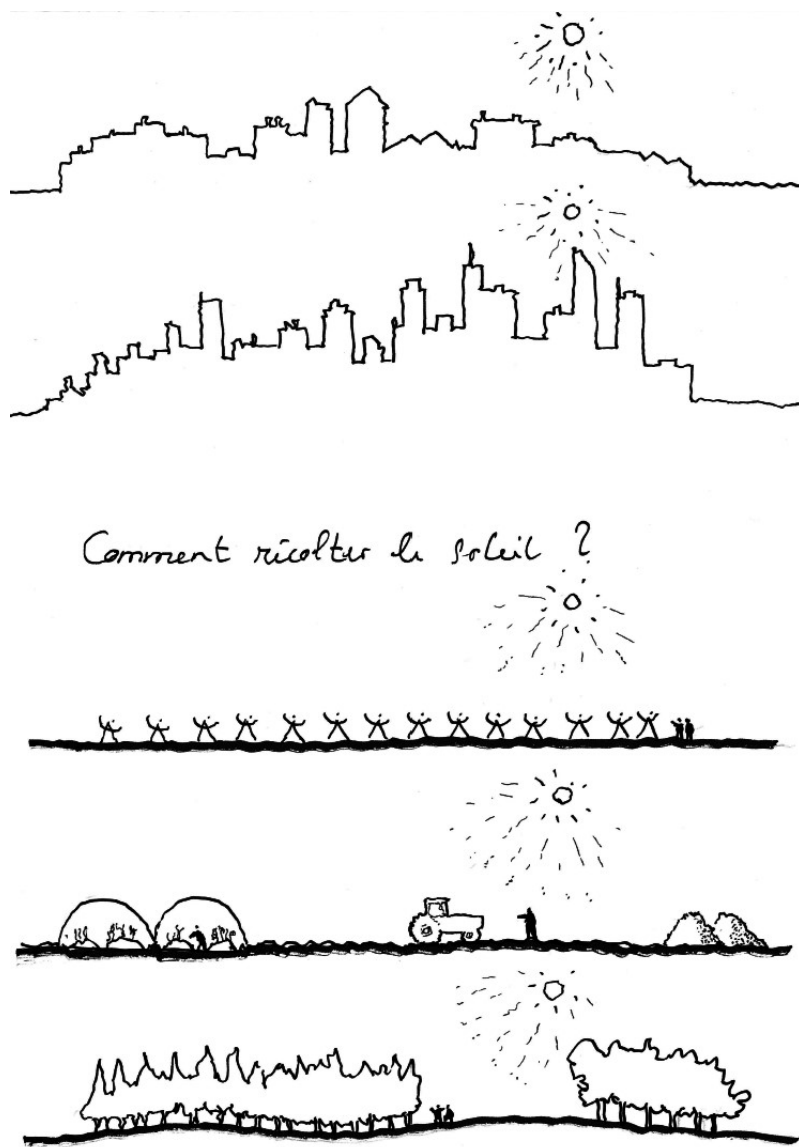
Bibliographie

1. MENARD Raphaël, *La Renaissance des Fabriques. Un monde possible en 2050*. 40p. Octobre 2015
2. HEIBERG Richard, FRIDLEY David, *Our Renewable Future, Laying the path for one hundred percent clean energy*, Island Press, 2016
3. LOVINS Amory B., *Réinventer le feu*, traduction de Agnès El Kaïm, éditions de l'échiquier, 2013. Titre original *Reinventing Fire*, 2011
4. MAC KAY David JC., *L'Énergie durable, pas que du vent*, Oxford, De Boeck, 2012. Titre original: *Sustainable Energy - Without the hot air*. Cambridge, UIT Cambridge, 2009
5. RIFKIN Jeremy, *La troisième révolution industrielle. Comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde*, Éditions Les Liens qui libèrent, 2012
6. SALOMON Thierry, JEDLICZKA Marc, Association Négawatts, *Changeons d'énergie, Transition, mode d'emploi*, Arles, Actes Sud, 2013.
7. SCHEER Herman, *L'autonomie énergétique, une nouvelle politique pour les énergies renouvelables*, Actes sud 2007
8. SERREAU Coline, *Solutions locales pour un désordre global*, documentaire, 2010
9. WINGERT Jean-Luc. *La vie après le pétrole, de la pénurie aux énergies nouvelles*. Paris, Éditions Autrement, Frontières, 2005
10. COCHET Yves, *Pétrole Apocalypse*, Fayard, 2005
11. AUZANNEAU Mathieu, *L'or noir, la grande histoire du pétrole*, La Découverte, 2015
12. HILLCOAT John, *The Road*, film d'anticipation post-apocalyptique américain réalisé tiré du roman du même nom écrit par Cormac McCarthy, 2009
13. BORASI Giovanna, ZARDINI Mirko, *Désolé plus d'essence. L'innovation architecturale en réponse à la crise pétrolière de 1973*, Centre Canadien d'Architecture, 2008
14. BONNEUIL Christophe, FRESSOZ Jean-Baptiste, *L'Événement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Seuil, 2013
15. MAC NEILL, John R., *Du nouveau sous le soleil. Une histoire de l'environnement mondial au 20^{ème} siècle*, Seyssel, Éditions Champ Vallon, 2010. Titre original *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*, 2000
16. SMIL Vaclav, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015
17. GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, *La décroissance, Entropie, écologie, économie* (1979), 2^{ème} édition,
18. MENARD Raphaël, *Le Classement, Mode d'Emploi*, Mémoire sur les organisations du savoir et les classifications bibliographiques, 67 pages, 2002
19. RODDIER François, *Thermodynamique de l'évolution, un essai de thermo-bio-sociologie*, Parole Éditions, 2012
20. PIANO Renzo, *La désobéissance de l'architecte*, Arléa, 2007

21. MENARD Raphaël et al., *Petit manuel pratique de transition énergétique pour le bâtiment et la ville, Convictions et solutions d'ingénieurs-concepteurs*, Egis, 96 p, 2013
22. MAROT Sébastien, « Hearthbreaking » dans le volume *Fireplace* du recueil *Elements of Architecture* (Marsilio, 2014) sous la direction de Rem Koolhaas
23. FERNÁNDEZ-GALIANO Luis, *Fire and Memory: On Architecture and Energy*, Cambridge (Mass.), The MIT Press, 2001
24. MANIAQUE Caroline. *Go West - Des architectes au pays de la contre-culture*, Parenthèses, Architectures, 2014
25. WRIGHT David, *Manuel d'architecture naturelle*, Parenthèses, Habitat / Ressources, 2015 (2004)
26. BUCKMINSTER R. Fuller, *Your private sky. The art of design science*, Lars Müller, 1999
27. DENZER Anthony, *The solar house. Pioneering sustainable design*, Rizzoli, 2013
28. LOPEZ Fanny. *Le Rêve d'une déconnexion. De la maison à la cité auto-énergétique*, La Villette, 2014
29. BOUET Paul, xxx
30. MENARD Raphaël, « Le pic de l'architecture », pp161-168, *Matière Grise*, Direction de l'ouvrage Encore Heureux, architectes, Edition et distribution exclusive, Pavillon de l'Arsenal, 2014
31. REISER, *L'écologie*, Glénat, 2010
32. WILLEMIN Véronique, *Guy Rottier, Architecte*, Éditions Alternatives, 2008
33. LEMPEREUR Hubert, « Histoire de l'isolation », feuilleton en sept épisodes, *d'Architecture*, 2017
34. ALEXEANDROFF Georges et Jeanne-Marie, *Architectures et Climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, Berger-Levrault, 1982
35. MENARD Raphaël, « Introduction au développement durable » (p134 à 139) et contributions dans le reste de l'ouvrage, *Naissances et renaissances de mille et un bonheur parisien*, J. Nouvel, JM Duthilleul et M Cantal-Dupart, Les éditions du Mont Boron, avril 2009, 638 pages.
36. RIEDELSHEIMER Thomas, *Breathing Earth, Susumu Shingus Traum*, documentaire, 2012
37. MENARD Raphaël et al., *Reforme, rapport final de recherche*, programme Ignis Mutat Res, 2014
38. MENARD Raphaël, « Les Infrastructures Solaires Urbaines », Dossier « Vers la ville symbiotique ? Valoriser les ressources cachées », *Tracés*, novembre 2013
39. PAINE Chris, *Who Killed the Electric Car?*, documentaire, 2006
40. ROBY François, *Vers la voiture sans pétrole ?* EDP Sciences, 2006
41. MENARD Raphaël, « Un Petit Dessin vaut mieux qu'un long discours » (p64 à 71), *Perspectives Durables, L'Architecture d'Aujourd'hui*, 2011
42. RIFKIN Jeremy, *La troisième révolution industrielle. Comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde*, Éditions Les Liens qui libèrent, 2012

-
43. GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, *La décroissance, Entropie, écologie, économie* (1979), 2ème édition,
 44. BIHOUIX Philippe, *L'âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable* Seuil, Anthropocène, 2014
 45. MENARD Raphaël, « Mutations des programmes » (p27 à 31), dans *Architecture = durable*, Catalogue de l'exposition du Pavillon de l'Arse-
nal, 2008
 46. MENARD Raphaël, *Dense Cities in 2050: The Energy Option ?*, Summer Study Proceedings, ECEEE, 2011
 47. ELIOTH, *Analyse de potentiel solaire. Toitures du Grand Paris*, étude réali-
sée pour l'APUR, 2015 [[lien de téléchargement](#)]

Fig. 336. *Comment récolter le soleil ?*



#17 L'architecture-matière (temps VI)

Le retour de bâton d'une architecture en quête d'autonomie : l'impact matière de la vertu énergétique. Les interrogations sur les énergies renouvelables et les matériaux qui les composent. Quelques références de géographies où la matière coûte chère. L'anticipation des pénuries de certains matériaux. Une typologie d'attitudes « post-matières fossiles ». Les jalons d'une déconstruction de l'architecture. Vers l'architecture soustractive.

Jalons :

- 1940 Apparition du bois lamellé collé*
- 1952 Début du verre structural Glasbau Hahn, Frankfurt am Main*
- 1960 Début de la contre-culture américaine*
- 1990 Apparition des films en ETFE*
- 1992 Création du Rural Studio*
- 2014 Exposition Matière Grise au Pavillon de l'Arsenal à Paris*

Énergies nouvelles :

- Éoliennes de très grande puissance (capacité supérieure à 3MW)*
- Panneaux photovoltaïques à haut rendement (au-delà de 15%)*
- Essais de fusion nucléaire contrôlée (tokamaks)*

Matières nouvelles :

- Bétons à haute performance*
- Bétons à ultra-haute performance*
- Matériaux composites et kevlar*
- Aciers à haute limite élastique*

Quelques références en architecture et en urbanisme :

- Paul Rudolphsky, Architecture without architects*
 - Hassan Fathy*
 - Samuel Mockbee, Rural Studio*
 - Gilles Perraudin*
 - Martin Rausch*
 - Simon Velez*
-

Fin de la matière : fin de l'architecture ?

L'autre crise de stock

Le sable, enquête sur une disparition

Sixième séquence : l'architecture-matière émergerait de la conscience de la rareté imminente de ses ingrédients [1]. Ultime balancier avant la contrainte du climat et du carbone¹ (chapitre #18), l'architecture redécouvre l'impératif de la qualité de ses composants comme point de départ conceptuel et constructif. Pour illustrer cette renaissance de la contrainte matière, le documentaire diffusé sur Arte en 2013, *Le sable, enquête sur une disparition* de Denis Delestrac [2] interpellait notre petite fabrique du monde, sa gourmandise insatiable et ses conséquences sur les ressources en sable, ce dernier étant un composant essentiel du matériau-phare de la Modernité, le béton (Fig. 337).

« On trouve [le sable] dans le béton, qui alimente, au rythme de deux tonnes par an et par être humain, un boom immobilier ininterrompu. Mais aussi dans les puces électroniques, le papier, le plastique, les peintures, les détergents, les cosmétiques... Ce sable que nous aimons fouler du pied ou laisser filer entre nos doigts s'est glissé à notre insu dans tous les interstices de notre quotidien. L'industrie le consomme en quantités croissantes, plus encore que le pétrole. Peut-être parce que, contrairement à l'or noir, cette matière première perçue comme inépuisable est restée à ce jour pratiquement gratuite. Alors que le sable des déserts est impropre à la construction, les groupes du bâtiment ont longtemps exploité les rivières et les carrières. Puis ils se sont tournés vers la mer, provoquant ce qui est en train de devenir une véritable bombe écologique. [...] »

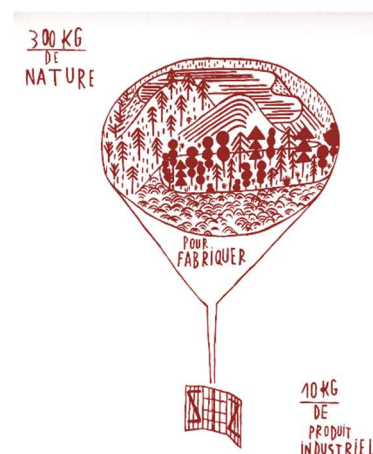
Les pics des matériaux

Bien entendu, le monde avait déjà connu des tensions sur les matériaux, le bois par exemple au cours des siècles antérieurs (chapitre #9). Ce dernier est une matière renouvelable, dans la mesure où les forêts sont bien gérées, et que la ponction ne dépasse pas le flux de production de matières issus de la photosynthèse². Quoique la situation planétaire soit aujourd'hui plus complexe, notre siècle découvre désormais une crise des matières non renouvelables, une tension des *matières-stocks* et non des *matières-flux*. Cette crise globale ébranle l'architecture en profondeur, d'autant que comme nous l'avons déjà vu, notre planète est un système thermodynamique fermé pour les matériaux (chapitre #3). Le glanage de matières extra-terrestres n'est pas pour demain et il réclamerait d'ailleurs une énergie considérable.

Fig. 337. Carrières de sable près de Montereau à la confluence de la Seine et de l'Yonne en amont de Paris. Photo, Nicolas Ruehl



Fig. 338. Dessin Bonnefrite pour l'exposition Matière Grise par Encore Heureux



¹ Engendrée par la « pollution thermique » issue de la combustion des fossiles.

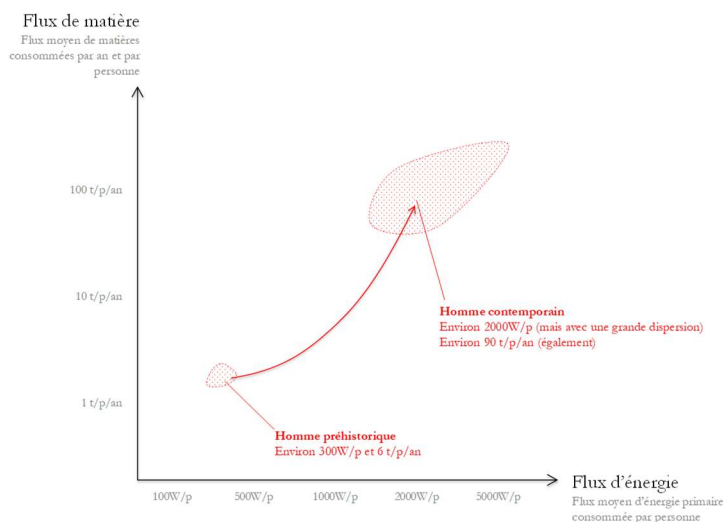
² Le flux maximal de production étant de l'ordre de 3 à 5 m³ par hectare et par an pour une forêt durablement gérée, valeurs à distinguer selon la nature des essences et des géographies. Pour une ponction supérieure, le stock est entamé.

Le chaînage

Cette crise de la matière, l'ingénieur Philippe Bihoux l'interroge dans ses ouvrages [1] et dans ses articles, souvent centrés autour de la « matière à payer » pour bâtir les infrastructures du futur. Il questionne l'utilisation de matières rares pour la fabrication d'éoliennes ou encore de certains panneaux photovoltaïques¹ : une conscience que l'énergie, ce flux permanent², serait moins un problème que la matière, un stock fini³. Ce sixième temps est celui où *la matière reprendrait le pouvoir*, où elle gouverne le choix architectural. Un rebond des temps I (chapitre #7) et III (#9).

Matière → Architecture (→ Énergie)

Fig. 339. *La grande mue énergie-matière de l'homme depuis 100 000 ans. Avec intégration des données des flux de matière tirés de Practical Handbook of Material Flow Analysis par Paul H. Brunner et Helmut Rechberger. La prise en compte de l'eau modifie substantiellement les masses précisées dans les graphiques suivants.*



¹ Les composants de matières rares sont en effet fortement différemment selon les technologies de panneaux photovoltaïques.

² À l'échelle de la vie astronomique du Soleil.

³ Voire en décroissance infinitésimale avec les réactions nucléaires !

Un problème de flux

Nos consommations de matières : 30 kilos par jour et par personne

« Sous couvert d'hygiène s'invente également une culture du jetable. La firme Kimberly Clark fournit l'armée américaine en bandages pendant la Première Guerre mondiale. En 1918, elle se retrouve avec des stocks de coton inutiles. Kotex, le premier tampon jetable, est inventé pour les écouler. L'emballage industriel est également popularisé par l'hygiène. »¹ [3]

Avant de préciser davantage la complexité des relations entre architecture et matière, une introduction globale et systémique rappellerait d'abord ceci : vu de l'usage final, nos modes de vie réclament l'extraction de trente kilos de matériaux par jour² et par individu [4]. Ce rythme de ponction sur nos stocks planétaires n'a jamais été aussi élevé, tant à l'échelle du terrien moyen, qu'évidemment à l'échelle globale, ce flux pro capita étant multiplié par près de huit milliards de personne : le m de la croissance de notre gourmandise d'énergie (Fig. 339). À l'extrémité des besoins, les scénarios fictifs d'usage d'artefacts immobiliers (logement, bureau), mobiliers (équipements domestiques) et automobiles illustrent l'extrême variété des flux de matières finales (Fig. 389). Exprimé en durée réelle d'utilisation, le flux de matière d'un logement pour un scénario 'bas' est cinquante fois plus faible que celui d'un scénario 'haut'. Notons aussi que selon cette métrique, une automobile pèse autant qu'un logement, facilement à hauteur d'une dizaine de kilos par personne et par jour équivalent d'utilisation.

La Grande Accélération des flux de matière

À échelle géographique, en 2004, l'Institut Français de l'Environnement avançait les chiffres suivants : 48 millions de tonnes de matières par an, rien que pour le bâtiment³ en France. Concernant le fret, Philippe Bihoux cite la valeur de 12 tonnes-km par jour et par Français [1]. C'est l'échelle du tourbillon de matières entourant chacun d'entre nous, l'équivalent de notre propre poids mis en orbite et qui parcourt 170 kilomètres par jour⁴ ; ou comme si virtuellement notre usage du monde mobilisait la même masse que celle de notre propre corps à une vitesse constante de 7km/h. Un jumeau de matière, en marche rapide permanente à nos côtés, une sorte de portrait d'Arcimboldo des fragments de choses (Fig. 340), le silage de nos vies, *night and day*.

Fig. 340. *L'homme-potager* par Giuseppe Arcimboldo (1527-1593)



¹ p187, *L'évènement Anthropocène*.

² 70 milliards de tonnes par an soit environ 10t par an en moyenne ou encore 30kg par jour et par personne.

³ Dont 3 millions pour neuf, 14 pour la réhabilitation et 31 démolitions.

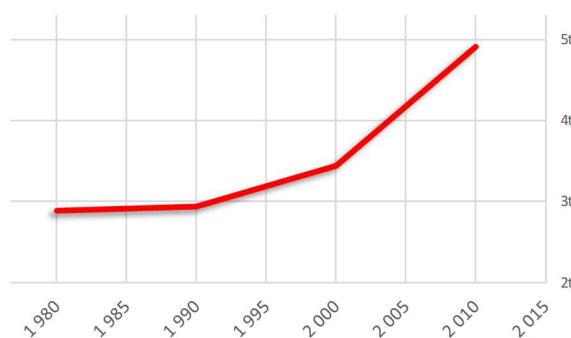
⁴ 12t.km correspond aussi au parcours d'une masse de 70kg sur 170km.

Une multiplication par quinze des flux

Dans *Practical Handbook of Material Flow Analysis* [4], Paul Brunner et Helmut Rechberger comparent la consommation de matière de l'homme préhistorique à celle de l'homme moderne, à plus de cent mille ans de distance : une mise en perspective entre le temps II (chapitre #7) et nos temps contemporains, cette concaténation des périodes IV.4 (#14) V (#16), VI (#17) et VII (#18). Il y a cent mille ans, les besoins de matière étaient de 6 tonnes par individu et par an (chapitre #7). Aujourd'hui, ils atteignent 86 tonnes, en intégrant dans ce décompte les combustibles fossiles et la biomasse dans le destin majoritaire consiste à rejoindre l'atmosphère sous forme gazeuse¹. En cent mille ans, les besoins de matière de l'espèce humaine ont donc été amplifiés d'un facteur quinze (Fig. 339).

Pour l'énergie, le facteur est analogue : le passage d'une demande métabolique de 100 watts à plus de 2000 watts pour un terrien moyen. Matière et énergie possèdent décidément des destins intimement liés.

Fig. 341. Valeurs extraites de *materialflows.net*, Université de Vienne (WU). Évolution de la masse mondiale d'extraction de minerais par an, flux d'extraction annuelle rapportée à la personne.



L'âge des matières fossiles

Si l'on soustrait de ce arithmétique les flux de combustibles², le diagramme ci-contre résume notre trajectoire de *matières nettes*, celles qui ne sont pas destinées directement à la combustion, à un passage fugace d'un état solide ou liquide à celui de gaz, très généralement recombinées avec l'oxygène atmosphérique pour former du dioxyde de carbone (Fig. 341). Brunner et Rechberger [4] détaillent ces besoins en indiquant les valeurs moyennes suivantes : dix tonnes par an pour habiter³, autant pour se déplacer⁴ et plus de cinq tonnes par an pour se nourrir, soit l'équivalent de quatorze kilos par jour avec la totalité des intrants de matière nécessaire en amont de nos besoins finaux.

¹ Principalement en CO₂, le dioxyde carbone et CH₄, le méthane.

² En considérant qu'ils sont déjà intégrés dans l'évaluation énergétique.

³ La construction des habitats et les besoins de matière pour le mobilier.

⁴ Comprenant à la fois les véhicules de transport, leur infrastructure et leurs matières énergétiques.

Des matières qui coûtent de plus en plus chères énergétiquement

Les conséquences de cette inflation sont doubles : elles entraînent une diminution des stocks primaires aisément accessibles¹ et elles génèrent des pollutions lors de la combustion des énergies fossiles par exemple ou pendant le scandale des boues rouges liées à l'exploitation des mines de bauxite² dans le Parc National des Calanques (2016) (Fig. 342). Le philosophe Dominique Bourg complète ce constat en rappelant que le coût écologique de la matière à extraire ne fera que s'accroître au cours des prochaines années :

« Nos économies industrielles ont fait une razzia sur les gisements terrestres de métaux au point d'épuiser toutes les réserves jusqu'à une profondeur de 100 mètres environ. Nous pouvons bien sûr creuser plus profondément, mais l'extraction de matières premières deviendra vite dispendieuse, en termes financiers comme énergétiques. Or les activités minières consomment déjà près de 10 % de l'énergie mondiale. »³

Le carbone induit par la matière

Sur le versant des exutoires, du fait de la mondialisation, une fraction importante des chaînes de transformation de la matière se situe hors des territoires de destination finale des matières. Les transferts d'énergie incorporée⁴ se repèrent alors davantage dans nos volumes de marchandises importées que dans le décompte de nos consommations énergétiques nationales. Au début des années 2000, en Suisse, le carbone gris⁵ représentait environ 5 tonnes annuelles d'équivalent CO₂ par citoyen (sur un total de 12 tonnes). En France, en 2015, les imports de carbone gris dépassaient les émissions nationales. Le constat est analogue sur l'énergie invisible que nous importons lorsque nous importons des flux de matières depuis l'étranger. L'induction est donc la suivante :

Matière (→ Énergie) → CO₂

Fig. 342. *Boues rouges associées à la production de bauxite, en amont de la production de l'aluminium. Usine d'Altéo, en pleine ville de Gardanne, au nord de Marseille, à l'origine des pollutions par boues rouges.*



¹ Comme par exemple les carrières de matériaux ou les gisements d'hydrocarbures

² Matière amont à la production d'aluminium

³ Dominique Bourg, interview dans le journal *Les Échos* par Paul Molga, « Une économie sera d'autant plus authentiquement circulaire que la croissance y sera faible », 18 novembre 2016, <http://bit.ly/2fmAlxe>

⁴ Ou d'énergie grise.

⁵ Les émissions de gaz à effet de serre qui ont été générés par la production de produits intermédiaires ou finis

Le grand éparpillement, entropie de la matière

La masse de la technosphère

Dans *Du nouveau sous le soleil* [5], John Mc Neill décrit plusieurs exemples des balafres et des ravages portés à la lithosphère¹ afin de puiser les matières que notre insatiable modernité dévore. Dans l'article *Scale and diversity of the physical technosphere : A geological perspective* [6], les auteurs estiment la masse totale de la technosphère à trente mille milliards de tonnes (Fig. 343). Cette valeur est à comparer aux trois cents millions de tonnes² de l'ensemble des humains : cinq ordres de grandeur d'écart. Selon la méthode des auteurs, chaque humain mobiliserait ainsi près de quatre mille tonnes, dont mille cinq cents tonnes consacrées aux seules aires urbaines.

Fig. 343. *Détail de la masse de la technosphère*

	Surface Mkm ²	Masse Tt
Aires urbaines	3,7	11,1
Habitat rural	4,2	6,3
Pâturage	33,5	5,0
Terres cultivées	16,7	3,8
Fonds marins explorés	15	2,3
Utilisation des sols et sols érodés	5,3	0,8
Routes rurales	0,5	0,4
Forêts plantées	2,7	0,3
Réservoirs	0,2	0,2
Chemins de fer	0,03	0,0
Total	81,8	30,1

Le grand bazar

Dans *L'âge des low-tech* [1], Philippe Bihoux relate cette « entropie de la matière », il décrit la dilution de l'organisation des ingrédients terrestres et des stocks disponibles. En extrayant massivement les minerais, en les triant, puis en les transformant (de façon parfois inefficace), en consommant fugacement les produits finis (et l'architecture en fait bien entendu partie), nous participons à cette gigantesque entreprise dilutive. Depuis le déchainement des énergies fossiles (chapitre #14), depuis l'accroissement incroyable du flux de transformation de la matière, l'humanité (et plus particulièrement les plus riches) a largement contribué au mélange des briques de notre « *Legó* planétaire ». Ce chaos ergodique coûterait sans doute une énergie incommensurable pour être remis en ordre. La matière a été déplacée, transformée, mélangée, éparpillée de façon massivement irréversible. La qualité du jeu *Legó* est par essence sa réversibilité : les briques peuvent être recomposées à l'infini. Mais la plupart de nos constructions ne le sont pas et l'architecture-matière interpelle cet enjeu comme nous l'avons le voir.

La dilution du construit

¹ La couche supérieure de l'écorce terrestre

² Soit un poids moyen de moins de 40kg par humain, reflet de la jeunesse de notre humanité.

La « matière pure », non disséminée ou non mélangée, comme dans un alliage métallique [1], se fait rare. Depuis deux cents ans, nous avons largement œuvré à l'accroissement de l'entropie de la matière. Le platine par exemple, ce métal rare, nécessaire en faible quantité dans le pot catalytique de nos automobiles, se disperse au fur et à mesure du kilométrage des voitures et recouvre à présent en concentration infinitésimale l'asphalte de nos routes [1].

Bihouix évoque également le cas du titane, ce blanchisseur courant contenu dans nos dentifrices et nos peintures. L'architecture, et plus généralement la construction, devraient contribuer à limiter ce mélange, en choisissant des composants constructifs simples et facilement décomposables. Les façades contemporaines proposent parfois des amoncellements incroyables de matériaux en tout genre : matériaux composites de certains bardages (l'*Alucobon* par exemple), isolant sophistiquée, matériaux à changement de phase, revêtement intérieur pluriel... Une coupe sur la fondation LVMH de Frank Gehry à Paris donnerait aussi le vertige (#14).

poids par humain	
t/cap	
Aires urbaines	1494
Habitat rural	848
Pâturage	676
Terres cultivées	506
Fonds marins explorés	303
Utilisation des sols et sols érodés	107
Routes rurales	50
Forêts plantées	36
Réservoirs	27
Chemins de fer	3
Total	4 050

Fig. 344. Valeurs rapportées en moyenne par humain

Le poids de l'architecture

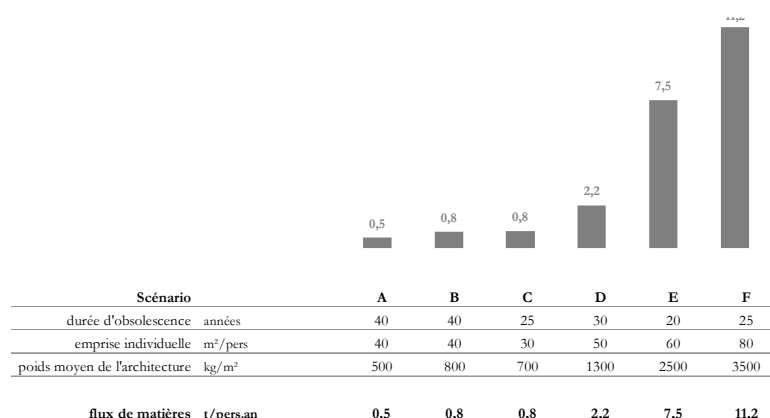
« Quelques économistes ont relevé que l'homme ne peut ni créer ni détruire de la matière ou de l'énergie, vérité qui découle du principe de conservation de la matière-énergie, autrement dit du premier principe de la thermodynamique. » [7]

Dix tonnes par an donc

En se référant à la valeur moyenne de Brunner et Rechberger [4], habiter réclamerait aujourd'hui dix tonnes par an et par individu. Sans s'en apercevoir, le « coût-matière » de l'architecture est ainsi de deux cents kilos de matière par semaine pour chacun de nous. Selon les niveaux de richesse et d'usage, cette valeur moyenne reflète une grandeur très variable. Afin de rendre compte de cette dispersion, le tableau ci-après teste sa sensibilité selon trois paramètres (Fig. 345) : la durée d'obsolescence du bâti, la surface d'emprise d'habité par personne et la densité massique du bâti, en kilogrammes par mètre-carré utile, autrement dit construit-on léger ou

lourd. L'intérêt de cette simulation est qu'elle met en relief la variabilité importante du flux de matière, un large spectre de l'« empreinte-matière de l'habité ». On constate un rapport d'un à vingt entre la valeur la plus basse et la plus élevée (0,5 tonne par personne et par an pour le scénario A contre 11,2 tonnes pour le scénario F). Il y aurait évidemment lieu de caractériser la nature du poids moyen et la relation éventuelle entre la masse et la durée d'obsolescence.

Fig. 345. Scénario de flux moyen d'amortissement en tonnes par personne et par an. Cette estimation de flux par personne ne prend pas en compte le flux complémentaire lié à l'augmentation du stock du fait de l'accroissement démographique global.



Cent tonnes de stock construit par Parisien

Lors de la soutenance de sa thèse en décembre 2017, Vincent Augiseau [8] annonçait que pour Paris, le stock construit¹ était de 109 tonnes par habitant. Avec une densité d'environ 200 habitants à l'hectare, le stock anthropique² est alors de plus de deux tonnes par unité de surface. La couche de matière anthropique serait donc un manteau d'au moins un mètre d'épaisseur sur la totalité du sol parisien³.

Un nécessaire changement de régime

L'analyse précédente ne distinguait pas le caractère renouvelable ou non de la matière consommée dans la taille de ces flux. Mais selon l'architecte Simon Velez, dont les recherches et le travail s'orientent autour du bambou, il y a en tout cas tout lieu de croire qu'il serait possible de largement réduire nos flux de demande de matière non renouvelable, grâce à un « nouveau régime dans l'assiette du concepteur », l'architecture devenant massivement flexitarienne⁴ [9] :

« L'architecture doit être un peu plus végétarienne. Il y a trop de béton et de minéraux dans l'industrie de la construction. Il faut penser comme un cuisinier.

¹ En comptant les bâtiments et les réseaux.

² Exprimé en densité surfacique sur les près de 100 km² du cadastre parisien.

³ Avec l'hypothèse d'une densité moyenne d'environ 2t par m³.

⁴ Le régime alimentaire flexitarienne réduit fortement la part carnée dans l'alimentation. L'étude *Paris change d'ère* mettait en valeur cette option pour participer à l'atténuation massive des émissions d'ici 2050.

Le repas ne peut pas être totalement végétarien ni complètement carnivore. Nous devons atteindre un équilibre entre les minéraux et les végétaux. En plus, nous devons impliquer davantage la campagne et l'agriculture dans l'industrie de la construction. »¹

Ébauche d'une stratégie bienveillante vis-à-vis de la matière

Et pour cela, l'architecte et l'habitant doivent agir simultanément sur trois leviers qui rappellent incidemment deux des trois piliers vitruviens : *firmitas* et *robustas* (chapitre #5). Construire légèrement, de façon pérenne avec une haute densité d'usage : voilà la clef pour réduire la ponction sur nos ressources de matières, le credo de l'architecture du temps VI.

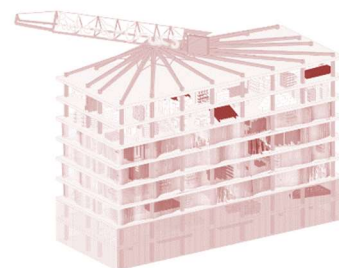
Dans *La Renaissance des Fabriques* [10], notre projet lauréat à Lille (#22), la *Ruche-à-Trucs* (Fig. 346) était la concrétisation de cette intention : « *L'ancienne tour ErDF reconvertie comme un « grenier à matériaux et à objets » est l'expression-même du souci de notre projet [...]. Révétons les vertus des existants, augmentons leur pérennité afin d'amortir sur une durée maximale, leur actif énergétique trop souvent détruit : l'énergie grise, la trace physique des transformations de la matière. Pourquoi s'évertuer à détruire une structure ? Pourquoi casser ce capital de matière organisée ? Les quelques 4000 mètres-carrés de surface plancher de l'ancienne tour ErDF représenteraient sans doute près d'un million de kilowattheures d'énergie s'ils devaient être reconstruit de façon contemporaine. Les émissions de CO₂ associées ? Sans doute près de 500 tonnes. En la coiffant d'une grue, en révélant l'ossature de la section carrée de ses poteaux en béton, nous lui refaisons une beauté. L'édifice apte à supporter des charges importantes est là. La structure fabriquant le fut d'une grande grue urbaine est déjà constituée. Un pagnon, détournement industriel, fabrique une simple protection aux intempéries des éléments entreposés. »*

Le BAM et la matière induite par l'architecture

Dans un article de *l'Architecture d' Aujourd'hui*², il était rappelé que la construction d'un mètre-carré de surface utile générerait l'équivalent de 1,73 m³ de gravats par m² utile. C'est le prix du plein à payer pour générer les qualités du vide d'une architecture. Nous ne respirerions qu'à peine dans cette piscine de « matières induites », la hauteur de gravats atteindrait 173 centimètres depuis le sol fini de chacun de nos mètres-carrés. À l'échelle des grandes infrastructures, la Société du Grand Paris indiquait que la construction du Grand Paris Express générerait en une dizaine d'années quelque 45 millions de tonnes de déblais³.

Cette externalité de matières, cet exutoire de la construction, si nous la rapportons à la masse des usages potentiels, les dix millions de Franciliens, ce flux est alors d'environ cinq tonnes par personne, l'équivalent de deux mètres-cube. Par foyer, c'est le volume de petite cave familiale qui serait remplie par la matière induite de ce projet hors d'échelle. À une autre

Fig. 346. *La Ruche-à-Trucs à Lille.*



¹ « *L'architecture végétarienne de Simón Vélez* », propos recueillis par Jean-Philippe #7Hugron dans *Le Courrier de l'architecte*, 26 février 2014. Cité dans *Matière Grise*, p87

² #372 sept-oct 2007

³ <https://www.societedugrandparis.fr/info/gestion-et-valorisation-des-deblais>

échelle et pour d'autres usages de mobilité, en 1990, la production d'une voiture d'une tonne générait environ 29 tonnes de déchets [11].

« BIM et BAM. Voyons déjà comment les concepteurs ont globalement échoué à se forger un retour d'expérience, une intuition de la performance d'usage. La complexité des modèles d'évaluation et de simulation, confiés à des ingénieurs dédiés, a déjà engendré une « mise à distance » pour jauger de la pertinence environnementale du coup de crayon. Aussi l'essor de la maquette numérique ne participe-t-il pas à aggraver cette mise à distance avec la matière concrète ? L'illusion de perfection numérique du BIM omet son double réel de la « matière livrée » : les déchets en amont de la commande finale. Nous attendons avec impatience l'émergence du BAM¹, la maquette numérique des déchets probables engendrés par le projet. [...] » [12]

D'où viennent les constituants de l'architecture ?

Une histoire des bassins versants matériautiques

Au temps I ou au temps II (chapitre #7), l'architecture se glanait comme les patates dans le documentaire d'Agnès Varda [13]. Nos aïeux partaient à la cueillette des matériaux pour constituer les ingrédients de leurs futurs abris. Les circuits d'approvisionnement étaient extrêmement courts, à l'échelle de la marche humaine, de l'ordre de quelques milliers de mètres. Plus tard, grâce à la roue, par les routes, par les embarcations, sur les fleuves et les mers, les composants de l'architecture ont commencé à franchir des centaines de kilomètres avant de rejoindre leur destination finale. Brouage, cette place forte de Charente-Maritime, garde la mémoire de son histoire singulière avec la Nouvelle France et le Québec. Certaines pierres des constructions sont issues d'Amérique du Nord, anciens lests des embarcations qui franchissaient l'Atlantique : un exemple de construction dont le « bassin versant de matières » s'est étendu à des milliers de kilomètres.

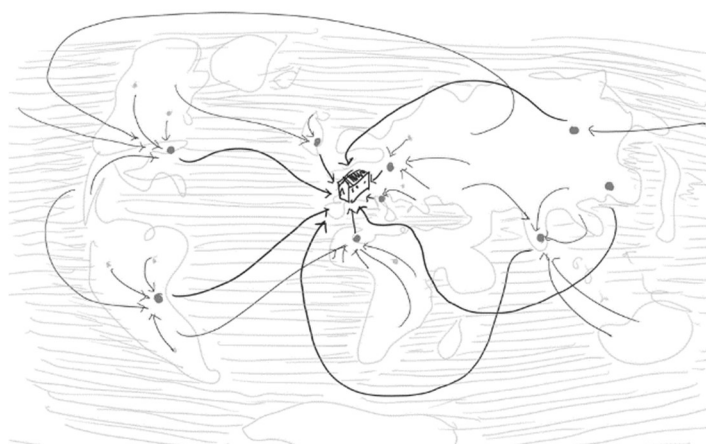


Fig. 347. *Croquis spéculatif sur l'origine géographique des composants de l'architecture.*

¹ Pour benne à mâchefer, par exemple...

Quelle est la distance d'approvisionnement de l'architecture ?

De nos jours, quelle est la distance moyenne des matériaux servant à la construction d'un édifice ? Faudrait-il pondérer cette valeur selon les masses des différentes parties ? Comment retracer la distance complète parcourue par chacune des particules de matière, tissant *in fine* l'architecture ? Belle broderie que de représenter un Sankey géographique de l'ensemble des atomes d'une architecture (Fig. 347). Comme en théorie cinétique des gaz, quel serait le libre parcours moyen d'une architecture ? En miroir de quelques inepties agroalimentaires contemporaines, l'examen des productions architecturales contemporaines n'aurait sans doute rien à envier au trajet typique de la crevette congelée. Dans le documentaire *The Corporation* [14], il y a cet épisode émouvant et convaincant du patron d'*Interface*, leader mondial de la moquette de bureaux, qui prend conscience de l'absurdité de son modèle industriel. Nul doute que certains concepteurs contemporains seraient pris de pareil vertige si nous prenions tous le temps de comprendre la cinématique des choses, d'entrevoir l'entrelacs des tapis roulants invisibles de la grande usine du monde (Fig. 348) [15].

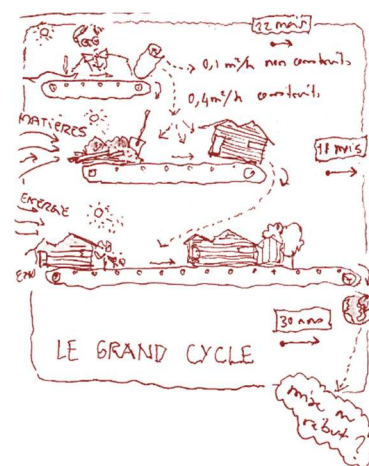
La perte du terroir de l'architecture

Depuis l'irruption des porte-containers, l'architecture a emboité le pas à la globalisation de ses ingrédients. *Le sable, enquête sur une disparition* [16] révèle des constructions affranchies de leur terroir de matériaux. Le béton d'une tour à Shenzhen comporte sans doute plus de sable venant du littoral du Maghreb qu'une école de Constantine. Lors de la construction du tramway parisien sur les boulevards des maréchaux au début des années 2000, pour les travaux de voirie, l'origine chinoise des lourds blocs de granit avait défrayé la chronique. Peu de temps plus tard, l'assureur Aviva était sous le feu des critiques en choisissant lors de l'appel d'offre, une entreprise chinoise « mieux-disante » pour les façades sophistiquées de la tour *Carpe Diem* à La Défense (Robert Stern, architecte), pourtant certifiée *Leed Platinum*.

Une nécessaire relocalisation de la matière

Pour aborder pédagogiquement cet enjeu déterminant, les projets initiatiques de la formation post-master que Jean-François Blassel et moi dirigeons autour de l'architecture post-carbone demandaient aux étudiants de préciser et d'argumenter sur la provenance des matériaux utilisés dans leurs projets, les *Diogènes*. Au cours de l'atelier de second semestre à Lausanne, je demandais aux étudiants de renseigner les « bassins versants de matériaux » de leur *Wilma*, petites architectures alpines tirant leur énergie du vent. Au cours de ces expériences pédagogiques, l'ambition était constante : prendre conscience de l'empreinte matière de l'architecture et des flux logistiques qu'elle génère (l'exemple de la carte de Minard pour les flux de coton).

Fig. 348. *Le tapis roulant de l'architecture*



Moins de matière (option 1)

Construire avec moins (et à peu de frais)

La matière est souvent chère

L'architecture-matière, celle de notre temps VI, va tenter d'offrir quelques perspectives pour échapper à la crise de la matière. Nous allons décrire dans la suite plusieurs stratégies dont la première consisterait à fabriquer de l'espace avec le moins de matière possible. Les précurseurs de cette approche viennent généralement des parties du globe où les matériaux sont chers, en comparaison des niveaux de vie. C'est le cas de l'architecte anglais, Laurie Baker¹ qui s'est établi en Inde au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle, pionnier de l'architecture à bas coût [17] (Fig. 349). Les pays pauvres, où la matière est souvent plus onéreuse que le temps humain, livrent de merveilleux exemples d'ingéniosité pour une utilisation savante de la matière. La simplicité des réalisations de Diébédo Francis Keré illustre cette ascèse, ce respect face à la difficulté de l'accès à la matière, cette disposition à utiliser préférentiellement le terroir du projet, la terre de son sol (0). Navi Radjou, né en 1970, théorise le principe de l'innovation frugale avec son *Jugaad*² [18] et réveille le champ d'exploration ouvert après l'exposition de 1964 au MoMA à New York par Bernard Rudofsky, *Architecture without architects : A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture* et le catalogue qui était associé [19].

L'inventaire des matières possibles et la contre-culture

Au temps du consumérisme naissant des *sixties*, le retour d'intérêt du vernaculaire et le plaisir de l'autoconstruction deviennent des antidotes contre-culturels permettant de résister au tsunami de la société de consommation [21]. Pied-de-nez ironique aux catalogues promotionnels, le *Whole Earth Catalogue*,³ encyclopédie *hippie* de 800 pages parue en 1968, est un manuel pour les auto-construc-teurs en herbe, un mode d'emploi *boy-scout* pour revisiter le vernaculaire et la construction légère à l'aune des développements de la géométrie et tout particulièrement des structures géodésiques, dans la foulée des recherches de Buckminster Fuller [22]. Emblème de cette époque, la *Drop City*, communauté construite dans le Colorado à partir de 1965, regroupant des *zomes*⁴, construits avec des matériaux de récupération, que l'on entrevoit d'ailleurs dans une séquence du dessin animé *Cars*⁵.

Fig. 349. Laurie Baker

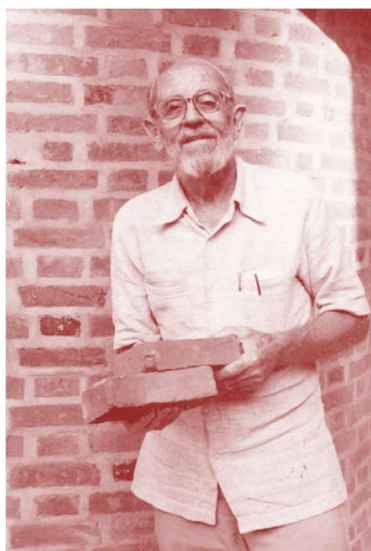


Fig. 350. Projet de Diébédo Francis Keré



¹ 1917-2007

² En hindi « *savoir se débrouiller et trouver des solutions dans des conditions hostiles* »

³ Et son avatar français, *Le catalogue des ressources*, 1975.

⁴ Concept créé aux États-Unis dans les années 1960, le mot « zome » (contraction de « zonohedron » et « dome ») a été inventé en 1968 par Steve Durkee. Le zome est, habituellement, une habitation individuelle en bois et en forme de dôme partant d'un polygone régulier comme base.

⁵ Le zome est associé au minibus Volkswagen, emblème des routards du mouvement hippie.

Légèreté et économie

Au cours de voyages, en Inde, au Maroc ou au Brésil notamment, j'ai observé les ossatures typiques des constructions courantes : toitures agricoles, abris de garage, charpentes de stations routières etc. Ce sont souvent des structures frugales, dont la recherche d'économie de matière est perceptible. J'ai souvenir de hangars industriels, dont les charpentes métalliques sont parfois des dentelles incroyables, de petites poutres Warren aux soudures délicates. En Europe, une portée d'une quinzaine de mètres est généralement franchie avec un profilé standard d'acier. À l'inverse, dans les pays où le coût de la matière est supérieur à celui de la mise en œuvre, on préfère souder de petites sections afin de faire travailler la matière au maximum, sans surplus, sans gras. En Europe, certaines structures agricoles me fascinent aussi, par leur évidente simplicité, notamment les *bomstrings* servant de rampes d'arrosage pour les champs (Fig. 351). Les charpentes de bois des hangars agricoles proposent aussi parfois des schémas statiques tout à fait efficaces. À sa façon, la rudesse industrielle de notre pylône *Wind-it* (chapitre #26) appartient à cette famille, celle de l'efficacité essentielle.

Les structures légères, mythes et réalités

La quête de l'insoutenable légèreté

En se libérant de la contrainte économique, une stratégie voisine consiste à chasser la matière, à débusquer la finesse, à rechercher l'élégance du projet de structure, et parfois *à tout prix*. L'objectif est alors davantage esthétique qu'économique, et selon cette quête, il devient envisageable de payer cher la matière, sous réserve qu'elle propose des qualités structurelles particulières. Pour débiter mon activité professionnelle, et en parallèle de la fin de mes études d'architecte, j'avais l'ardent désir de rejoindre le « saint des saints » de la structure légère, de rejoindre les pilotes d'essai de l'un des laboratoires célèbres du mouvement *high-tech*, le bureau RFR, fondé par le brillant Peter Rice¹ en 1982 [23]. Lorsque je rejoignis RFR en 1999, il y avait alors une trentaine d'ingénieurs et d'architectes au sein de cet épatant cabinet de curiosités qu'était le 4 rue d'Enghien dans le 10^{ème} à Paris. Des maquettes des nuages de La Défense, des pièces moulées de nœud de structure, telles des squelettes d'animaux rares sur les tables de réunion.

Un bon nombre des collaborateurs avait en commun un passage dans l'agence Piano. Chez RFR, on pratiquait simultanément les méthodes (et les tiques) de chez Piano et ceux de chez Arup. Il y avait pire comme école. Il faut dire que dès l'âge tendre, j'avais toujours voué un profond respect à Renzo Piano, à son généreux *Carnet de travail* [24], et tout jeune, vers mes sept-huit ans (1982), je remémore la joie en parcourant la fascinante étrangeté du Centre Pompidou. J'adorais cet endroit, parcourir ce dinosaure de

Fig. 351. *Rampes frontales pour l'agriculture. Un bel exemple d'économie de matière pour une grande portée et la recherche d'un coût minimum.*



Fig. 352. *Peter Rice, suspendu aux poutres à câbles des serres de la Cité des Sciences*



¹ Rice avait fait ses armes chez Arup et s'était notamment illustré sur l'Opéra de Sydney aux côtés de Utzon puis du tandem Piano-Rogers pour le Centre Pompidou.

Lego Technic et la liberté incroyable qu'il inspirait. J'ai des souvenirs d'enfance de visites avec un sentiment d'une très grande légèreté intérieure.

Breve phylogénèse des artistes de la légèreté

Chez RFR, je découvris ce culte de la *lightness* [25] (Fig. 353), à travers son livre éponyme ou alors, en parcourant le catalogue d'exposition de *L'art de l'ingénieur*, ce *Lagarde et Michard* de la virtuosité constructive [26]. Ce furent les filiations britanniques d'Anthony Hunt, irlandaises de Peter Rice, ou britannico-danoises d'Ove Arup. De l'autre côté du Rhin, à Stuttgart, au sein de l'ILEK, une brillante dynastie débutait après Leonhardt, avec Jörg Schlaich, Frei Otto¹ et les héritiers comme Werner Sobek. Je me suis régalé en lisant les monographies consacrées à SBP² [27] ou celle consacrée à l'œuvre complète de Frei Otto [28], et ses recherches conjointes avec Bodo Rasch [29]. Schlaich fut aussi le point de départ de « ma jonction » entre structures et énergies renouvelables, grâce notamment à ses cheminées solaires [30] (#25). Avec un ami russophile de chez RFR, Jacques Raynaud, il y avait la découverte des pylônes de Vladimir Chukhov (Fig. 354), à l'ère du soviétisme triomphant, futures inspirations pour les premières géométries de *Wind-it*, empilement d'hyperboloïdes de révolution (chapitre #26).

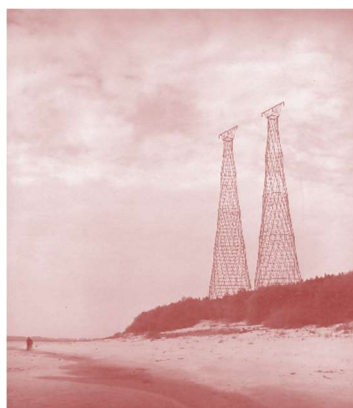
Être et avoir

Outre-Atlantique, Robert Le Ricolais prononçait l'horizon ultime, l'adage « portée infinie, poids nul », sorte d'asymptote à l'architecture-matière. À quelques centaines de kilomètres, Fuller œuvrait à la recherche de masse minimale avec ses *synergetics* et ses recherches autour des dômes géodésiques [22]. Une génération plus tard, Norman Foster tentait de s'arroger une partie de l'héritage fullerien en posant à proximité de la *Dymaxion Car* dans le documentaire qui lui est consacré, *How Much Does Your Building Weigh, Mr Foster ?* (2010). Sir Foster, passionné d'aéronautique, pilote son jet personnel, pérorer sur l'architecture écologique et les vertus de la technique. Mais en 2000, à Londres, lorsque sa passerelle très gracile se met à vibrer, le *Millenium Bridge*, il suspend un instant son appétence pour l'ingénierie en laissant porter le poids de la responsabilité à ses partenaires de projet, les talentueux ingénieurs d'Arup³ face à la délicate pathologie⁴ d'une structure décidément très légère (#24).

Fig. 353. *La couverture de Lightness : The Inevitable Renaissance of Minimum Energy Structures*



Fig. 354. *Les pylônes de Chukhov*



¹ Prix Pritzker presque posthume.

² Le bureau de *Schlaich, Bergermann und Partners*

³ <https://www.theguardian.com/theobserver/2001/mar/11/2>

⁴ Avec François Consigny, alors directeur de projet chez RFR pour la passerelle Simone de Beauvoir, nous irons les rencontrer à Londres pour comprendre les premières conclusions de leur investigation. Je me souviens en particulier des échanges très cordiaux et savants avec Sophie Le Bourva, Pat Dallard et Tony Fitzpatrick.

Matières sophistiquées

Tout ossature est un sujet de design, et particulièrement dans le vocabulaire de ses connexions, dans la cinématique de ses articulations, dans le raffinement du dessin de ses nœuds. Ce souci d'élégance peut aussi coûter cher écologiquement (et aussi financièrement, les deux étant fortement liés). Il réclame parfois une vraie débauche de matière et d'énergie. On ne rechigne parfois pas à des mises en œuvre extrêmement sophistiquées, à préconiser des alliages pointus, des moulages singuliers. Le *high tech*, la structure spéciale est bien souvent éloignée de l'économie du projet. Pour entrevoir la disparition de la matière, sublimer son évanescence, la splendeur de son organisation dans l'espace, on s'autorise parfois de se (faire) payer les matériaux les plus performants. Le coût au kilo d'un acier ouvré peut être facilement cinq fois supérieur à celui d'un profilé courant.

Pour *Wind-it*, avec les ingénieurs de DFI et d'Elioth, il était excitant de chercher l'élégance avec les moyens d'une structure industrielle et de parvenir à rester compétitif par rapport à un pylône traditionnel (chapitre #26). À l'inverse, pour la structure en inox extrudé, avec ses nœuds moulés et ses vitrages bombés, l'entrée de métro de la Gare Saint-Lazare¹ battait des records de coût au mètre-carré (Fig. 355), tout comme les ouvrages que Jean-François Blassel et moi concevions au Luxembourg (#23).

Virtuosités géométriques et nouveaux matériaux

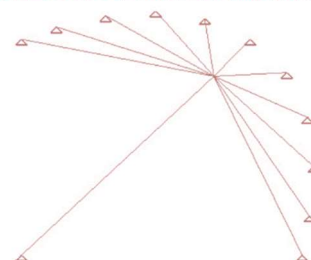
L'efficacité des structures, la quête de la minimisation de la matière, correspond également à une optimisation de l'énergie grise. Cette dernière se niche souvent dans le contrôle de la géométrie, dans l'art savant de diriger les forces dans l'espace. Selon les caractéristiques des matériaux employés, en fonction de la diversité des sollicitations mécaniques, la géométrie optimale s'apparente à la sculpture selon Michel-Ange : l'art d'évider, de creuser aux bons endroits. D'Arcy Thomson, en analysant les morphogénèses du vivant [31], illustre la bonne répartition des pleins et des vides d'une poutre encastrée en la comparant à la microstructure de l'os d'un vertébré. Le domaine de l'optimisation topologique est initié avec les recherches de forme d'un Gaudi pour la *Sagrada Família* de Barcelone, et plus tard avec les recherches de l'ILEK et la merveilleuse série des catalogues « IL » et ses parallèles fructueux avec le monde du vivant. La *Morphologie structurelle* de l'ingénieur et architecte Philippe Samyn [32], ou encore, de façon plus ancienne, *Les formes dans la nature* par Peter Stevens [33] ont poursuivi l'exploration du biomimétisme.

Fig. 355. Les pièces moulées en inox de la couverture de métro de la Gare Saint-Lazare (architecte, Arte-Charpentier ; ingénieurs, RFR). Projet suivi en réalisation au côté de Mitsu Edwards. Le « choc industriel » lors de la visite de l'usine d'extrusion des profilés en acier inoxydable (2002).



Fig. 356. Recherches personnelles au cours de l'avant-projet de la verrière de la Gare de Strasbourg (AREP, arch. ; RFR, ing.) et la généralisation du point de Fermat pour déterminer la position optimale du nœud de la sous-tension des arches.

Schéma de câbles après optimisation : moyeu déplacé



¹ Arte-Charpentier, architecte et RFR, ingénieurs. Projet dont je suivis la fabrication et la réalisation au côté de Mitsu Edwards au début des années 2000.

Fig. 357. Poteau en béton exprimant son renfort nécessaire d'inertie à mi-distance. Eric Lapierre, architecte



Fig. 358. Exprimer l'optimisation de la matière en compression et donner à voir le surplus nécessaire au milieu d'un poteau articulé. Un gimmick architectural à l'apogée du mouvement high-tech. Tour KPN à Rotterdam, RPBW



Des géométries souvent en tension

Un aperçu de ces genèses de la forme, en quête absolue de légèreté, s'illustre magnifiquement avec le projet de silos à grain par Frei Otto [28]. La forme obtenue par la membrane est le funiculaire du chargement hydrostatique : la courbure gaussienne est plus importante en bas du fait du cumul du chargement généré par l'empilement des grains et la pression croissante qu'ils exercent en partie basse. Les efforts verticaux sont dirigés sur la surface d'un « ballon », une membrane plutôt qu'une forme épaisse, qui serait dimensionnée par la flexion et la compression¹. De fait, un point commun à ces recherches consiste en général à bannir les éléments en compression de grande dimension.

Le bannissement de la compression (pathologie d'une bifurcation énergétique)

De fait, un élément comprimé tente de dissiper le travail de l'effort qui lui est appliqué selon deux trajets géométriques potentiels. Le premier est le raccourcissement uniforme, comme un ressort se compactant : le travail de l'effort de compression est alors stocké par un raccourcissement élastique, homogène à l'ensemble de la section. Toutefois, et au-delà d'un certain effort, ce trajet énergétique n'est plus optimal² : une déformation infinitésimale de la rectitude l'élément comprimée engendre une flexion parasite, et le travail de l'effort de compression est alors stocké par des élongations dissymétriques de la section comprimée. À l'instar des phénomènes de changement de phase en thermodynamique (#3), le flambement correspond à une bifurcation du comportement³.

La matière « brise sa géométrie » pour dissiper plus efficacement le travail des efforts appliqués. En lien avec le triptyque *énergie-matière-ordre*, nous voyons là comment une géodésique énergétique exprime une relation forte entre ordre et matière. Conserver l'information géométrique, empêcher le chaos spatial, cela suppose un surcoût de matière. Pour éviter ce changement d'état géométrique potentiel, il faut plus de matière, comme à mi-section d'une barre articulée à ses extrémités. Cela fait partie des « tiques » de l'expressionnisme *high-tech* : pensons aux structures de Piano pour le port de Gènes ou la béquille de sa tour à Rotterdam (Fig. 358) ou plus récemment d'Éric Lapierre et ses poteaux en béton pour la résidence étudiante située non loin de la porte d'Orléans à Paris (Fig. 357).

Les structures arachnéennes

À l'inverse, l'élément en tension n'est pas soumis à cette bipolarité, à cette schizophrénie géométrique. Il emmagasine l'énergie uniquement en s'allongeant et préserve ainsi sa géométrie initiale. Paradoxalement, cette stabilité autorise l'exploration de géométries pouvant plus fortement se déformer. Les structures en tension parviennent ainsi à générer des structures à forte résistance avec peu de matière. De façon globale, les structures légères tentent de rejeter les composants en flexion et proposent au

¹ Comme dans le cas d'un silos cylindrique traditionnel en béton

² <http://www.mmaya.fr/Insta/amphi/Lecon-6-1.htm>

³ https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Théorie_des_bifurcations

contraire de fournir une expressivité claire d'éléments tantôt en compression, tantôt en tension. Dans un élément en flexion, il y a toujours une partie de « matière en trop », celle située à proximité de la fibre neutre. Les tenségrités sont une sorte d'aboutissement ultime de ces recherches, comme les structures à *double-courbure inverse* des architectures métallo-textiles de Frei Otto ou de Jörg Schlaich, ou sinon les coques minces de Heinz Isler ou de Felix Candela.

La face cachée de la tension

Mais la tension se paye toujours quelque part : les structures fortement tendues réclament des ancrages solides, des fondations conséquentes. Pour la passerelle Simone de Beauvoir à Paris (chapitre #24), la masse invisible des fondations en béton représente 58% du total de l'ouvrage [20]. Idem pour la splendide passerelle de Jürg Conzett dans la Via Mala (Fig. 359), un *ribbon string* dans les Grisons suisses, ainsi que pour les ancrages de la couverture du stade Olympique de Munich par Frei Otto en Allemagne (1976).

La compression, un retournement à la mode

La structure légère est un sport, un championnat avec une émulation intellectuelle formidable. C'est un art fortement transdisciplinaire, utilisant des mathématiques avancées, des outils puissants de la géométrie, tout en réclamant une exigence importante dans la connaissance des matériaux et dans l'art de les fabriquer. Parfois, certains utilisent des contrepieds pour se distinguer de leurs pairs, comme Philippe Block de l'ETH de Zürich, qui lors de la Biennale de Venise de 2016, sous le commissariat d'Alejandro Aravena, tentait de nous démontrer que la compression était définitivement *la* solution écologique à la crise de la matière (Fig. 360).

Un retournement théorique, une inversion du slogan historique de la structure légère¹. Sa stéréotomie savante réclamait assurément énormément d'énergie pour effectuer la découpe spécifique de chacun de ses composants minéraux. Cette somptueuse démonstration plastique n'offrait cependant aucune réponse générique permettant de nous convaincre du retour vainqueur de la compression, nouveau *graal* de l'efficacité structurelle. Les coques de Nervi ou les zones des *hippies* américains [21] continueront sans doute d'offrir eux des exemples plus répliquables.

Fig. 359. *L'art des structures. Coupe sur la passerelle de la Via Mala, un « ribbon string ».*



Fig. 360. *Voute stéréotomique par le Block Group*



¹ Le concept de « Tra » par Frei Otto dans l'IL de 1966 et du Bic = Tra /m

Fig. 361. Cette carte de Ashby illustre une comparaison entre l'énergie grise (ou incorporée) par unité de volume vis-à-vis de la résistance : à une sollicitation donnée, quelle est le matériau optimal (dans un contexte donné) ?

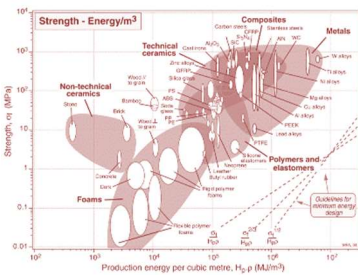
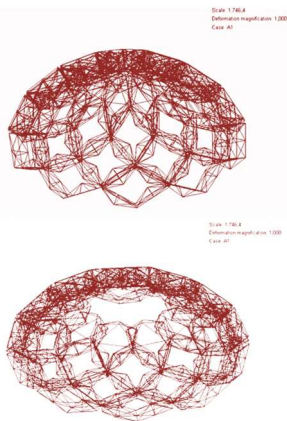


Fig. 362. Mes recherches autour de zones mobiles. Articulation de superlosanges en plan. Modélisation de structures cinétiques avec le logiciel GSA (2005)



Est-ce toujours la bonne voie ?

Dans l'article *Le pic de l'architecture* [12], je m'interrogeais sur les mirages possibles d'une recherche effrénée de l'évanescence de la matière.

« La Modernité a souhaité épouser un mythe, la perfection de la machine. L'architecture devait tendre vers la complexité technique du paquebot, la rigueur millimétrique de l'automobile, la précision clinique de l'avion. Tout au long du 20^{ème} siècle, cette « grande bifurcation » dans notre lien à la matière construite s'est aussi révélée avec l'essor du high-tech. En parallèle, le monde industriel a développé des procédés de construction de plus en plus élaborés, éloignant le bâtiment des matières primaires. [...] Chez certains architectes et ingénieurs, la quête absolue de la légèreté s'opère parfois au prix d'un coût écologique élevé des matériaux utilisés : énergie grise considérable de l'acier inoxydable, aluminium à très haute limite élastique... L'impact écologique de la matière peut se décomposer à la fois en quantité (qu'elle soit masse ou volume) et en coût unitaire. Mais si la perte de quantité ne compense pas l'impact intrinsèque plus élevé, la planète n'a rien gagné. »

À ce compte, il convient donc d'effectuer le juste compromis entre la quantité des différentes matières et les exutoires écologiques qu'elles engendrent par unité fonctionnelle¹. Résumé algébriquement, l'énergie totale nécessaire à l'édification d'un ouvrage (Eq 7) est la somme des énergies grises pour chaque matériau, elle-même produit d'une quantité par une valeur intensive (au sens de la thermodynamique), et par unité fonctionnelle : $S_{E↑}$ correspond par exemple à une quantité exprimée en MJ par kg, ou en MJ par volume, etc.

$$\text{Eq 7.} \quad \text{Énergies nécessaires} = \sum Q \cdot S_{E↑}$$

Pour l'estimation des émissions de gaz à effet de serre induits pour l'édification (Eq 8), le principe de comptage est analogue au précédent. Les quantités $S_{CO2↑}$ correspondent alors aux émissions associées à un matériau considéré et selon une mise en œuvre.

$$\text{Eq 8.} \quad \text{Émissions totales} = \sum Q \cdot S_{CO2↑}$$

Des grandeurs qui évoluent

Cette quête de la légèreté écologique, la production d'archétypes sont le fruit d'un contexte technique, géographique et historique. Sur les paramètres intensifs évoqués avant, ces derniers varient dans le temps et dans l'espace. Les émissions de gaz à effet de serre d'un matériau (Fig. 363), qui serait par exemple transformé selon un process utilisant massivement l'énergie électrique², sont très variables selon les pays et les dynamiques d'évolution du mix électrique. De façon plus générale, il convient donc de douter de toute production s'affichant comme étant la référence d'une

¹ En jargon de l'analyse du cycle de vie.

² Par exemple une ligne de float pour le verre, la fabrication de wafer de silicium en amont de panneaux photovoltaïque etc.

vertu de légèreté écologique. Dans un scénario rêvé de conception et de construction, il faudrait entamer tout projet avec les données contextualisées des matériaux¹ [34] : ils sont les deux de la forme, au sens mathématique du terme et les architectures les plus efficaces seront les filles de ces croisements.

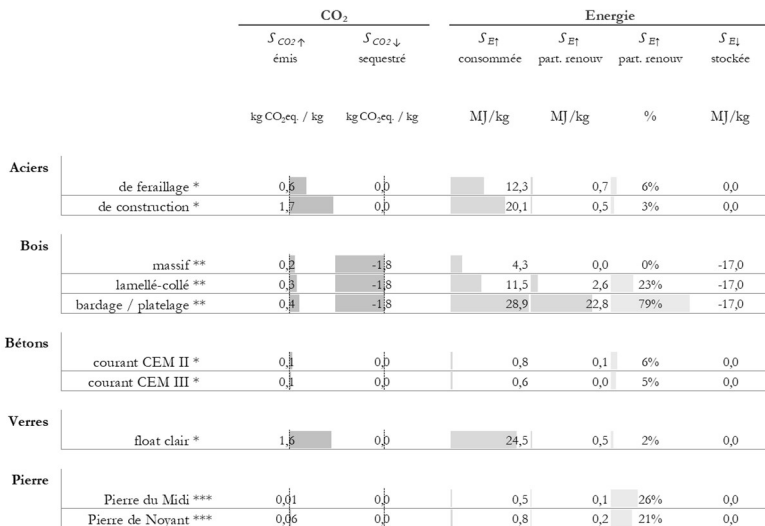


Fig. 363. Impacts « procédé » selon la masse des matériaux

* Valeurs d'après Koliann MAM, *Franchissement « Bas-Carbone », Dimensionnement Environnemental des passerelles*, Projet de Fin d'Etudes Département de Génie Civil et Construction réalisé au sein d'Elioth (Egs Concept), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées 2015 - 2016. Modale A1-A3 du cycle de vie.

** Valeurs corrigées
*** Bases de FDES

¹ En imaginant aussi les dynamiques temporelles tendancielle...

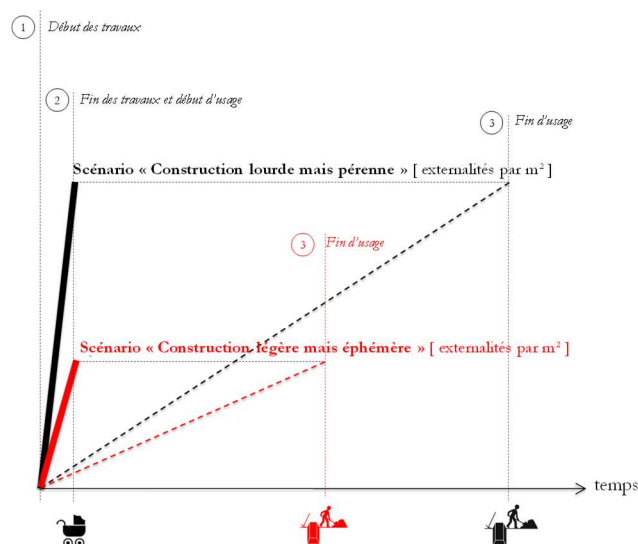
De la matière pour longtemps (option 2)

Robustas

L'amortissement temporel de la matière

Notre compromis précédent, celui de l'option 1, la quête de « la légèreté à tout prix », pourrait sembler simpliste. Il consisterait en la seule optimisation du « capex » constructif (chapitre #5), à s'en tenir à réduire l'impact écologique de l'ouvrage fini : en énergie grise, ou en carbone, ou en matières non renouvelables, ou encore dans le cadre d'une pondération multicritère qui tenterait d'être systémique. Or si cet investissement (au sens financier ou écologique) dure peu, a-t-on opéré *in fine* le meilleur choix (#20) ? Il paraît nécessaire de préciser ce dilemme constructif : investir quelle quantité de matériaux, dépenser quelles énergies, mais pour quelle durée de vie ? Construit-on simplement, hâtivement et avec l'horizon d'une durée de vie limitée (la cabane dans les bois par exemple), ou au contraire, consent-on un investissement¹ lourd (et donc aussi en temps humain, en ressources capitalistiques etc.) pour permettre la permanence de l'édifice² ? (Fig. 364) Nous voyons ainsi comment la recherche absolue d'une légèreté écologique doit nécessairement s'opérer avec un regard temporel.

Fig. 364. Le graphique typique du dilemme de l'amortissement entre deux stratégies constructives : construction lourde mais pérenne, et la courbe pointillée matérialise l'amortissement sur la durée de vie comparée à la une construction légère. Les ordres peuvent évidemment être inversés.



¹ En matières et en énergie.

² La quintessence étant généralement l'architecture religieuse.

Déclarer une intention de durée de vie

L'art constructif d'un ouvrage *kleenex* doit clairement différer de celui destiné à vivre des siècles. Le projet¹ pour l'entrée de métro Porte Marguerite de Navarre (chapitre #29) a été conçu selon la commande d'un ouvrage temporaire. Dès lors, nous avons conçu cet objet avec le souci d'une très grande simplicité, avec peu de matériaux, et avec l'objectif d'un investissement écologique extrêmement faible (Fig. 365).

Le projet d'architecture renouvelable doit alors inmanquablement scruter l'espace et le temps, de façon simultanée. Peut-être que nous pourrions ainsi relire la *phylogénèse* des « types » de l'architecture vernaculaire selon cette tension, cette recherche d'un optimum de l'« amortissement de la dette constructive », une sorte de sélection naturelle effectuée selon ce « score » [19]. Dans son livre, Thierry Kazazian [35] pose le dilemme selon ces termes, synthétisé dans le graphique ci-contre (Fig. 364).

L'architecture ne décide pas seule de l'âge de sa mort

La fin de vie de l'édifice n'est pas que le fruit de son génome, d'une programmation du fil de son existence niché dans l'ADN de sa conception, mais la ruine ou la démolition de l'architecture sont davantage dictés par son environnement, et des mécanismes variés d'obsolescence (ou d'allongement) liés tant à la situation urbaine, à la pression foncière [36], aux évolutions programmatiques et aux modifications typologiques (chapitre #5). Je m'étais le doigt sur cette question dans l'article rédigé pour le catalogue de l'exposition *Work in Progress* [36] dont j'étais l'un des commissaires scientifiques :

Au cours d'une interview récente, donnée peu de temps avant sa disparition, le designer Roger Talon énonçait qu'en matière de création automobile, le stylisme avait définitivement supplanté le design. En ces temps où le premium et le waouh effect sont portés au pinacle, où le sport utility vehicle et le crossover règnent comme prédateurs finaux de notre faune automobile (adoubés par un marketing devenu planétaire), une partie importante de la production architecturale contemporaine semble parfois emboîter le pas à cette dérangeante tendance de fond. Au sein du règne architectural, le « genre bureau » n'échappe évidemment pas à ce paradigme. A fortiori, nos espaces tertiaires semblent subir une facilité de mise au rebut, une capacité à devenir has been bien supérieure à d'autres programmes architecturaux. En cela, nous pouvons achever notre parallèle avec l'industrie automobile : Une convergence analogue des archétypes de gamme. Au sein d'un même genre, une espèce typologique devient largement prédominante. Pensons à la force de prédation du bureau neuf traditionnel : il doit correspondre à des critères marketing au moins aussi contraignants que ceux infligés au fameux segment C ou M1 de l'automobile, celui de nos compacts (Mégane, Golf...) : le confort optimal pour tout le monde, un design prudent afin de ne heurter personne. À rebours donc de cet objectif, la force de l'opinio-

Fig. 365. Un édifice léger (au sens écologique) pour une durée de vie initialement programmée pour être temporaire : l'édicule de la place Marguerite de Navarre à Paris et son anamorphose (2017).



¹ 169-architecture et Elioth (2016-2017)

cratie et la tendance à énoncer des critères de design à partir des attentes moyennées et profilées de l'utilisateur final. Et, pour finir, une obsolescence programmée sans doute équivalente. [...] »

Le cycle, expression de l'éternité

Il y a quelques temps, Jean-Sébastien Lagrange (chapitre #28) me résumait l'histoire du sanctuaire d'Isé au Japon (Fig. 366) : cet édifice est reconstruit à son image tous les vingt ans et les bâtiments actuels, qui datent de 2013, sont les 62^{ème} à avoir été construits. Les traditions et les consignes de reconstruction, extrêmement précises, sont transmises dans un ensemble de textes datant du 10^{ème} siècle. Le bois récupéré est envoyé dans tout le pays pour renforcer des édifices religieux, ou sinon vendu à des pèlerins. Ainsi le cycle de destruction-reconstruction, à l'échelle d'une génération perpétue la conservation des savoirs, comme si la rotation de l'énergie et de la matière étaient nécessaires pour le maintien de l'information (#4). Une hygiène de perpétuation et de permanence de l'architecture. La durabilité supposerait donc aussi l'éphémère, contraste temporel indispensable.

Fig. 366. *Sanctuaire d'Isé au Japon*



Venustas

La beauté pour durer

Dans le chapitre *Les chronogrammes* (chapitre #5), j'abordais les vertus écologiques supposées de la *venustas* vitruvienne. L'émotion suscitée par la patine de la matière¹, le plaisir des matériaux cabossés, marqués, polis par le temps, les surfaces aux textures transformées par les outrages du climat et des événements : le plaisir de l'architecture partagée avec d'anciennes générations, une communion du beau à travers le temps ? De façon contemporaine, le collectif Rotor mettait en avant la mode du *vintage* où comment l'univers du luxe et de la mode (les boutiques branchées d'*Urban Outfitters*) préempte le vocabulaire constructif du réemploi [37]. La quête de permanence de l'architecture procède sans doute de cette attention aux vertus d'une connivence intergénérationnelle, et aussi celle de la mémoire d'une génération, de la « *pétrification d'un moment de culture* » pour reprendre les mots de Jean Nouvel. De façon sans doute plus rigoureuse que ce dernier, Peter Zumthor, un autre Pritzker, porte un soin maniaque aux détails constructifs de ses projets. Ses bains de Vals en Suisse illustrent ce souci absolu du détail (Fig. 367), comme la cascade d'échelles entre les trois différentes épaisseurs des granits, le contrôle total, millimétrique, obsessionnel jusqu'à la finition de l'évacuation des bassins en laiton en fond de piscine².

Fig. 367. *Les thermes de Vals par Peter Zumthor. L'obsession de la perfection.*



¹ L'exemple de la valeur marchande de la « patine » citée par Rotor dans le cas de la différence de prix entre le cœur d'une poutre et sa partie extérieure [37]

² Vu lors d'un séjour dans cet endroit en 2007.

L'amour de la matière

Le point de départ de l'architecture-matière est souvent charnel et hédoniste, un attachement sensuel à la matière et aux matériaux. L'émergence du mouvement *Arts And Crafts* et les résistances de William Morris pourraient marquer l'avènement de ce temps VI. En réaction aux premières déviations de la révolution industrielle naissante (#12), à ses conséquences sur les pertes de qualité et de savoir, la naissance d'une contre-culture, une utopie de la matière émerge en 1890 avec le souci de recréer une filiation entre savoir et matériau. Mais l'architecture-matière convoque aussi l'éternité. Plus tard, dans *Silence et Lumière* [38], tel Hamlet face à son crâne, Louis Kahn¹ s'interroge : « *Demandez à la brique, que voulez-vous être ? Et la brique vous répondra : je veux être une arche.* ». L'architecte devient chimiste. Le matériau est un atome du tableau de Mendeleïev, l'architecture, une composition moléculaire. Le matériau est un être singulier dans une assemblée finie, il a une personnalité, comme une lettre dans un alphabet. Kahn, comme bien d'autres (et évidemment Alvarro Alto) établit ce rapport sensuel entre le matériau et l'architecte, tel le cuisinier avec ses ingrédients-fétiches (Fig. 368).

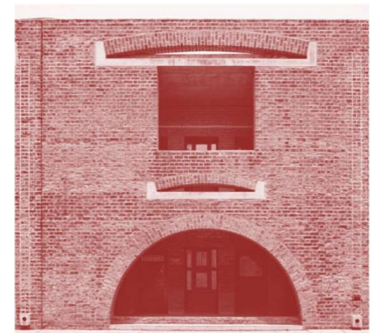
La simplicité des composants et l'évidence constructive

L'architecture-matière fait souvent valoir des compositions mélangeant peu les matériaux : elles restent des plats simples, avec assez des ingrédients en nombre limité. Comme Kahn et Alto pour la brique, d'autres concepteurs entretiennent des passions - voire des obsessions - pour certains matériaux. Une grande partie de la Modernité (#14) épouse le béton dans une relation fortement monogame. Une lecture récente de la revue *Construction Moderne* revendique encore cette collusion entre une matière (le béton) et une écriture typique de la modernité en architecture (l'équerre). Il serait frappant de créer cette bijection entre les matériaux (béton, brique, métal, verre, bois...) et les concepteurs, en développant une grande fresque graphique.

Un architecte, un matériau

Pour la pierre, on penserait évidemment à Pouillon et à Perraudin ; pour le verre, à Murphy Jahn ou à Peter Rice ; pour l'aluminium, à Jean Prouvé. Les architectes sont comme des grands chefs qui un jour, tel Alain Passard, ancien rôtisseur, décide de porter leur dévolu sur une catégorie particulière de *matières-ingrédients*. Passard ne jure lui plus que par les légumes depuis 2001 ; Rudy Ricciotti s'auto-intronise « pilote d'essai du *Ductal* », ce béton fibré à très hautes performances, mis en recette par le mastodonte du ciment et de la construction, Lafarge Holcim. Il n'est d'ailleurs pas rare de voir des grands noms de l'architecture contemporaine associés à des marques particulières de *plats cuisinés* architecturaux (#14) : Dominique Perrault a propulsé le *business model* des mailles en acier inoxydable de chez GKD, entreprise de tissage technique.

Fig. 368. *La brique chez Louis Kahn. L'Indian Institut of Management.*



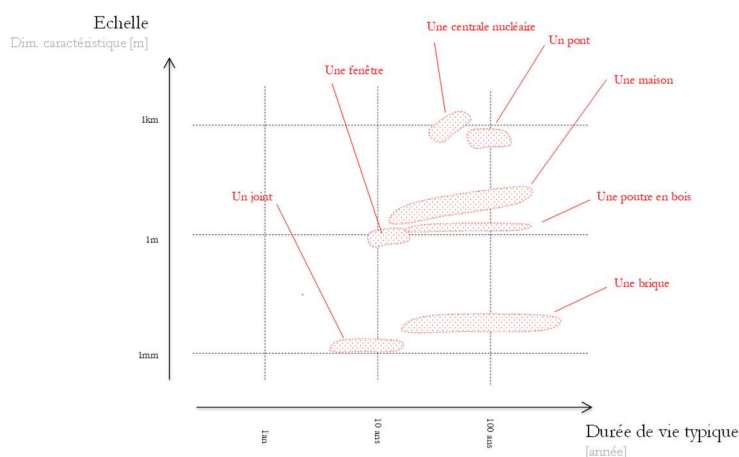
¹ Le très beau texte de Christian Devillers et de sa visite de l'Indian Institute of Management d'Ahmedabad dans *Casabella*, n°571, 1990.

Différencier les obsolescences

De la durée de vie et critères de matières

Pour alléger la dette de la matière sur la durée de vie de l'édifice, l'architecture-matière propose parfois d'autres alternatives. Une idée centrale est la considération des obsolescences variables des différents corps techniques de la construction : le squelette, le gros œuvre vit généralement plus longtemps que les menuiseries de façade ou que les matériaux de second œuvre. L'architecture-matière découple ces temporalités asynchrones des composants-matière, telle une partition d'orchestre symphonique. Elle favorise l'indépendance des obsolescences caractéristiques et évite ainsi la mise au rebut de la totalité de l'édifice lorsque l'un de ses composants dysfonctionne [32].

Fig. 369. Graphique temps et espace de différents composants



C'est pourtant la stratégie suivie par les tenants de l'obsolescence programmée, l'encapsulation constructif d'un *iPhone* poussant l'utilisateur à son remplacement lorsqu'un composant (comme la batterie, inaccessible) devient inopérant. L'architecture-matière est le contraire de cela, elle permet le remplacement aisé de ses sous-parties et autorise les transfigurations [37].

La bienveillance sur les existants

Le remède consiste à contrecarrer l'élan de la *tabula rasa* et à analyser avec bienveillance écologique - à défaut de la considération architecturale - le stock construit : détruire et construire quelque chose de nouveau pèsera lourd, tout au moins en matière. C'était l'attitude de notre équipe, emmenée par Jean Nouvel, dans le cadre de la consultation internationale du Grand Pari(s) en 2008 : conserver la plupart des existants de l'architecture tant décriée de la reconstruction et des banlieues ; préférer les faire muter, les réhabiliter et exhiber les vertus de leurs *squelettes capables* [39].

Le cas des constructions de grande hauteur

Un autre exemple, récent, concerne la consultation pour la réhabilitation lourde de la Tour Montparnasse à Paris, projet gagné par la nAOM et avec Elioth (2017) : sa mise à jour permet au moins d'amortir les externalités engendrées en 1970 par la construction de ses fondations et de sa structure. Il est connu qu'une tour réclame plus de matières par unité de surface. En 2008, dans une note, le cabinet *Enertech*¹ mentionnait les chiffres suivants concernant le contenu en énergie grise :

Maison individuelle	1000 kWh/m ²
Petit immeuble de bureaux	de 1500 à 2000 kWh/m ²
Tour	de 3000 à 4000 kWh/m ²

À ce compte-là, la durée de vie d'un édifice de grande hauteur devrait au moins être deux fois supérieure à celle d'une construction classique. Malheureusement, les mécanismes d'obsolescence du marché semblent souvent compromettre cette nécessité écologique [36].

Pérenniser un *kleenex*

Dans d'autres situations, avec des architectures bien plus légères, une sympathique réhabilitation peut parfois prolonger la durée de vie d'un édifice qui n'était sans doute pas prévu pour exister déjà aussi longtemps à l'origine (#5). C'est la stratégie que nous avons développée, à la suite de l'acquisition avec ma femme, d'une petite maisonnette en bois, de moins de cinquante mètres-carrés à la frontière entre la Seine-et-Marne et l'Yonne (Fig. 370). Cette maisonnette datant originellement de 1945, est constituée d'une ossature bois, un principe de maison en kit. Elle fut montée initialement à Montereau-Fault-Yonne. Elle fut remontée dans les années 1960 sur le site actuel, la butte de la commune de Flagy. C'est un projet familial, une mise à jour constructive légère, recourant à une isolation biosourcée avec des billes de liège et les volets-Trombe en panneaux contreplaqués de bouleau de 12mm, comme tout le nouveau parement intérieur et la recomposition des pièces, travaux effectués avec grand talent par le menuisier Mathieu Depretz. Les fenêtres ont été remplacées par des grandes baies en bois de chez Bildau & Bussmann.

Fig. 370. *Maisonnette de Flagy. Prolonger l'existence d'une construction légère qui n'avait sans doute pas prévue de vivre déjà aussi longtemps.*



¹ Olivier Sidler, fondateur

Fig. 372. Fiche d'identité de la maisonnette de Flagy et composition des matériaux ajoutés.

Maisonnette Flagy		
Listé	•	
Bureau	Pers. (avec Avril)	
Lieu	Flagy	
Rôle	Archi	•
	Ingé	
Phase	Etudes	•
	Travaux	•
Type	IV.3	
	V	
	VI	•
	VII	•
Temps	Début	2016
	Fin	2017
	Livraison	2017
Q	1	
Volume	m ³	112,5
Energies	Solaire passif	
Matières	Bois, verre	
Composition	Acier kg	-
	Verre kg	7E+02
	Bois kg	2E+03
	Béton kg	-
	Autres kg	-
	Masse unitaire kg	2,7E+03

Fig. 371. Quelques tirages issus du Carbonotron et les courbes associées d'amortissement de l'empreinte CO₂ cumulée d'un édifice.



Tirages aléatoires de vie

Dans un autre registre et de façon théorique, mon *Carbonotron* (Fig. 371) illustre les différentes trajectoires d'amortissement selon différents tirages aléatoires. Certains scénarios illustrent la légèreté attendue vis-à-vis de l'empreinte du carbone gris : faibles émissions liées à la construction, durée de vie importante, intégration de dispositions architecturales et techniques facilitant les opérations de maintenance et de rénovation et allégeant ainsi les émissions associées, et pour finir, des émissions maîtrisées pour les opérations de fin de vie dans le cas du bâtiment considéré (#20). Telle était l'ADN rêvée d'une architecture-matière, légère écologiquement sur la totalité de sa durée de vie.

Faire tourner la matière (option 3)

Architectures du réemploi

Le vestige et la mine

L'architecture-matière, au terme d'une vie bien remplie, et qui aurait épuisé toutes les options pour prolonger son existence, qui aurait bravé toutes les tensions foncières, réglementaires etc., qui aurait résisté à tous les risques naturels, deviendra inéluctablement tôt ou tard l'objet d'une déconstruction. Et plutôt que d'être réduite à un déblai de déchets, sa ruine pourrait-elle devenir la mine d'un futur bâtiment ? C'étaient les termes d'Emmanuelle Borne dans son introduction au numéro de mai 2017 de *l'Architecture d'aujourd'hui* consacré aux vestiges. C'est aussi l'une des propositions figurant dans le chapitre intitulé « Programmes pour le temps VII » (#21) concernant les cadastres matière-carbone.

Réemploi et circularité de la matière

En 2014, au moins en France, l'exposition *Matière Grise* au Pavillon de l'Arsenal fut déterminante pour remettre au goût du jour cet enjeu global, en ouvrant les perspectives offertes par le réemploi et la réutilisation [40]. Ces dernières sont autant d'hypothèses permettant d'allonger la durée de vie des composants du « bâtiment-donneur ». Du point de vue de l'« édifice-receveur », cela s'apparente à une option de réduction des externalités constructives, notamment l'énergie grise, le carbone gris et la ponction sur des stocks de matières non renouvelables (Fig. 373). Tôt ou tard, l'architecture se réorganisera selon cette circularité. En 2010, Valéry Didelon notait aussi les recherches exploratoires des belges du collectif Rotor [37] :

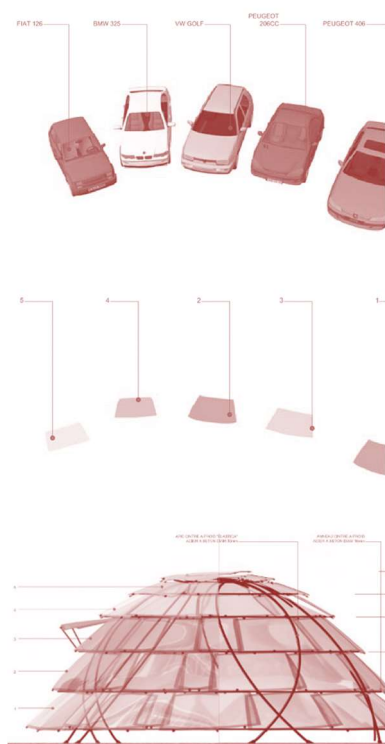
« La contribution de Rotor à cette Biennale de Venise marque une nouvelle étape dans le travail du groupe bruxellois sur la réutilisation des matériaux industriels et dans sa réflexion sur les stratégies d'éco-conception. La « beauté mystérieuse » du grand morceau de moquette élimée, des panneaux de particules rayés et de la rambarde d'escalier décatie qui sont exposés dans le pavillon belge renvoie ainsi directement aux collages de l'OMA présentés dans le Palazzo delle Esposizioni. Le message est clair : désormais, la modernisation de notre environnement passe peut-être davantage par la préservation que par la consommation boulimique des ressources naturelles et culturelles. »¹

Fig. 373. *Le Pavillon Circulaire du temps de sa présence sur le parvis de l'Hôtel de Ville à Paris par Encore Heureux, architectes.*



¹ Trente ans après : la présence du passé, Valéry Didelon, d'Architectures, octobre 2010 <http://bit.ly/2jSGUeQ>

Fig. 374. *La casse numérique, les géométries des vitrages récupérées et l'élaboration d'une forme globale, une gloriette faite de pare-brise de seconde main. R. Ménard et F. Schlachet, architectes.*



L'exemple des gloriettes en pare-brise de voiture

En 2004, avec Frédéric Schlachet, un ami architecte, nous répondions à un concours d'idées organisé par le FRAC Centre. Le programme de la consultation proposait de concevoir un abri de jardin ou une gloriette. Passionné de voitures depuis l'enfance, puis du verre et de ses techniques de mise en œuvre apprise chez RFR (#23), je recyclais un vieux désir, celui d'exploiter le gisement des casses automobiles et plus particulièrement des vitrages de voitures (Fig. 374). Nous écrivions dans la notice de notre proposition :

« Le concept que nous avons retenu repose sur : l'utilisation d'un matériau singulier -les pare-brise de voitures constitués de verre bombé feuilleté-, la structure porteuse de ce matériau, la mise en œuvre de ce matériau sur la structure, les formes possibles et évidentes issues de ce principe constructif. Leur forme et leur caractère précieux, lié à l'emploi du verre bombé, donnent finalement un paysage composé avec ces objets. L'architecture contemporaine peut participer au dessin du paysage et non pas s'en dissocier. Cela dépend des qualités structurelles et plastiques de ces objets. Ces dômes ont une présence fragile et évanescence, mais expriment des volumes naturels ; ils évoquent le monde organique. Les parebrises disposés à clin deviennent les pétales d'une fleur, les écailles d'un poisson ou d'un reptile. »¹

Il y a une douzaine d'années donc, pour concevoir cette géométrie, j'arpentais les « casses numériques du web », à la recherche de modèles 3D de voitures, disponibles en téléchargement. Avec un peu d'entêtement, en rédigeant de façon adéquate les requêtes sur internet², je parvins à débusquer une 406, une BMW série 3, un cabriolet 206, une Golf et une vieille Fiat 126. Je désossai les modèles pour extraire et récupérer les géométries spécifiques de chaque vitrage. Une sorte de « BIM du réemploi » avant l'heure. Avec les pièces de ce puzzle, il fallait composer une géométrie selon cette petite famille de dimensions et de doubles courbures variées (Fig. 375). Par un jeu de clins horizontaux et verticaux, en disposant les plus grands vitrages en partie basse (celui de la Peugeot 406 si je me souviens bien), il devenait possible de composer cette « pomme de pin de verre », cet igloo de réemploi, avant de découvrir bien plus tard les réalisations analogues du *Rural Studio* de Samuel Mockbee.

¹ Extrait de présentation. Frédéric Schlachet et Raphaël Ménard, architectes, 2004.

² En mentionnant sur Google des recherches de type filetype : 3ds ou 3dm ou lwo, des formats de fichiers typiques de la 3D en 2004

Le manifeste pour les verres trempés de Beaubourg

Malgré quelques tentatives au cours des années 2005 et 2006, notre gloriète ne vit malheureusement pas le jour. Heureusement, une dizaine d'années plus tard, je pus saisir une nouvelle occasion. Elioth et Egis venaient d'être missionnés pour la rénovation de la chenille du Centre Pompidou et plus particulièrement pour le remplacement des vitrages. Au moment de l'avant-projet, alerté par Jacques Raynaud qui travaillait à l'époque chez Elioth, je rédigeais le texte suivant en annexe du rapport d'avant-projet :

« Nous nous apprêtons à échanger les vitrages actuels de la Chenille, par des vitrages feuilletés d'une épaisseur cumulée de 10mm de vitrage (5.5 ou 6.4). Le ratio d'émissions CO₂ typique pour un vitrage feuilleté est de l'ordre 2,14kg CO₂eq par kilo. La fourniture d'une peau neuve pour la Chenille réclamera d'ores et déjà plus de 195 tonnes CO₂eq, rien que pour le vitrage (et hors prise en compte de la logistique). La Ville de Paris s'engage sur une trajectoire de neutralité carbone pour 2050 ; la Ville catalyse aussi l'économie circulaire et promeut le réemploi pour le bâtiment. [...] »

Dès lors, il nous semble crucial d'anticiper l'ensemble des dispositions de rénovation évitant de briser les 3700m² des vitrages trempés et cintrés de l'actuelle Chenille. Ces magnifiques tuiles de verre, au nombre de 1200, présentent des géométries idoines pour leur réemploi. Bâtiment exemplaire et iconique, ces pièces du Centre Pompidou ont une valeur sentimentale inestimable. Nous sommes absolument persuadés de l'appétence de tiers pour préserver cette « géométrie grise » et révéler dans d'autres contextes, l'ensemble des architectures possibles selon ces briques transparentes : ce magnifique actif de la peau de la Chenille. [...] Les secondes vies de cette peau pourraient donc être multiples. Certes, la dépose des vitrages pourrait être le prétexte à un léger surcoût de la part des entreprises, mais nous pensons que si cette question est traitée en amont, cet écart pourrait être mineur. Notons aussi que ces tuiles sont facilement stockables et empilables, posées selon leur tranche. [...] »¹

Par coïncidence, et peu de temps après cette note, nous propositions via 169-architecture de répondre à l'appel à expérimentations lancé par le Pavillon de l'Arsenal au cours de l'année 2017, le programme « FAIRE ». Grâce à cet éclairage, nous voulions mettre en relief la spécificité du réemploi du verre et problématiser par cet exemple une « mise à jour » de l'architecture du verre et du high-tech ayant fait les riches heures de RFR (nous le verrons notamment dans le chapitre #23), d'Eckersley O'Callaghan² ou de chez Schlaich. En 2017, avec des matières plus rares, comment composer une verrière ou une double-peau avec un élément verrier de seconde main ? Comment caractériser ses propriétés mécaniques après quarante ans ? Quelles stratégies constructives proposer pour compenser l'absence de feuilletage et les incidences sur la sécurité ? C'est le travail que

Fig. 375. *Fiche d'identité de la gloriète faite de pare-brise. R.Ménard et F.Schlachet, architectes.*

Gloriette de pare-brises		
Listé		
Bureau		Pers.
Lieu		-
Rôle	Archi	•
	Ingé	•
Phase	Etudes	•
	Travaux	
Type	IV.3	
	V	
	VI	•
	VII	
Date	Début	2004
	Fin	2004
Matières		Verre, acier
Composition	Acier kg	5E+02
	Verre kg	4E+02
	Bois kg	-
	Béton kg	-
	Autres kg	-
	Masse unitaire kg	8,5E+02

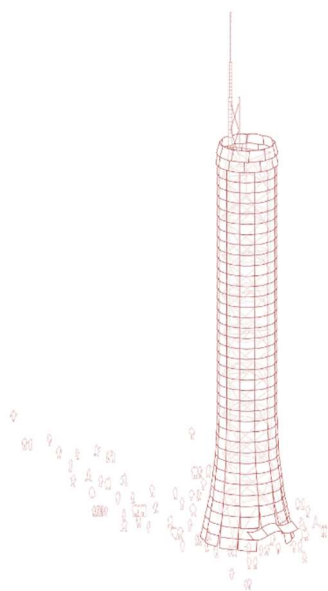
¹ Manifeste pour le réemploi nécessaire des vitrages de la Chenille du Centre Pompidou, annexe à l'APS du 20 janvier 2017

² Les concepteurs de la plupart des Apple stores à travers le monde

Fig. 377. Fiche d'identité du projet de réemploi des vitrages de la chenille du Centre Pompidou. 169-architecture et Elioth.

Réemploi Centre Pompidou		
Listé		
Bureau		169
Lieu		Paris
Rôle	Archi	*
	Ingé	*
Phase	Etudes	*
	Travaux	
Type	IV.3	
	V	
	VI	*
	VII	
Date	Début	2017
Q		1
Matériaux		
Verre		
Composition	Acier kg	-
	Verre kg	3E+04
	Bois kg	-
	Béton kg	-
	Autres kg	-
Masse unitaire kg		3,4E+04

Fig. 376. L'une des esquisses autour du réemploi des vitrages de la chenille du Centre Pompidou. 169-architecture et Elioth.



nous sommes en train de réaliser au moment où j'écris ces lignes en dessinant trois esquisses illustrant des réemplois potentiels des magnifiques verres cintrés du précieux édifice de Piano et Rogers (Fig. 379).

Une architecture qui anticipe son obsolescence

Des plans de déconstruction

Lors d'une conférence en 2016¹, Michael Ghyoot, membre du collectif Rotor, exposait deux principes différents pour la démolition d'un faux plafond dans un bureau [37]. La première stratégie opte pour la rapidité du petit engin de chantier², le « bulldozer de poche » qui agrippe les panneaux suspendus en les emportant dans son parcours avec sa benne levée. Une variante moins expéditive organise un démontage sage et patient par des ouvriers. Elle autorise la récupération des panneaux du faux-plafond, restés intègres dans cette méthodologie de déconstruction. Le dilemme économique entre ces deux options oppose le coût du temps humain à la valorisation envisageable de faux-plafonds récupérés. Cet équilibre est analogue à celle entrevue concernant l'économie d'éléments de structure acier dans les pays émergents. Cependant, tant que la valeur économique prendra insuffisamment en compte les externalités écologiques et sociales, certains choix se feront toujours au dépend du respect des matières et du temps consacré à édifier ou à défaire une forme organisée.

L'entropie de la destruction

Lors de cette même conférence, Ghyoot constatait le caractère organisé du processus de la construction : sur un chantier, les matériaux neufs sont disposés sur des palettes et l'ensemble des éléments sont protégés [37]. La matière part d'un état organisé vers un autre état organisé, le bâtiment fini. Il en est de même en cuisine : les tomates pelées sont dans leur conserve, le poulet est dans sa barquette avant de se transformer en poulet basquaise. À l'inverse, la démolition est une destruction de l'ordre construit, un *orage d'entropie* (#3).

Restaurer la symétrie du temps

L'architecture-matière doit-elle prévoir des plans de démontage dès sa conception ? Les centrales nucléaires ne possèdent pas de tels documents dans leur DOE³ pour faciliter leur démantèlement. À rebours, quel est le mix de matériaux, quel est l'ordonnancement optimal qui anticiperait au mieux la défaisance et faciliterait les opérations de déconstruction ? (Fig. 378) Le démontage d'une architecture devrait pouvoir être visionné comme un film. L'horizon de la réversibilité : je me souviens de l'adaptation cinématographique du livre de Stephen Hawking, *Une brève histoire du temps* [41]. Pour illustrer la flèche du temps et l'irréversibilité à l'œuvre dans

¹ À l'PEAV&T en 2017

² Et Ghyoot rappelait aussi d'ailleurs la filiation militaire des engins de chantier et notamment le bulldozer comme détournement du char militaire.

³ Dossier des ouvrages exécutés.

la plupart des choses de la vie¹, le réalisateur filme au ralenti une tasse à café qui tombe par terre et se casse. En visionnant l'extrait à l'envers, nous détectons immédiatement l'irréalité de la scène : nous sommes invariablement conditionnés par la flèche du temps et aguerris à la pente inéluctable du chaos et du désordre. La non-réversibilité possède aussi des vertus dans la transformation d'un site, dans ses fonctions additives, les trois âges de Rome contés par l'architecte et urbaniste Antoine Grumbach.

Imaginer la ruine

Cela figure dans le testament de l'architecture-matière : des plans de démolition dès l'avant-projet sommaire, l'estimation anticipé des coûts de déconstruction. Le maître d'ouvrage provisionnerait auprès de la *Caisse des Dépôts et Consignations* le budget prévu, une sorte de retraite par capitalisation de l'édifice. Pour conserver la mémoire du plan de défaisance, un coffre-fort situé dans un local technique conserverait de façon sûre, méthodes et plans pour la déconstruction totale et la remise en état complète du site (chapitre #21). En parallèle, tous les composants de l'œuvre construite seraient tatoués, gravés² pour garantir une traçabilité totale, une fiche d'identité de leur nature, une sorte d'IFC³ du réel. Nous avons évoqué cette piste lors de la construction de l'édicule de la Porte Marguerite (#29), du fait de la facilité de gravure dans le bois : et si on tatouait les composants de l'architecture ? Encourager l'anticipation du démantèlement de l'architecture, c'est engager un principe de simplicité, d'humilité et de responsabilité.

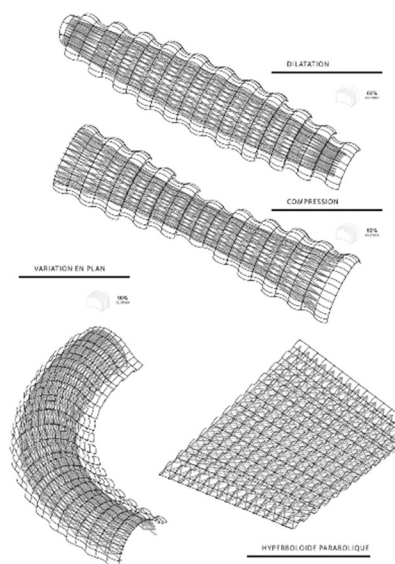


Fig. 378. *Couverture de Construire réversible.*

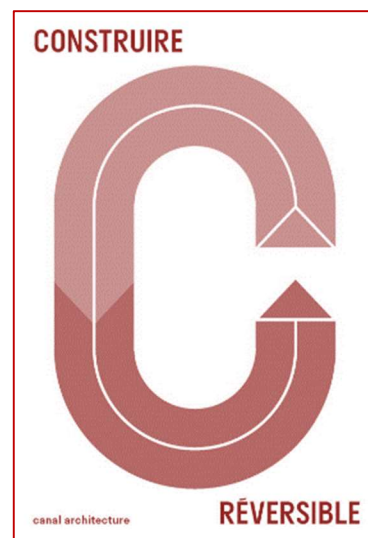


Fig. 379. *Recherches paramétriques autour du réemploi des vitrages du Centre Pompidou (169 et Elioth, 2018)*

¹ Et cela fait penser d'ailleurs à la scène *irréversible* du film de Claude Sautet et de l'accident de voiture dans *Les choses de la vie*.

² Avec des puces RFID dans une version *smart building*.

³ L'IFC est le format d'échange standard utilisé communément par les logiciels permettant le travail en BIM

La matière renouvelable (option 4)

Matières solaires

La nécessité d'un flux

Après avoir épuisé la matière jusqu'à la lie, et selon les trois principes énoncés précédemment¹, elle finit par signer sa fin, elle ne pourra durer infiniment (Fig. 380). Si l'on suit les préceptes des Meadows [42], le flux a été certes divisé par huit, mais l'architecture réclame tôt ou tard du sang neuf.

« Si la durée de vie moyenne de chaque produit circulant dans l'économie humaine pouvait être multipliée par deux, si l'on pouvait recycler deux fois plus de matériaux, si on avait besoin de mobiliser moitié moins de matière pour fabriquer un produit, on pourrait diviser le flux de matière par huit. »

La photosynthèse, usine atmosphérique

Le rôle essentiel du soleil pour le cycle de l'eau est connu, mais il l'est moins concernant le cycle de matières particulières, celles dépendant notamment de la chimie du carbone. Certes, la matière est en quantité finie sur cette Terre, mais le flux permanent d'énergie solaire va permettre une remise à neuf, perpétuelle, d'une partie des composants fondamentaux de l'architecture.

« Les concepteurs doivent réapprendre à bâtir avec les matières renouvelables et sans cesse renouvelées : la biomasse sous ses différentes formes et, en premier lieu, le bois. Toutefois, cette matière pousse lentement... et la matière renouvelable ne saura tout résoudre. Du fait d'un rendement de conversion bien inférieur à 0,1 % du gisement solaire, la construction en bois réclame son « bassin versant constructif » : au moins dix fois plus important que la surface au sol du bâti. [...] Mais l'architecture doit massivement se réappropriier les vertus de la matière qui pousse. »

Les exploits du biosourcé

Évidemment l'histoire de l'architecture regorge de théories et d'exemple de construction utilisant massivement le bois [45] et le biosourcé, comme la paille ou des feuillages. Les utilisations les plus savantes du bois contemporain supposent parfois l'utilisation de matières moins renouvelables, comme des colles sophistiquées pour les lamellé-collé ou les nœuds métalliques de certains assemblages. Il faut reconnaître la virtuosité de l'architecture japonaise dans ce domaine avec Kengo Kuma et son utilisation de la paille pour la mairie de Yusuhara (2006) ou le *Yusuhara Wooden Bridge Museum* (2010). Il y a aussi les recherches autour des structures réticulées en bois par Shoei Yoh et son *Oguni Dome* (1988) avec ses 67 mètres de portée ou celui Toyo Ito avec l'*Odate Jukai Dome*² (1997) (Fig. 381).

Fig. 380. *La migration des matériaux renouvelables vers les matériaux non renouvelables. La nécessité d'une transition. D'après Michael F. Ashby [43]*

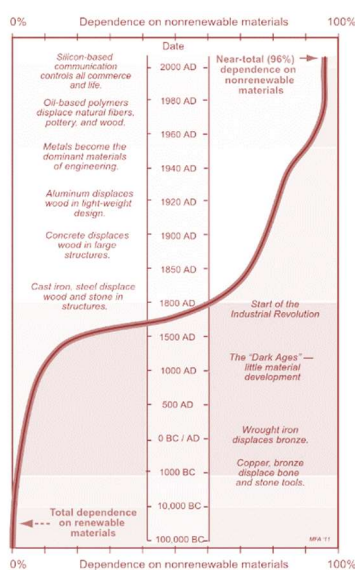
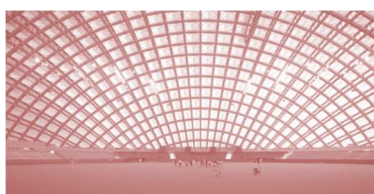


Fig. 381. *L'Odate Jukai Dome par Toyo Ito*



¹ Réduire, faire durer, faire tourner.

² Une structure en bois couvrant 178m par 157m et de 52m de haut.

Vers le bois à impact nul ?

Toutefois, les analyses de cycle de vie comparées entre matériaux montrent que la filière bois possède encore des marges de progrès, notamment sur l'énergie grise par unité de masse. Cette petite utopie de la matière bois proposerait de créer un écosystème d'exploitants forestiers, d'opérateurs de scierie, de transformations de la matière ligneuse, d'industriels, d'artisans et de makers pour tendre vers le « bois à impact minimal ». Ce scénario viserait à créer une filière totale, du puits carbone de la forêt jusqu'à la pose des produits, dont les analyses de cycle de vie atteindraient les valeurs asymptotiques, avec une totale transparence sur le process : de l'open forresterie-industrie-artisanat. Sur cette chaîne, nous organiserions et dimensionnerions la mise en place de systèmes énergétiques renouvelables dédiées, pour tous les intrants nécessaires au process comme aux transports. Une refondation de À Z, une logique cherchant la réduction maximale de toutes les empreintes. Quelques analyses en cycle de vie illustrent de fait des consommations de 600 à plus de 3000 kWh par mètre-cube ; par unité de masse, elles peuvent atteindre jusqu'à près d'un kWh, soit environ le cinquième du contenu énergétique intrinsèque du bois lorsqu'utiliser comme combustible.

Il y a sans doute des mesures d'efficacité à dénicher dans les procédés de transformation pour réduire ses valeurs (notamment les phases A1 à A3 de l'ACV). Aussi, et pour compléter la part résiduelle d'énergie non renouvelable consommée durant ces phases, il faudrait l'équivalent de la production annuelle d'environ 4 m² de photovoltaïque pour la production d'un mètre-cube de bois, soit le millième de la surface de forêt nécessaire à sa production. Ainsi, un mètre-carré de panneau photovoltaïque « donne naissance » chaque année à un mètre-carré de « tout bois », avant toute mesure particulière d'amélioration du processus de transformation. Le bois transformé à impact nul n'existe assurément pas, mais il existe certainement des pistes inventives pour réduire massivement son impact énergie et carbone, et cela pourrait faire l'objet d'une proposition de politique industrielle régionale sinon nationale (Programmes du temps VII, #21).

Que serait une matière renouvelable ?

Matières et états

Une fois opérée cette réduction, l'architecture-matière ne serait alors que bois, paille, chanvre ou bambou (Fig. 385) ? Il faut toutefois rappeler l'importance des flux de matières invisibles dans l'édification et dans l'arborescence amont de chacun des éléments d'une architecture. Pour les matériaux biosourcés, et comme par exemple pour le bois lamellé-collé, les colles tentent difficilement de s'affranchir de l'industrie pétrochimique. Les connexions d'ossature bois renoncent difficilement au métal pour nœuds, les broches, les vis et les clous. L'eau est aussi très souvent un flux essentiel lors de la transformation des matériaux. Elle peut être aussi parfois un composant direct de l'architecture, trivialement, sous forme de glace pour l'habitat arctique et les igloos (Fig. 383). De façon additive, et sous forme de neige sur les toitures, elle renforce l'isolation des toitures

Fig. 382. Comparaison du contenu en énergie grise par unité de volume de quelques matériaux. D'après Ashby.

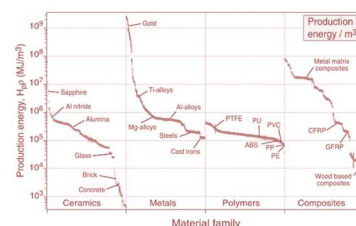


Fig. 383. Igloos et toitures enneigées



exposées au froid et réduits les pertes convectives de l'enveloppe en participant au calfeutrement.

Fig. 384. *Les coussins de l'Eden Project*



Architectures de l'air

Matière sous forme gazeuse, l'air est un composant essentiel, fondamental pour l'isolation, le confort et l'efficacité thermique. L'espace est aussi plein d'air mais la masse gazeuse de nos vides intérieurs ne représentent que quelques millièmes de la masse totale d'une architecture. Comprimé, l'air se mue en structure. La compression permet d'augmenter la rigidité du volume d'air pressurisé et la résistance à la pression est évidemment très importante. Ces dernières années, les ballons d'ETFE ont connu un large développement, sous l'impulsion de la démonstration convaincante de l'Eden Project en Cornouailles par Nicholas Grimshaw (Fig. 384). Les promoteurs de cette technologie rappelaient d'ailleurs que le poids du volume d'air contenu dans les ballons était supérieur à celui des feuilles en ETFE. À une échelle plus importante, Hans Walter Müller, ingénieur et architecte, a réalisé un nombre considérable de structures gonflables, dont celle dans laquelle il habite depuis 1971. Les chercheurs de l'ILEK ont réalisé un numéro de l'IL autour des « pneus » et de la caractérisation des structures sous pression. Comme nous l'avons vu, la compression coûte chère en quantité de matériaux, et l'air peut parfois occuper efficacement cette fonction. Avec une grande ingéniosité, les ingénieurs suisses de la société *Airlight* avaient composé une poutre à air extrêmement prometteuse.

Fig. 385. *Stock Orchard Street par l'architecte Sarah Wigglesworth. Isolation en paille. Londres, 2001*



Construire : stéréotomie ou tectonique

En se réappropriant les arguments d'une conférence donnée par Kenneth Frampton, Christophe Wieser et Andrea Deplazes [44] rappellent la double origine des formes architectoniques et les associations implicites avec certains matériaux. Il y aurait d'un côté les ouvrages en terre, la construction massive et la stéréotomie ; l'autre type serait les ouvrages de toiture, les charpentes, la tectonique ou la construction filigrane. L'organisation académique de l'université de Stuttgart conforte cette classification à deux familles, elle qui avait créée deux chaires : l'une était l'*Institut für Massivbau* de Fritz Leonhardt et Jörg Schlaich tandis que l'autre était l'*Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren*, la chaire de Frei Otto.

Fig. 386. *Maison en terre par Martin Rauch*



Architectures des sols locaux

Ainsi, l'architecture-matière pourrait se décliner et suivre des détours différents selon qu'elle est massive en promouvant l'emploi de la terre, l'emploi des couches superficielles du sol sur lequel le projet s'installe. Martin Rauch (Fig. 386), Anna Heringer sont les architectes contemporains du retour en grâce du pisé, de la bauge et d'adobe [46]. En France, actif depuis trente-cinq ans, le laboratoire Craterre à Grenoble commence à faire des émules chez les jeunes architectes français dont l'agence Joly et Loiret avec quelques propositions intéressantes à leur actif (et l'exposition Terres de Paris au Pavillon de l'Arsenal).

Matière renouvelable, une définition

Quelque soit la stratégie retenue, l'architecture du temps VI n'emploie que la matière renouvelable, et cette dernière serait facilement disponible sans grande dépense énergétique. À l'inverse, pour circonscrire une définition par la négation, la matière fossile serait rare ou épuisable ou difficilement reproductible (Fig. 387). Abordé de façon historique, Bernard Marrey distingue quelques matériaux selon l'importance de la température nécessaire à leur élaboration et il est certain que cet ordre qualifie une partie du caractère renouvelable ou non de la matière [40].

« La raison en est que la fabrication du plâtre ne nécessite qu'une température de 150°C environ. Comme la terre, qui peut être cuite au soleil, il est donc le matériau le plus ancien car nécessitant peu d'énergie calorifique à la différence des matériaux que l'on peut qualifier de modernes – le ciment, le verre et l'acier qui demandent tous des températures voisines de 1500°C, l'aluminium (2000°C). »

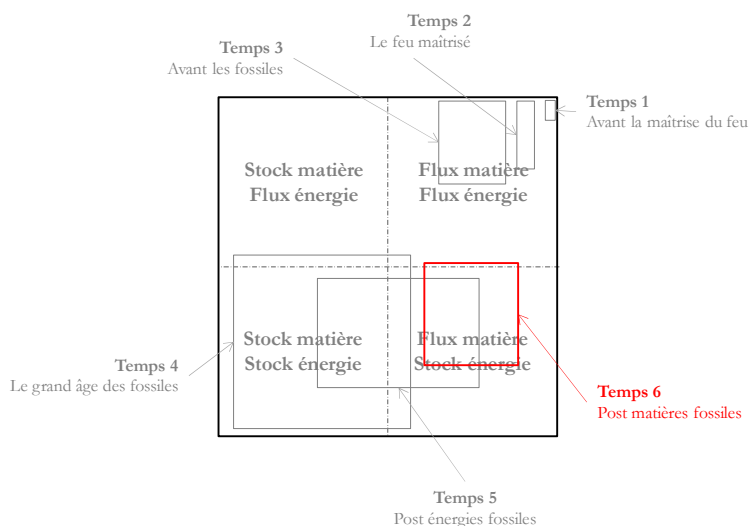


Fig. 387. Une tentative de réduction de notre emprise sur les matériaux pour le temps VI.¹

Vers le bâtiment à matières positives ?

L'architecture-matière serait une construction à « température douce », dont les constituants primaires ne réclameraient au maximum que des températures réduites, aisément accessibles sous la chaleur solaire. Dans la situation où l'architecture du temps VI utiliserait des ingrédients transformés à haute température, ces derniers seraient alors certainement issus de constructions antérieures. À terme, l'horizon du temps VI serait une transposition du bâtiment à énergie positive, appliquée à la matière : pourrait-on imaginer une architecture produisant plus de matières qu'elle n'en consomme sur l'ensemble de son cycle de vie ? De fait, l'architecture classique est d'abord une dette continue de matière. Au moment évidemment de son édification, puis dans le futur avec les flux de matière récurrents pour l'entretien, la maintenance et les réparations.

¹ Bernard Marrey, *Construire à la Parisienne*, Matière Grise, p70

Fig. 388. *La Ruche-à-Trucs, sur la partie gauche du dessin de Diane Berg, au sein de la Fabrique de la Renaissance à Lille, une nouvelle infrastructure urbaine dédiée au stockage urbain des matières primaires, secondaires et finales. 169-architecture, Obras et Elioth.*



Quelles sont les situations où un bâtiment s'allège¹ ? Existe-t-il des édifices ou des aménagements qui maigrissent au fur et à mesure de leur existence ? Comme pour les dons d'organe, les bâtiments-matières fourniraient des banques d'ingrédients disponibles (Fig. 388), pas tant uniquement au moment de leur déconstruction, mais aussi à un moment intermédiaire où l'extension serait démontée alors que les enfants ont quitté le foyer par exemple. Sur un territoire étendu, disposant d'une production de biomasse, les à-côtés de l'édifice pourraient participer à le rendre créateur en matière. Une autre hypothèse encore serait un bâtiment dont la production autonome d'énergie permettrait de pomper de l'air, de le comprimer pour fabriquer ainsi des briques d'élément constructif. La rencontre en somme de la miniature du 15^{ème} siècle avec le *Solar Sinter* de Markus Kayser. L'architecture-matière devra toutefois veiller à son impact énergétique, à son empreinte climatique, à sa robustesse, c'est le sujet de l'architecture-renouvelable, du temps VII, terme de cette première partie.

*

¹ Hormis lors d'un vide-grenier pour du mobilier plutôt que de l'immobilier (et en général pour mieux le remplir ensuite)

Bibliographie

1. BIHOUIX Philippe. *L'âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable*, Seuil, Anthropocène, 2014
2. DELESTRAC Denis, *Le sable, enquête sur une disparition*, documentaire, 2013
3. BONNEUIL Christophe, FRESSOZ Jean-Baptiste, *L'Événement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Seuil, 2013
4. BRUNNER Paul H., RECHBERGER Helmut, *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, Lewis Publishers, 2003
5. MAC NEILL, John R., *Du nouveau sous le soleil. Une histoire de l'environnement mondial au 20^{ème} siècle*, Seyssel, Éditions Champ Vallon, 2010. Titre original *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*, 2000
6. ZALASIEWICZ Jan et al., *Scale and diversity of the physical technosphere : A geological perspective*, The Anthropocene Review, 2016
7. GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, *La décroissance, Entropie, écologie, économie* (1979), 2^{ème} édition, 1995
8. AUGISEAU Vincent, *La dimension matérielle de l'urbanisation flux et stocks de matériaux de construction d'Ile-de-France*, thèse sous la direction de Sabine Barles, 2017
9. MENARD Raphaël, DOSSIER Julien et al., *Paris, change d'ère. Stratégie de neutralité carbone de Paris en 2050*, Elioth, 2016
10. MENARD Raphaël, *La Renaissance des Fabriques. Un monde possible en 2050*, 2015
11. MAC NEILL, John R., *Du nouveau sous le soleil. Une histoire de l'environnement mondial au 20^{ème} siècle*, Seyssel, Éditions Champ Vallon, 2010. Titre original *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*, 2000
12. MENARD Raphaël, « Le pic de l'architecture », pp161-168, *Matière Grise*, Direction de l'ouvrage Encore Heureux, architectes, Edition et distribution exclusive, Pavillon de l' Arsenal, 2014
13. VARDA Agnès, *Les Glaneurs et la Glanuse*, documentaire, 2000
14. ABBOTT Jennifer, ACHBAR Mark, *The Corporation*, documentaire canadien basé sur le livre *The corporation, the pathological pursuit of profit and power* de Joel Bakan documentaire, 2003
15. FOX Louis, *L'Histoire des choses (The Story of Stuff)*, documentaire d'après l'œuvre de Annie Leonard, 2007
16. DELESTRAC Denis, *Le sable, enquête sur une disparition*, documentaire, 2013
17. BHATIA Gautam, *Laurie Baker. Life, Works and Writings*, Penguin Books, 1991
18. RADJOU Navi, *Innovation Jugaad - Redevenons Ingénieux !*, Éditions Diatino, 2013
19. RUDOLFSKY Bernard, *Architecture Without Architects: A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture*, University of New Mexico Press, 1987. 128 p.

20. MAM Koliann, *Franchissement « Bas-Carbone », Dimensionnement Environnemental des passerelles*, mémoire de projet de fin d'études chez Elioth, École des Ponts ParisTech, 2017
21. MANIAQUE Caroline. *Go West - Des architectes au pays de la contre-culture*, Parenthèses, Architectures, 2014
22. BUCKMINSTER R. Fuller, *Operating manual for spaceship Earth*, 1969
23. RICE Peter, *An Engineer imagines*, Artemis, London, 1994
24. PIANO Renzo, *Carnet de travail*, Seuil, 1997
25. BEUKERS et VAN HINTE, *Lightness: The Inevitable Renaissance of Minimum Energy Structures*, 010 Publishers, 1999
26. PICON Antoine (sous la dir.), *L'art de l'ingénieur*, Ed. Centre Pompidou, 1997
27. SCHLAICH Jörg, BERGERMANN Rudolf, *Leicht Weit, light structures*, Prestel Verlag, 2005
28. NERDINGER Winfried, *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*, Birkhauser, 2005
29. OTTO Frei, RASCH Bodo, *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*, Edition Axel Menges, 1996
30. SCHLAICH Jörg, SCHIEL Wolfgang, *Solar Chimneys*, Encyclopedia of Physical Science and Technology. Third Edition, 2000
31. THOMPSON D'Arcy, *On Growth and Form* (en français *Forme et Croissance*), 1917
32. SAMYN Philippe, *Étude de la morphologie des structures, à l'aide des indicateurs de volume et de déplacement*, Académie royale de Belgique, 2004
33. STEVENS Peter S., *Les formes dans la nature*, Seuil, 1978
34. ALLWOOD Julian M., CULLEN Jonathan, *Sustainable materials – with both eyes open : future buildings, vehicles, products and equipment – made efficiently and made with less new materials*, Cambridge, 2011
35. KAZAZIAN Thierry, *Design et développement durable : Il y aura l'âge des choses légères*, Victoires Éditions, 2003
36. MENARD Raphaël, *Work in Process, nouveaux bureaux, nouveaux usages*. Exposition au Pavillon de l'Arsenal. Article « Don Drapper, la voiture et le climat », p237 à p265, 2012
37. ROTOR, *Déconstruction et réemploi. Comment faire circuler les éléments de construction*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2018
38. KAHN Louis I., *Silence et Lumière, choix de conférences et d'entretiens, 1955-1974*, Edition du Linteau, 1996
39. MENARD Raphaël, « Introduction au développement durable » (p134 à 139) et contributions dans le reste de l'ouvrage, *Naissances et renaissances de mille et un bonheur parisien*, J. Nouvel, JM Duthilleul et M Cantal-Dupart, Les éditions du Mont Boron, avril 2009, 638 pages.
40. CHOPPIN Julien, DELON Nicola (direction de l'ouvrage), *Matière Grise*, Pavillon de l'Arsenal, 2014
41. HAWKING Stephen, *Une brève histoire du temps*, titre original *A brief history of time*, Bantam Books, 1988
42. MEADOWS Donella H., RANDERS Jorgen, MEADOWS, Dennis. *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*, Rue de l'échiquier, 2012
43. ASHBY Michael F., *Materials Selection in Mechanical Design*, third edition, Butterworth-Heinemann, 2005 (première édition 1992)

-
44. DEPLAZES Andrea, *Construire l'architecture. Du matériau brut à l'édifice. Un manuel*, Birkhäuser, 2013
 45. LE ROY Robert, « Quelles améliorations environnementales pour le bois ? », *Revue Malaquais n°5*, Actes Sud, septembre 2017
 46. BOLTHAUSER Roger, RAUCH Martin, *Haus Rauch. A Model of Advanced Clay Architecture*. Birkhäuser, 2011
 47. ALLWOOD Julian M., CULLEN Jonathan, *Sustainable materials – with both eyes open : future buildings, vehicles, products and equipment – made efficiently and made with less new materials*, Cambridge, 2011

Fig. 389. Scénarios fictifs d'usage des choses et valeurs équivalentes du flux de matières correspondant, rapporté à la personne et à son temps d'usage.

	Scénario bas	Scénario médian	Scénario haut
Logement			
	<i>Logement occupé par une personne sans activité professionnelle ou associative. Bâtiment ancien.</i>	<i>Cas d'une maison individuelle et sans mutualisation de l'usage en dehors des plages d'occupation</i>	<i>Résidence secondaire non mutualisée pendant son inoccupation</i>
emprise individuelle	25 m ² /pers	40 m ² /pers	50 m ² /pers
masse surfacique	700 kg/m ²	800 kg/m ²	900 kg/m ²
masse rapportée à l'utilisateur	→ 17 500 kg/pers	→ 32 000 kg/pers	→ 45 000 kg/pers
durée de vie	100 ans	50 ans	30 ans
flux moyen	→ 175 kg/pers et par an	→ 640 kg/pers et par an	→ 1500 kg/pers et par an
taux d'usage	18 heures par jour	10 heures par jour	4 semaines par an
taux d'usage	→ 75% du temps	→ 42% du temps	→ 8% du temps
flux équivalent	→ 200 kg/pers et par an	→ 1 500 kg/pers et par an	→ 19 500 kg/pers et par an
	→ 1 kg/pers et par jour	→ 4 kg/pers et par jour	→ 53 kg/pers et par jour
Bureau			
	<i>Occupation d'un bureau ancien de façon dense</i>	<i>Occupation d'un bureau de façon assez dense. Obsolescence plus faible du bâti.</i>	<i>Cas d'un bureau de direction dans une tour, à durée de vie faible.</i>
emprise individuelle	12 m ² /pers	15 m ² /pers	25 m ² /pers
masse surfacique	700 kg/m ²	900 kg/m ²	1500 kg/m ²
masse rapportée à l'utilisateur	→ 8 400 kg/pers	→ 13 500 kg/pers	→ 37 500 kg/pers
durée de vie	60 ans	35 ans	25 ans
flux moyen	→ 140 kg/pers et par an	→ 386 kg/pers et par an	→ 1 500 kg/pers et par an
taux d'usage	2 200 heures par an	2 200 heures par an	2200 heures par an
taux d'usage	→ 25% du temps	→ 25% du temps	→ 25% du temps
flux équivalent	→ 600 kg/pers et par an	→ 1 500 kg/pers et par an	→ 6 000 kg/pers et par an
	→ 2 kg/pers et par jour	→ 4 kg/pers et par jour	→ 16 kg/pers et par jour
Voiture			
	<i>Voiture de petite taille en autopartage et optimisant son utilisation en covoiturage</i>	<i>Voiture de taille moyenne, utilisée quotidiennement de façon principalement individuelle</i>	<i>Voiture de grande taille, type gros SUV, remplacée au bout de trois ans et très peu utilisée.</i>
masse	1 100 kg	1 300 kg	1 800 kg
nombre moyen d'occupant	2,5	1,2	1,1
durée de vie	8 ans	5 ans	4 ans
flux moyen	→ 55 kg/pers et par an	→ 217 kg/pers et par an	→ 409 kg/pers et par an
taux d'usage	6 heures par jour	2 heures par jour	200 heures par an
taux d'usage	→ 25% du temps	→ 8% du temps	→ 2% du temps
flux équivalent	→ 200 kg/pers et par an	→ 2 600 kg/pers et par an	→ 17 900 kg/pers et par an
	→ 1 kg/pers et par jour	→ 7 kg/pers et par jour	→ 49 kg/pers et par jour
Machine à laver			
	<i>Machine à laver mutualisée entre plusieurs ménages</i>	<i>Machine à laver d'un ménage</i>	<i>Machine à laver pour une personne</i>
masse	50 kg	50 kg	70 kg
nombre moyen d'utilisateur	8	3	1
durée de vie	8 ans	10 ans	7 ans
flux moyen	→ 0,8 kg/pers et par an	→ 1,7 kg/pers et par an	→ 10,0 kg/pers et par an
taux d'usage	3 heures par semaine	3 heures par semaine	1 heures par semaine
taux d'usage	→ 2% du temps	→ 2% du temps	→ 1% du temps
flux équivalent	→ 40 kg/pers et par an	→ 90 kg/pers et par an	→ 1 680 kg/pers et par an
Perceuse			
	<i>Perceuse mutualisée entre plusieurs individus</i>	<i>Perceuse pour un ménage</i>	<i>Perceuse pour un couple</i>
masse	3 kg	3 kg	3 kg
nombre moyen d'utilisateur	10	4	2
durée de vie	10 ans	5 ans	3 ans
flux moyen	→ 0,03 kg/pers et par an	→ 0,2 kg/pers et par an	→ 0,7 kg/pers et par an
taux d'usage	30 heures par an	4 heures par an	3 heures par an
taux d'usage	→ 0,34% du temps	→ 0,05% du temps	→ 0,03% du temps
flux équivalent	→ 10 kg/pers et par an	→ 300 kg/pers et par an	→ 1 900 kg/pers et par an

#18 L'architecture renouvelable (temps VII)

Une synthèse des temps V et des temps VI, mais avec une contrainte nouvelle : l'urgence de la neutralité carbone. Les enjeux d'atténuation et de séquestration à l'échelle de l'architecture. L'adaptation et la préparation à des lendemains incertains : robustesse et résilience pour encaisser les chocs à venir.

-
- 1859 *Découverte par Arrhenius du pouvoir d'effet de serre du CO₂*
 - 1880 *Première mesure de concentration en CO₂ : 290ppm*
 - 1973 *Embargo de l'OPEP. Premier choc pétrolier*
 - 1973 *Concentration en CO₂ à cette date : 330ppm*
 - 1979 *Révolution iranienne. Second choc pétrolier.*
 - 1996 *Début du quartier Vauban à Fribourg-en-Brisgau, All.*
 - 1997 *Signature du protocole de Kyoto*
 - 2005 *Parution de Collapse: How Societies Choose to Fail or Succeed*
 - 2015 *Signature de l'Accord de Paris lors de la COP21*
 - 2016 *Concentration en CO₂ supérieure à 400ppm*
 - 2017 *Stratégie de neutralité carbone de la Ville de Paris*
-

Une nouvelle synthèse énergie-matière

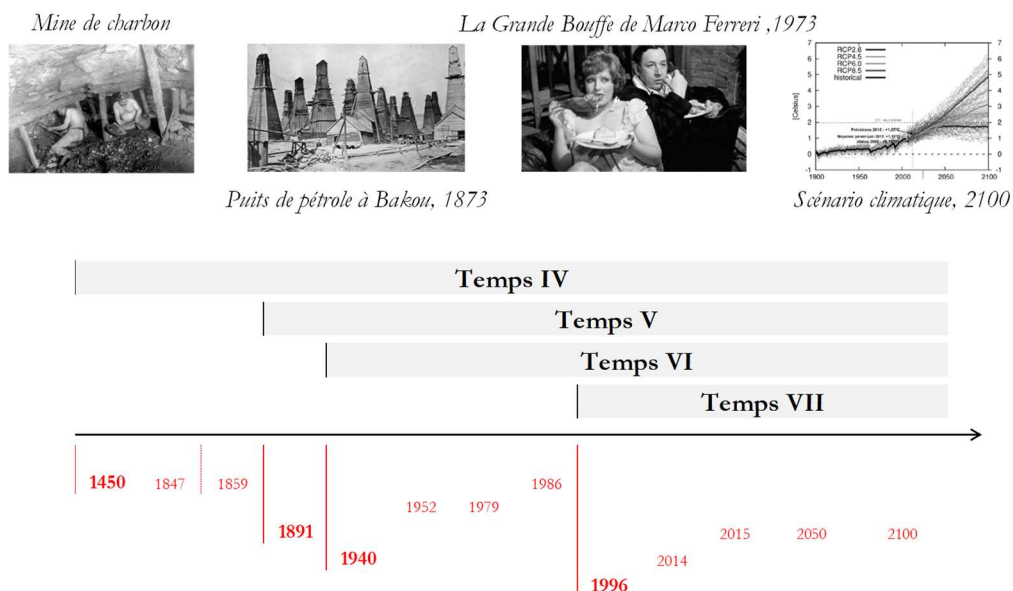
L'architecture redevenue raisonnable

Mise en perspective de quatre temps

Au terme de cette première partie, nous découvrons une architecture en état de superposition, dans quatre états distincts (Fig. 390). Elle appartient à la fois au temps IV, cette fuite en avant dans l'hypermodernité, en tournant le dos à la réalité écologique et démographique du monde, totalement aliénée par le jeu de la compétition mondiale, en quête de démonstrations de taille, de délires de démesure, de surenchères formelles, souvent avec le prétexte d'une nouvelle créativité offerte par le numérique ou d'une attractivité nécessaire du territoire (chapitre #14). Schizophrène, l'architecture poursuit aussi l'exploration du temps V, d'une architecture à la recherche de son autonomie énergétique, débarrassée des énergies fossiles, objectif devenu accessible grâce à la compétitivité récente des énergies renouvelables et devenues facilement greffables à l'architecture (#16). Enfin, elle appartient aussi au temps VI, vu au cours du chapitre précédent, cette ar-

chitecture en quête de nouvelles matérialités, investissant les matières facilement disponibles comme le bois ou la terre ou favorisant le réemploi (#17).

Fig. 390. *Superposition des 4 temps*



Une synthèse responsable

L'architecture du temps VII tourne évidemment le dos au règne éphémère des fossiles. De prime abord, elle serait une synthèse des temps V et VI, le compromis équilibré entre les exigences de l'énergie et de la matière (Fig. 391). En introduction de *L'âge des low tech*, Bihoux en préfigurait le programme [1] :

« [...] au lieu de chercher une sortie « par le haut » aux impasses environnementales et sociétales actuelles avec toujours plus d'innovation, de hautes technologies, de métiers à valeur ajoutée, de numérique, de compétitivité, de haute performance, de travail en réseau, bref de développement durable, de croissance verte et d'économie 2.0, nous devons au contraire nous orienter, au plus vite et à marche forcée, vers une société essentiellement basée sur des basses technologies, sans doute plus rudes et basiques, peut-être un peu moins performantes, mais nettement plus économes en ressources et maîtrisables localement. »

Les Strandbeest de Jansen

Dans le chapitre consacré à l'architecture-énergie au temps V (chapitre #16), nous avons évoqué les expériences d'autonomies énergétiques frugales, construites dans l'Ouest américain au tournant des années 60-70 [3]. Avec peu de matières, de géniaux architectes-bricoleurs créaient des prototypes, synthèses abouties et parfois désirables, du couple énergie-matière. Dans un domaine s'apparentant davantage à la sculpture ou à l'installation artistique, les structures contemporaines du physicien Theo Jansen illustrent d'une autre façon cette quête d'harmonie entre énergie et

Fig. 391. *Une autre façon d'exprimer le cycle énergie-matière*

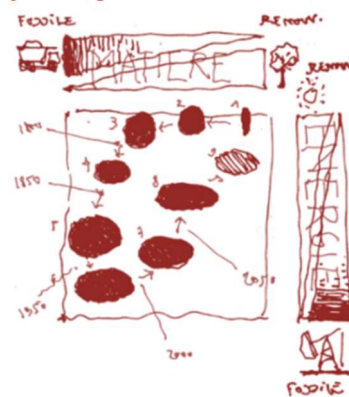


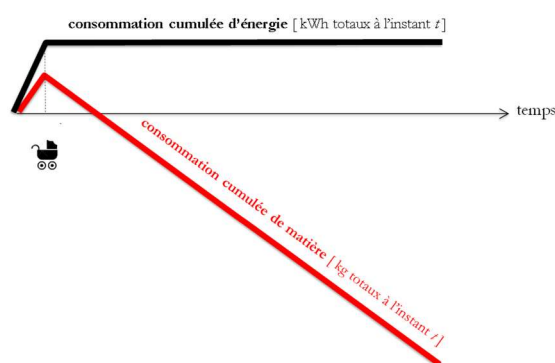
Fig. 392. *Strandbeest* de Theo Jansen

matière (Fig. 392). Ses *Strandbeest*¹, ses « animaux de plage » littéralement, sont des structures mobiles composées de tuteurs en plastique². Ce sont des cinématiques sophistiquées qui possèdent une capacité à se mouvoir de façon autonome, en récupérant l'énergie du vent, puis en la stockant sous forme d'air pressurisé dans des bouteilles plastiques récupérées. Jansen³ invente été fabrique des robots analogiques. Il est un Jacques Vaucanson⁴ contemporain, avec le souci d'une économie de matériaux. Physicien de formation, Jansen utilise aussi la conception numérique pour ses squelettes cinétiques, et plus particulièrement pour la mise au point savante des pattes de la plupart de ses *Strandbeest*.

Et si l'on parvenait à convertir tout le flot d'exergie solaire ?

Le Solar Sinter de Kayser

Hors de l'architecture canonique encore, le *Solar Sinter* est une installation de Markus Kayser, un étudiant du Royal College of Art. Ce projet démontre les capacités d'autosuffisance en énergie et en matière avec une expérience a priori simple (Fig. 393). Le *Solar Sinter* permet de créer des objets tridimensionnels, en plein désert, en exploitant uniquement le soleil et le sable. Kayser a créé le premier *fablab* du désert, une imprimante 3D se nourrissant exclusivement de sable (la matière primaire) et de soleil (l'énergie locale). Le dispositif se compose de panneaux photovoltaïques et d'une lentille de Fresnel, destinée à concentrer la lumière de sorte à transformer le sable en verre. Le tout est combiné à un logiciel qui permet de déterminer la forme de l'objet à créer et à piloter la position du point focal sur le plateau, nappé d'une pellicule de sable. La lentille de Fresnel est un exemple de concentration optique surfacique permettant d'atteindre une température au foyer de loupe autorisant la liquéfaction du sable (#13).

Fig. 393. *Solar Sinter*, Markus KayserFig. 394. *Le Solar Sinter* de Markus Kayser et son chronogramme énergie-matière

¹ Découvert lors de l'Exposition Lille 3000 en 2003.

² Normalement dévolus à l'horticulture.

³ Avec Maurizio Brocato, nous avons mené des expériences pédagogiques avec les étudiants lors des Atelier Design à l'EAV&T et aux Ponts, les « Ma(r)chines »

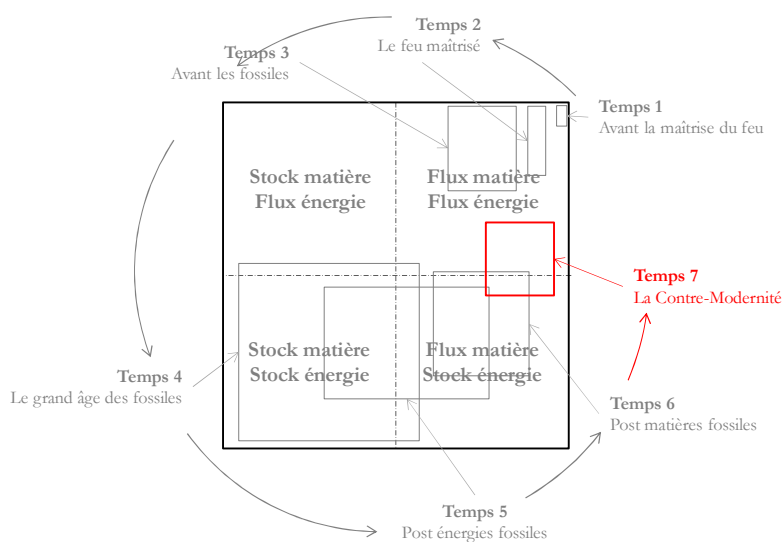
⁴ Jacques Vaucanson, né le 24 février 1709 à Grenoble et mort le 21 novembre 1782 à Paris, est un inventeur et mécanicien d'automates.

Avec cette démonstration, l'installation de Kayser permet de spéculer sur une utopie constructive, celle de robots se nourrissant de ressources renouvelables¹ et pouvant générer toute sorte de formes, sous réserve que nous en fournissions le génome formel (Fig. 394). À terme, ces machines savantes auto-construiraient leur propre descendance. Et comme sous-espèce de cette prolifération ressemblant étrangement à celle du vivant, des panneaux solaires donneraient naissance à des panneaux solaires.

L'aboutissement du temps *V*

Le projet de Kayser évoque l'un des meilleurs films traitant des limites écologiques, interrogeant les enjeux de la taille et des dimensions. Le dessin animé *Wall-e* (2008) est une véritable merveille, à commencer par ses premières minutes en silence. Le petit robot cubique, de quelques décimètres sans doute, uniquement nourri d'un peu d'énergie solaire avec son petit panneau solaire, raisonne, organise son plan quotidien pour compacter et ranger méthodiquement les murs monstrueux de détritux [4]. Les dimensions « hors d'échelle » des amoncellements que *Wall-e* a traité laisse comprendre le temps qu'il a déjà consacré à sa tâche. Alors, n'en déplaise à Bihouix [1], Fressoz ou Bonneuil [5], imaginons une *wild card* technique, une technologie qui nous sauve, comme des panneaux solaires à très haut rendement² et dont la dette constructive serait très faible. Alors le grand tri de la matière deviendrait presque possible. Inspirés par cette utopie technologique, à quoi ressembleraient les objets de mobilité si une technologie permettait de filtrer l'intégrale de l'exergie contenu dans le flux solaire³ ?

Fig. 395. *Le temps VII où la fin d'un cycle et le départ d'un nouveau fondé sur une architecture des flux et non des stocks*



¹ Le sable des dunes l'est davantage que celui des estuaires et des fonds marins.

² Smil rappelle les exploits de rendement des dernières technologies photovoltaïques. Des records par Sharp à 44,4% alors dans les années 2010, le flux moyen de production surfacique était compris entre 5 et 10 W_e/m^2

³ Ce serait par exemple un objet roulant de la taille d'une voiture qui pourrait récupérer jusqu'à 6kW de puissance, un objet volant de 30 mètres d'envergure capable de récupérer 100kW. On pourrait assurément voyager, mu par le soleil.

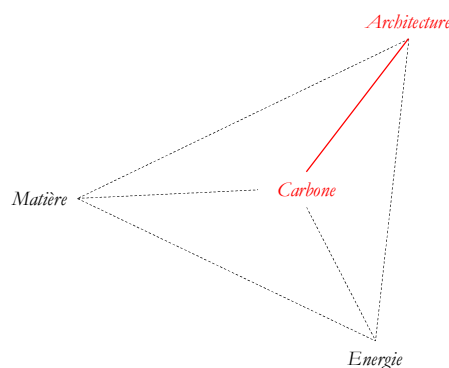
L'architecture carbone

Enjeux de la neutralité carbone

Architecture du réchauffement climatique

L'architecture renouvelable serait donc davantage que la synthèse raisonnée, le savant compromis entre l'architecture-énergie du temps V (chapitre #16) et l'architecture-matière au temps VI (#17). De fait, son existence est conditionnée par le réchauffement climatique et les nouvelles contraintes que celui-ci induit (#2). Alors que l'architecture-énergie s'adapte à la disponibilité du gisement solaire, tandis que l'architecture-matière dialogue et négocie avec la gravité, l'architecture renouvelable scrute nerveusement le taux de concentration en CO₂ dans l'atmosphère ; l'architecture du temps VII se prépare à des lendemains très incertains (Fig. 396).

Fig. 396. *L'architecture renouvelable du temps VII comme l'unité retrouvée et l'équilibre conscient avec les contraintes énergie et matière.*



Démanteler le monde fossile, l'architecture post-COP21

L'article consacré aux « constantes de l'architecture » précise les enjeux du réchauffement global et l'objectif de neutralité carbone à atteindre d'ici 2050 (chapitre #19). La nullité des émissions anthropiques des gaz à effet de serre vers 2050, puis des émissions négatives pour la seconde moitié du siècle, sont les conditions nécessaires pour éviter le point de non-retour, celui du dépassement des 2°C en 2100¹. Selon cette contrainte planétaire, comment cet objectif se décline-t-il aux paysages bâtis et à toutes échelles d'intervention ? (#22) Quelles architectures permettraient d'inverser le résultat de plus de deux siècles de transformation, d'édifices massivement émetteurs de gaz à effet de serre, transformés à présent en des constructions qui sur la totalité de leur cycle de vie séquestre du carbone atmosphérique ? Comment transformer - voire démanteler - un monde construit et gouverné par l'économie fossile et la furie thermo-industrielle ? Qu'est-ce qui définit, qui donne les clés pour concevoir une *construction*

¹ D'une augmentation de la température globale par rapport à l'ère préindustrielle datée en 1880.

positive, au sens où sa dette carbone sera nécessairement remboursée au cours de sa durée de vie ?

L'architecture, Fort Knox à CO₂

L'architecture peut-elle être négative en carbone ? Si l'on traduit l'objectif de neutralité carbone dans un horizon de trente ans, si l'on applique ensuite la nécessité d'émissions négatives avant la fin du siècle, et si l'on considère que les forêts bien gérées sont l'essentiel de la solution, l'architecture est alors le réceptacle privilégié du torrent de matières ligneuses qu'il sera nécessaire de stocker aussi longtemps que possible pour garantir une neutralité planétaire.

« La seule technologie qui fonctionne face au réchauffement climatique, c'est la photosynthèse. [...] Cette réflexion est importante, car elle impose de réfléchir au bassin versant de chaque architecture : quand vous voyez un immeuble de 5 niveaux, quel est son miroir écologique ? Pour les immeubles de construction bois, les choses sont simples : pour chaque mètre carré construit, il faut 10 mètres carrés de forêts qui ont pompé du carbone en permanence pendant des années.»¹

L'architecture du temps VII est l'espace de stockage de matières emprisonnant du carbone (Fig. 397). L'architecture renouvelable est le tombeau du CO₂ atmosphérique. Elle est l'indulgence, utile et plaisante, des combustions fossiles du passé. En surface, comme dans ses soubassements, l'architecture du temps VII piège à nouveau le carbone qui était, il y a deux siècles tout au plus, emprisonné dans les énergies fossiles, dans les profondeurs des sous-sols. Chaque mètre-cube de la matière constituant cette architecture pourrait stocker l'équivalent d'une tonne de CO₂. Une maison du temps VII devrait ainsi stocker près de 50 mètres cube de biomasse soit presque 50 tonnes de CO₂.

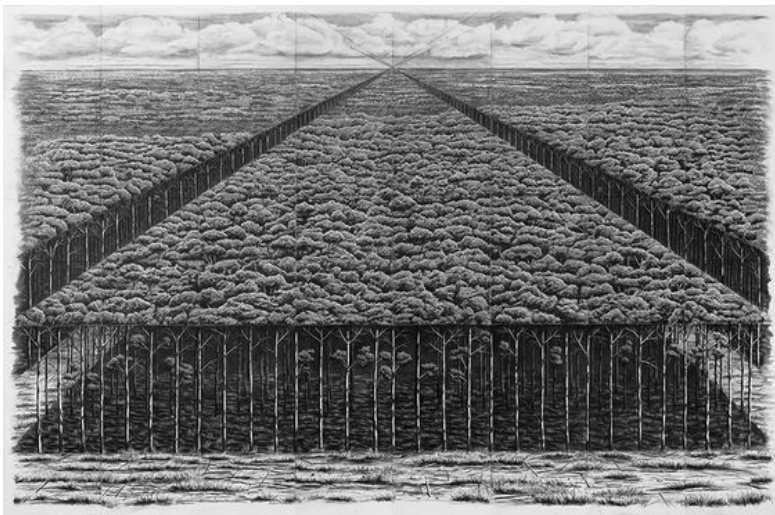


Fig. 397. Les poutres du 41 rue Meslay. Du bois de second choix d'un édifice construit fin 19^{ème} siècle. Ces poutres sont sans doute le fruit d'un réemploi précédent (cf. « Construire à la parisienne »). Il est possible que le carbone séquestré dans ses poutres puisse avoir quelques siècles.

Fig. 398. Manufacturing nature par Michael Amery

¹ RM, extrait d'une interview pour *Woodrise Paper*, septembre 2017

Neutraliser l'édification

L'âge du bois

L'architecture renouvelable use, voire abuse, du bois, ce polymère, cette matière qui pousse et qui piège le carbone contenu dans notre atmosphère. Le bois¹ est un savant tissage organisé par le vivant nourri d'énergie solaire (Fig. 398). La matière bois est une triple opportunité : elle est un puits de carbone, elle se fabrique à partir du soleil et elle est intrinsèquement renouvelable [2]. Le 19^{ème} siècle était l'âge de la fonte et de l'acier (chapitre #12) ; le 20^{ème} siècle, la grande aventure du béton (#14). Notre siècle sera celui du bois et des fibres végétales, si nous voulons donner toutes nos chances au non-emballement climatique (#29). De façon emphatique, l'architecture du temps VII peut sauver le vivant en évitant la catastrophe climatique.

Empreintes comparées

En amont du flux de cette nouvelle architecture, un hectare de forêt, durablement exploitée, produit annuellement de trois à cinq mètres-cubes de bois, et autant de tonnes de CO₂ qui seront stockées dans ces volumes de matières. On pourrait penser que la neutralité réside dans la compensation. Comme premier exemple, et pour apprécier l'étendue spatiale du puits carbone nécessaire - ou la taille typique du « bassin versant carbone » -, nous évaluons la surface de forêt nécessaire permettant de « repomper » les émissions d'une architecture-fossile, de type temps IV. Selon cette hypothèse, quelle serait l'amplification de surface nécessaire, la surface de forêts permettant de rendre neutre cet édifice, au moins sur sa part de carbone gris ?

Une amplification de 300 pour une architecture fossile

Considérons une valeur nominale de 1500kg de CO₂ par m² construit ; amortis sur 30 ans, ils représentent 50kg émis annuellement. Nous estimons ses émissions d'exploitation² à 70kg annuels de CO₂ par m². Ce qui porte le total à 120kg annuels. Plus de 300 m² de forêts seraient mobilisées pour absorber la quantité équivalente de carbone atmosphérique émis par mètre-carré. Le facteur d'empreinte de l'architecture-fossile - du temps IV - est d'environ 300. Une maison nécessiterait près de quatre hectares de forêts.

Une amplification de 50 pour une architecture bas carbone

À l'inverse, une architecture bas carbone³ émettrait 750kg de CO₂ par mètre-carré édifié [6], soit la moitié du cas précédent. Mieux construite et plus pérenne, sa durée de vie est plus longue et les émissions amorties sur 50 ans conduisent à 15kg annuels par unité de surface. En usage, ses émissions sont contenues à 5kg annuels de CO₂ par m². Ce qui porte le total à

Fig. 399. *Empreintes comparées entre une architecture fossile (facteur 300) et une architecture bas carbone (facteur 50). L'architecture du temps VII devra encore réduire cette empreinte.*



¹ Et plus généralement la matière végétale.

² Correspondant par exemple à 200kWh par m² et par an et une intensité carbone d'environ 350grCO₂eq par kWh.

³ Qui se conformerait aux valeurs décrites dans le label BBCA ou à la démarche E+C-.

20kg annuels. Selon ces hypothèses, 50m² de forêts seraient mobilisées pour absorber la quantité équivalente de carbone atmosphérique émis par mètre-carré d'architecture bas carbone, qui sont les prémices de l'architecture renouvelable, celle du temps VII (Fig. 399).

Ébauche de faisabilité nationale

Le rapport entre les deux empreintes spatiales, le ratio entre les deux « bassins versants carbone » atteint un facteur six, valeur considérable, car elle questionne les densités critiques de neutralité (#22). Quels scénarios sont faisables, par exemple à l'échelle de la France ? Pour chaque citoyen, on compte près d'un quart d'hectare de forêt¹, soit le potentiel de compensation de 50m² d'une architecture bas carbone. Cette valeur est sans doute plus faible que nos emprises moyennes totale dans le bâti, sans doute plus proche des 70m² [7]. Cela supposerait que la totalité de la surface de forêt française soit exclusivement affectée à la compensation du secteur du bâtiment. Comment compenser alors le reste des autres émissions ? L'architecture du temps VII doit donc faire davantage qu'une architecture bas carbone.

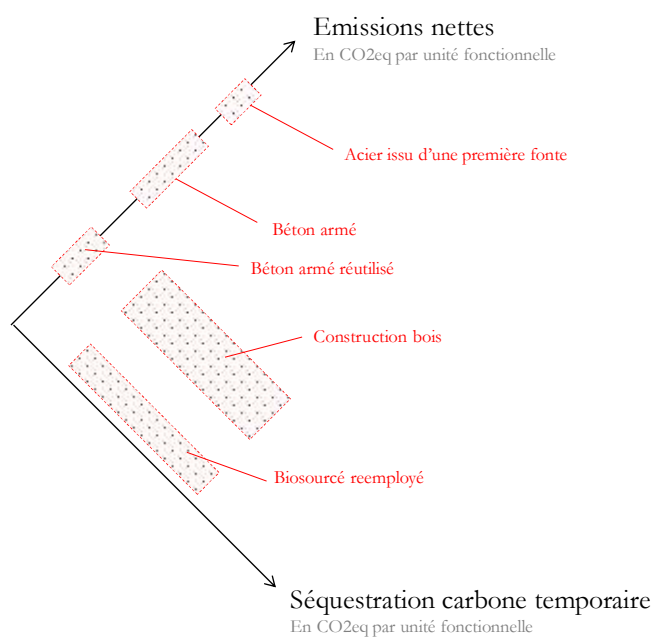


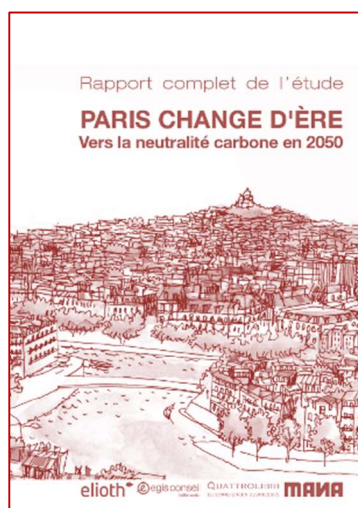
Fig. 400. *Diagramme émissions nettes et séquestration. Peut donner lire à la nullité des émissions du bois par exemple, ce qui est partiellement erroné : le stock carbone du bois est temporaire*

¹ 16,9 millions d'hectare recensés en France métropolitaine et 64 millions de Français habitant en métropole

Le torrent de la séquestration

La forêt sera l'un des aménagements indispensables pour rendre possible la neutralité, puis l'horizon d'émissions négatives à terme. Or, la contrainte induite par la neutralité engendre un flot considérable de matières ligneuses, à stocker durablement, et difficilement absorbable uniquement par le bâtiment. En effet, en se figurant une architecture massivement en bois, en considérant que chaque mètre-carré réclame environ $0,3 \text{ m}^3$ de bois - l'équivalent d'une épaisseur moyenne d'une trentaine de centimètres, cumul des planchers et des éléments verticaux -, que la durée de vie moyenne est de 50 ans, qu'un hectare de forêt produit sur 50 ans environ 250 m^3 de bois, pour chaque mètre-carré d'architecture, il y aura donc dix mètre-carré de forêt. En s'appuyant sur les chiffres de la forêt française, et donc le quart d'hectare de forêts par Français, la surface potentiellement bâtie serait plutôt de 150^1 m^2 par citoyen ! Le débit de la matière (environ 70 m^2) est donc inférieur à celui nécessaire à la compensation carbone (Fig. 400).

Fig. 401. *Rapport Paris change d'ère*



En épousant par exemple la stratégie de neutralité que nous avons décrite dans *Paris change d'ère* (2016) [8] (Fig. 401), pour des Parisiens passés à deux tonnes en 2050, ils seront livrés chaque année de l'équivalent de deux mètres-cube de matières biosourcées. Étalés sur les 100 km^2 de l'emprise parisienne, c'est la surface parisienne qui croîtrait annuellement de quatre centimètres. Ce torrent de matières renouvelables est trop important pour le cycle de vie de l'architecture. L'infrastructure devra aussi massivement utiliser le bois, les énergies renouvelables aussi. Nous ferons sinon des montagnes de bois, des maçonneries tectoniques, des Guizhè de la séquestration carbone.

Exemple de l'édicule de l'entrée de métro

En 2016, nous décidions d'appliquer ce résultat théorique à un cas concret, celui d'une construction bas carbone recourant massivement à la construction bois. Ce projet de couverture s'inscrit dans la démarche de la Ville de Paris visant à promouvoir le réemploi et l'emploi des matériaux biosourcés. Elioth et 169-architecture ont défini des principes de mise en œuvre permettant de limiter l'impact carbone de cet édifice (#29). La structure porteuse de la couverture, dont la portée maximale est de 16 mètres, est réalisée en mélèze lamellé-collé. Sur la base des ratios disponibles de l'INIES, les émissions de CO_2 de cet édifice ont été estimées et révèlent des valeurs extrêmement performantes : moins de $70 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. par m}^2$ de couverture (et sans prendre en compte le stock carbone provisoire s'établissant lui, à plus $100 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. par m}^2$ couvert).

¹ $0,25 \text{ hectare} \times 50 \text{ ans} \times 4 \text{ m}^3 \text{ par hectare et par an} = 50 \text{ m}^3 \text{ de bois} \sim 150 \text{ m}^2$

L'architecture résiliente

L'architecture du changement climatique

Retro-feedback

Nous avons vu que le temps VII est la conséquence du temps IV, de l'histoire des combustions cumulées d'hydrocarbures depuis plus de deux siècles, de notre addiction et de notre perte de contrôle avec l'embrassement thermo-industriel. Depuis à peine dix générations, la libération à grande échelle du carbone, piégé depuis la nuit des temps dans nos sols, ce changement d'état à très grande échelle de la matière par les hommes, a engendré une modification critique de la composition gazeuse de notre atmosphère. De manière synthétique, le chaînage est le suivant : nos consommations d'énergie du passé ont induit une modification de la composition de l'atmosphère, modifiant à son tour le bilan thermique de la Terre, forçant ensuite une élévation de température (Fig. 402).



Fig. 402. *Évolution de la température moyenne mondiale, James Hansen & Makiko Sato.*

L'architecture renouvelable s'insère dans cette chaîne et doit maintenant résister aux conséquences du réchauffement climatique, et à l'ensembles des futurs incertains que cette modification sans précédent engendre.

énergie → matière → énergie → température

L'architecture post-400ppm

« C'est ce qui se passe quand vous ajoutez de la chaleur à un système : il vous la rend sous forme d'inondations, de vent et de feu, résume Bill McKibben, le fondateur du mouvement de lutte contre le changement climatique 350.org. Après les dix mille ans qu'a duré l'holocène, nous sommes désormais sur une planète différente. Et la première leçon à tirer de tout cela est de ne pas aller plus loin dans la même direction. »¹

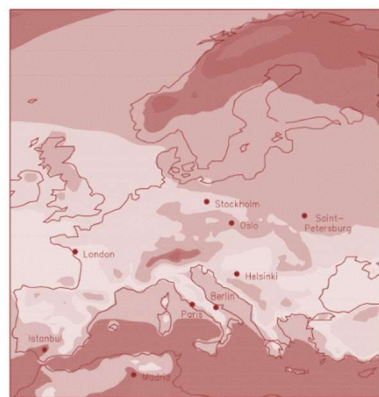
Fig. 403. *Inondations post Irma, 2017*



De fait, à une échéance extrêmement courte, l'architecture et ses habitants seront soumis à une multitude de chocs : augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes, inondations et risques naturels accrues, modification de la faune et de la flore, migrations humaines et modifications rapides des besoins et des usages (Fig. 403)... Dans *Les limites de la croissance* [9], les auteurs introduisent une distinction entre « intrants » et « exutoires ». Le recensement et la quantification de chacun d'eux fournissent les conditions aux limites du système ; cette vision systémique sera reprise quelques années plus tard par Joël de Rosnay dans *Le Macrocosome* [10]. Parmi la variété des pollutions induites par les activités humaines, un exutoire particulier, les gaz à effet de serre impact directement et de façon prépondérante les modifications des caractéristiques spectrophotométriques de l'atmosphère. Parmi les gaz à effet de serre issus des activités humaines, il y a évidemment le dioxyde de carbone (ou CO₂), produit de la combustion de la biomasse et plus particulièrement des hydrocarbures ; nous connaissons aussi le méthane, généré notamment par l'agriculture et plus particulièrement l'élevage. Les gaz à effet de serre induisent une transformation du bilan énergétique terrestre, ce dernier induisant une évolution beaucoup trop rapide des climats (#19).

De la nécessité d'être contextuel : bouger dans l'espace

Fig. 404. *Extrait de la carte de Kopf, Hallegatte et Ha-Duong.*



Avant de se projeter dans le temps, le déplacement selon les géographies permet aussi d'appréhender les futurs, d'évaluer la sensibilité de l'architecture et des aménagements aux changements à venir. L'espace à la place du temps, c'est un tour de passe-passe pédagogique que Kopf, Hallegatte et Ha-Duong avaient utilisé pour alerter et illustrer l'évolution possible des climats en Europe au cours de ce siècle (Fig. 404). Dans le futur, le climat de Paris risque en effet de ressembler davantage à celui de Rome. Pour compléter cette analyse, et sur la base du ClimElioth, j'avais testé la réaction climatique et énergétique d'un même objet architectural, plongé dans une variété d'environnements climatiques. Les pyramides énergie-climat ci-après synthétisent les résultats de simulations thermiques dynamiques d'une même tour de bureaux, selon différents climats [11]. L'histogramme de gauche exhibe la demande froide ainsi que la demande chaude (en kWh thermiques utiles par m² et par an). La pyramide centrale additionne ces deux demandes et agrège les besoins thermiques nécessaires à l'amortissement de l'inconfort de l'ambiance extérieure : elle indique l'intensité du recours à un contrôle actif de l'ambiance intérieure. Pour mieux apprécier

¹ http://www.lemonde.fr/planete/article/2017/09/08/la-planete-subit-de-plein-fouet-le-dereglement-climatique_5182566_3244.html

la dépendance à la géographie, la couleur de chaque barre est associée à la latitude du site, le beige correspondant à des latitudes proches de l'équateur, tandis que le bleu correspond aux latitudes se rapprochant des pôles. Les villes situées à proximité de l'équateur apparaissent globalement défavorisées (Fig. 405).

Fig. 405. *Histogrammes climatiques. En bleu et en kilowattheures utiles de froid par mètre-carré et par an. En rouge et en kilowattheures utiles de chaleur par mètre-carré et par an. Résultats du ClimElioth, traités sous le logiciel Tableau.*

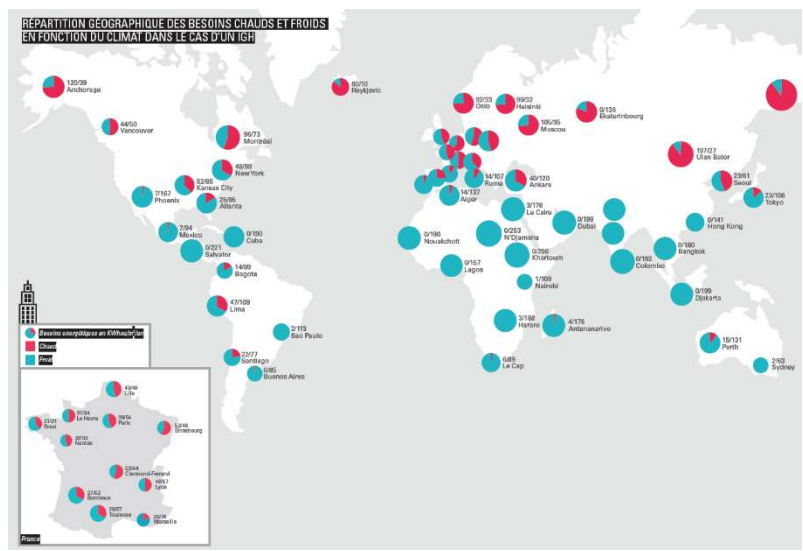
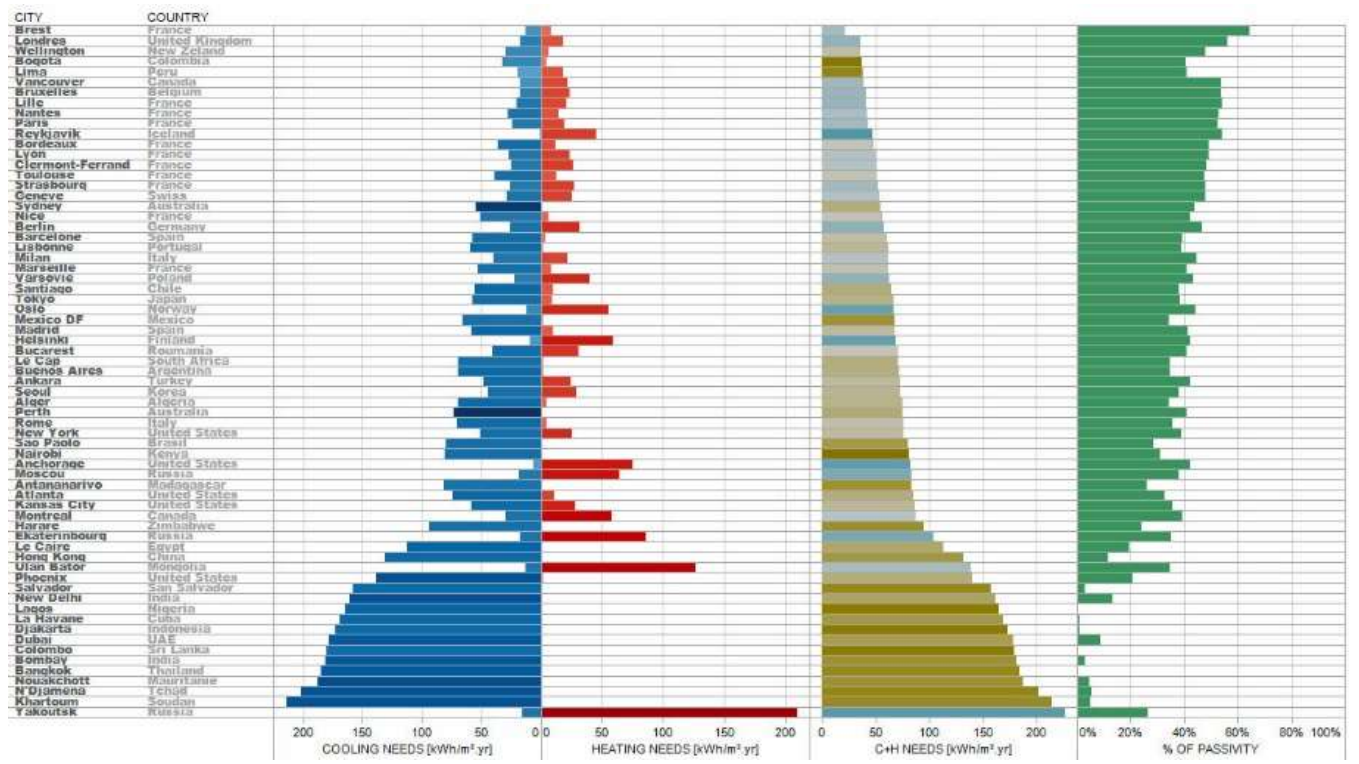


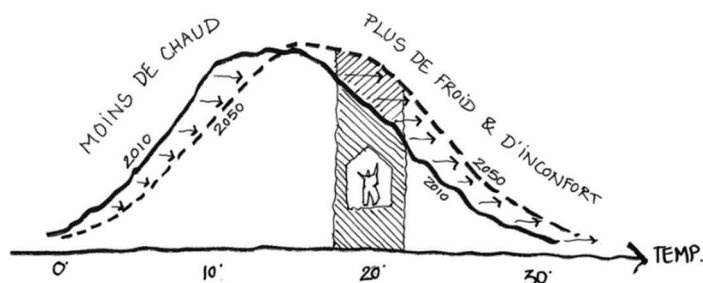
Fig. 406. *Mappemonde de la nature des besoins thermiques d'une même tour de bureaux plongée dans différents climats. Répartition entre les besoins thermiques de rafraîchissement (en bleu) et de chaud (en rouge)*

L'histogramme (Fig. 405) correspond au pourcentage de passivité du bâti, c'est-à-dire au ratio de temps d'utilisation pendant lequel l'édifice ne réclame ni chaleur ni fraîcheur pour maintenir les températures de consigne intérieure comprise entre 21 et 25 degrés Celsius. Cet exercice révèle donc déjà la grande sensibilité de l'objet architectural aux climats (Fig. 406) ; il permet de quantifier la volatilité des demandes thermiques selon les conditions de l'environnement extérieur à l'architecture [11].

Shift des températures et réponses énergétiques

En reprenant la carte de Hallegate et al., et si le climat de Paris devient proche de celui de Rome¹, on s'attend à ce que nos besoins de chauffage diminuent, tandis que nous risquons davantage souffrir de la chaleur en été [12] (Fig. 407). Est-ce que les immeubles des rues de Paris s'équiperont de climatisation individuelle comme dans ses photos prises à Athènes ? Après *Vider Paris* par l'artiste Nicolas Moulin, doit-on préfigurer un « Remplir Paris de *splits* » comme dans ces visions préparées par Elioth pour un Paris de 2046 ? (Fig. 408) Ou demain des champs d'oliviers dans région lilloise ? (Fig. 408). Pour les pays occidentaux, n'oublions pas le vieillissement de la population, et donc la sensibilité accrue aux variations de température² et ses conséquences probables en termes de santé publique.

Fig. 407. *Shift des températures et des statistiques typiques de répartition du fait du changement climatique.*



L'architecture qui transforme le climat local

L'architecture du temps VII sera donc un abri s'adaptant au changement climatique. À une plus grande échelle, l'urbanisme du temps VII anticipera des lieux, refuges climatiques, résilients et permettant une autonomie complète des besoins humains fondamentaux sur une certaine période de temps. De façon globale, les concepteurs et les parties prenantes de l'acte de construire auront compris l'importance des répartitions contextuelles et anticipées entre les surface minérales, l'intégration des plans d'eau et du végétal comme puissants leviers pour amortir les variations climatiques. Pour limiter les effets d'îlot de chaleur urbain, pour participer à la réduction du forçage radiatif global (#19) et en travaillant sur l'albédo des faces

¹ Au sens d'une métrique climatique.

² Avec l'âge le corps éprouve plus de difficultés pour s'adapter

exposées de l'objet, les constructions du temps VII seront bien plus résistantes aux moments critiques de chaleur. L'architecture saura refuser opportunément le feu solaire, renvoyer vers l'atmosphère les flux ardents en centaines de watts par mètre-carré (#27). Les espaces du temps VII seront à albédo variable, les prémices d'une géo-ingénierie passive renforçant les apports solaires en situation hivernale mais capable de repousser le rayonnement aux périodes critiques.

Le stress-test comme protocole de projet

De façon pratique, pour évaluer la robustesse de tout projet, il sera nécessaire d'analyser la pluralité des conditions locales : sa géologie, son hydrologie, la composition de sa biodiversité, son climat et les risques naturels potentiels. L'architecte du temps VII se projettera naturellement dans la perspective du moyen terme. Il aura le réflexe de dénicher les scénarios robustes de projections des évolutions des températures à l'échelle de la durée de vie estimée du projet. Il s'interrogera sur les conséquences de ces variations sur la demande thermique de son projet. Concernant les énergies renouvelables intégrées au projet, il évaluera aussi l'impact des évolutions climatiques sur les productions futures. De façon essentielle, l'architecture du temps VII aura idéalement découplé la question du confort et de la demande énergétique (Fig. 409). Elle sera reconfigurable et conviviale.

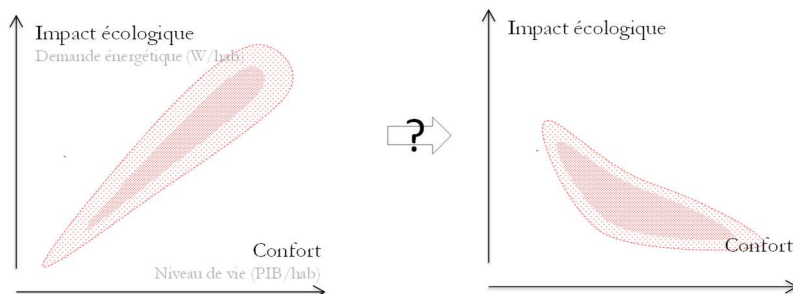


Fig. 408. *Lille d'Olive, vendue sur le marché en 2047, à proximité du Duc de Lille dans le quartier de la Renaissance des Fabriques. 169, Obras et Elioth. Dessin, Diane Berg.*



Fig. 409. *Le changement de paradigme sur la relation entre confort et impact écologique : et si l'architecture du temps VII était celle du découplage entre bien-être et impact écologique ? Le confort doit-il nécessairement supposer des désordres dans l'environnement ?*

La robustas vitruvienne en question

Le changement climatique pose des questions déterminantes sur la pérennité des futures constructions. Au cours des prochaines décades, la vitesse de transformation des climats et des biotopes sera sans précédent. Une accélération de la mue des paysages, des ruptures dans les rythmes météorologiques typiques : l'architecture va traverser - avec l'humanité en son sein - le « mur du climat ». À l'orée de ce précipice, quelques instants avant, un dilemme se pose.

Constructions légères (réponse A)

Doit-on en effet concevoir et construire de façon légère, pour une durée de temps brève, pour ensuite à nouveau construire, de façon adaptée au climat qui se sera « révélé », selon l'exemple de l'architecture japonaise tra-

ditionnelle (chapitre #5) ? Ce serait alors une architecture adaptative, incertaine du lendemain. Les « mises énergie-matière » dédiées à l'édification (ou à la transformation des existants) seraient congrues et les temps de vie attendus limités.

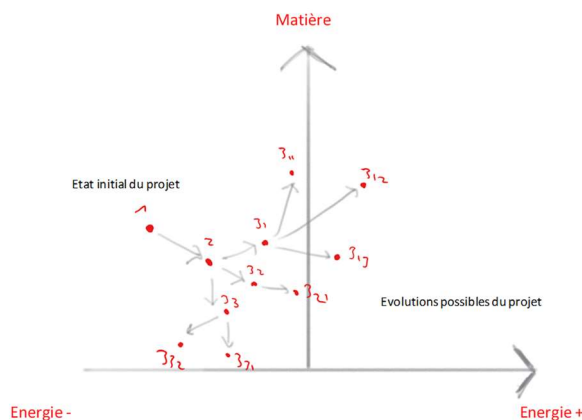
Robustesse pour la grande échelle (réponse B)

Doit-on au contraire construire une architecture robuste, solide, apte à résister à des événements imprévus, à des phénomènes météorologiques probablement plus violents. Cela réclame assurément un surdimensionnement de la matière, en prenant des sécurités nécessaires sur les efforts de dimensionnement au vent, en protégeant davantage les constructions vis-à-vis des inondations ou de submersions potentielles... L'ensemble de ces précautions auront évidemment des incidences sur les externalités environnementales d'un projet, qui sera nécessairement plus consommateur de matières, mais aussi d'énergie pour l'édification ou la transformation d'un existant. L'architecture du temps VII serait-elle encore plus intense en CO₂ ?

Point critique

Face à ses lendemains très incertains, à la rupture historique de la permanence des climats, l'architecture du temps VII touche le domaine des probabilités, elle convoque une dimension assurantielle dans la façon de conduire l'acte de conception. Cette sophistication intellectuelle est sans doute appropriée à des projets de grande échelle (réponse B). L'approche précédente, plus légère, plus instinctive, plus conviviale semble en revanche plus appropriée pour les constructions courantes (réponse A). Ainsi, l'architecture du temps VII engendrerait une bifurcation conceptuelle, le changement climatique serait en quelque sorte un « point critique » [14], opposant deux stratégies antagonistes, entre d'un côté des artefacts génériques, nombreux, de petites échelles, conçus pour un temps court (A) ; à l'opposé, des architectures, des infrastructures, des aménagements de grande échelle, réclamant un soin tout particulier dans leur conception, une méthodologie rigoureuse de l'identification des risques pour des durées de vie importantes (B).

Fig. 410. *Cheminement possible au cours de la conception d'un édifice. Les bifurcations des choix, la recherche d'un optimum de l'art de construire selon le crible énergie-matière.*



L'architecture de survie

L'architecture absorbant les chocs

À l'extrémité du scénario, ultime point de non-retour, et comme achèvement du principe de précaution, l'architecture du temps VII anticipera un dépassement des deux degrés en 2100. Idéalement, elle serait conçue selon les déclinaisons locales des prospectives climatiques les plus impactantes, comme un réchauffement global ayant largement dépassé les +4°C en 2100. Avant cette échéance, il est clair que l'accélération du dérèglement se sera manifestée dès les années 2020-2030. L'architecture du temps VII sera obligatoirement adaptative et réparable si l'on en croit Bonneuil et Fressoz [5] :

« L'Anthropocène, c'est le signe de notre puissance, mais aussi de notre impuissance. C'est une Terre dont l'atmosphère est altérée par les 1400 milliards de tonnes de CO₂ que nous y avons déversées en brûlant charbon et pétrole. C'est un tissu vivant appauvri et artificialisé, imprégné par une foule de nouvelles molécules chimiques de synthèse qui modifient jusqu'à notre descendance. C'est un monde plus chaud et plus lourd de risques et de catastrophes, avec un couvert glaciaire réduit, des mers plus hautes, des climats déréglés. »

Vers un collapsologie de l'architecture¹ ?

Les auteurs poursuivent [5] :

« Penser l'Anthropocène, c'est enfin abandonner l'espoir d'une « sortie de crise ». La crise est derrière nous, dans ce moment bref et exceptionnel de croissance industrielle. L'Anthropocène est un point de non-retour. Il faut donc apprendre à y survivre, c'est-à-dire stabiliser le système Terre dans un état tant soit peu habitable et résilient, limitant la fréquence des catastrophes, source de misère humaine [...]. »

Olivier Rey [16] confirme aussi la désolation de Meadows :

*« Dennis Meadows, un des principaux rédacteurs du rapport *The Limits to Growth*, estime que si des mesures avaient été prises à temps, si la trajectoire de développement avait été infléchie à partir des années 1970, le choc contre le mur des nécessités aurait pu être évité. Il n'en pas été ainsi et, selon Meadows, le choc n'est aujourd'hui plus évitable. »*

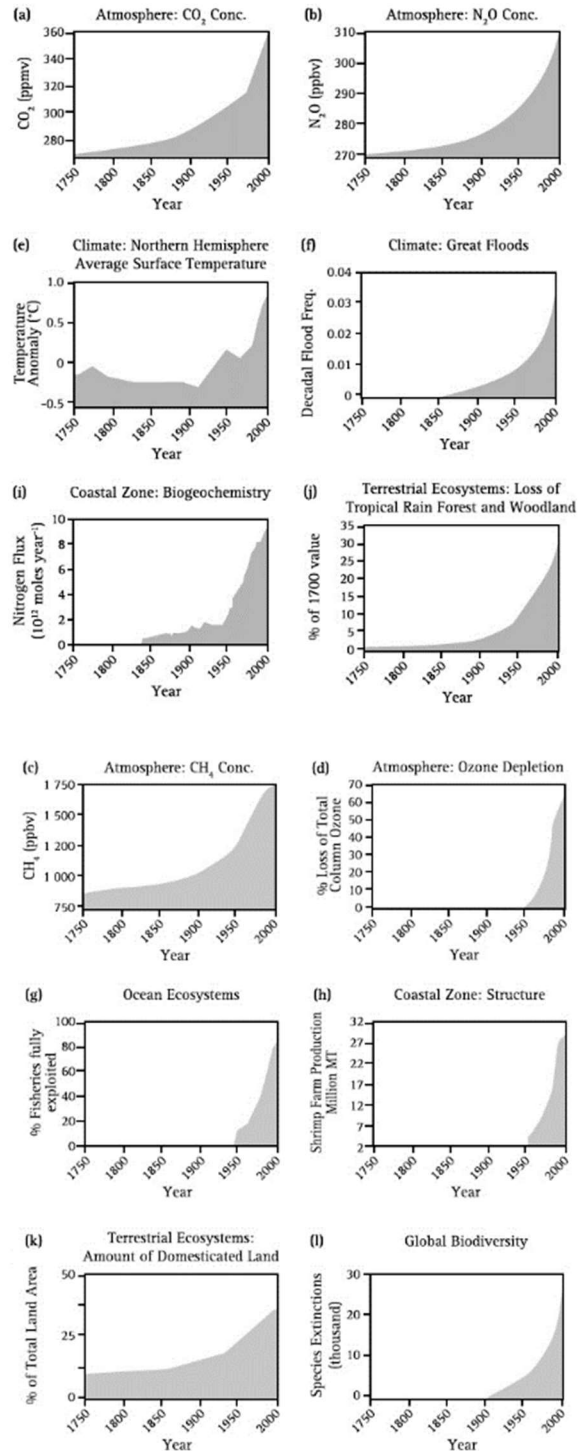
« Il est trop tard pour le développement durable, il faut se préparer aux chocs et construire dans l'urgence des petits systèmes résilients. »²

La première partie s'achève sur cet horizon, tandis que la deuxième partie « *Éléments d'architectures renouvelables* » proposera des chapitres plus techniques, permettant d'aller plus loin sur les aspects quantitatifs du temps VII, ce nouveau paradigme de soutenabilité, intégrant les contingences de l'urgence climatique.

¹ Le site collapsologie.fr de *Comment tout peut s'effondrer*, par Servigne et Stevens.

² Meadows

Fig. 411. Un extrait du tableau de bord de l'Anthropocène.



Bibliographie

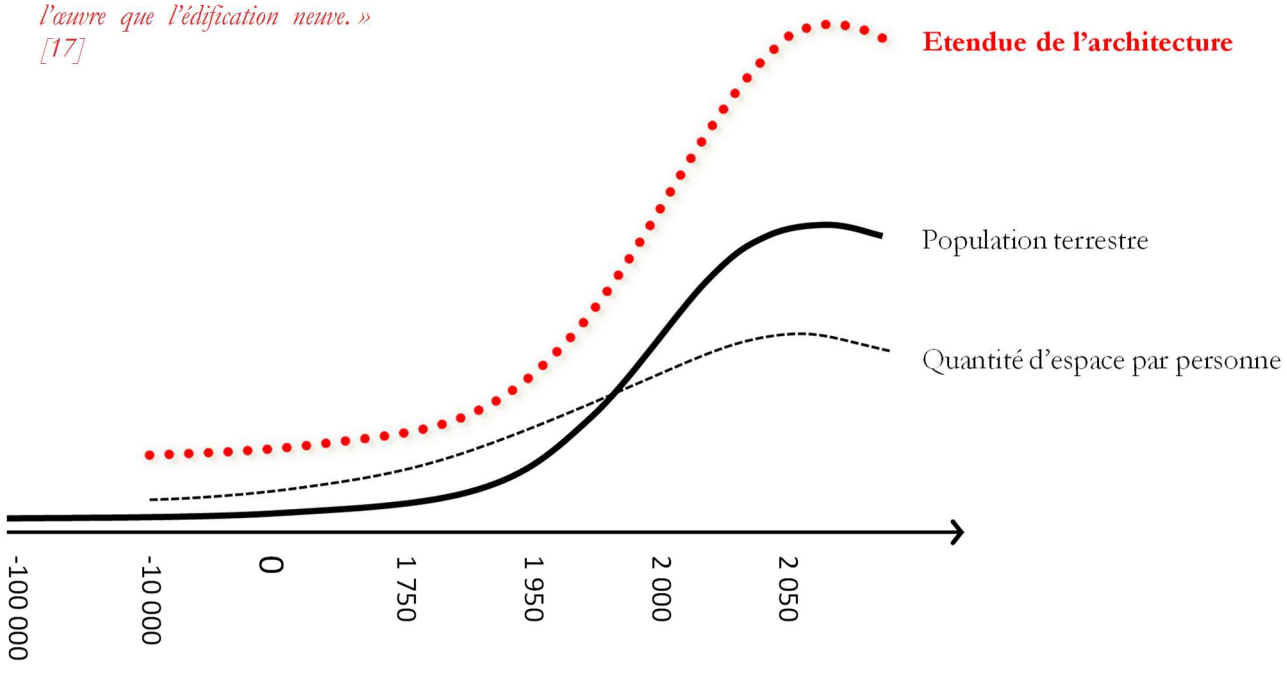
1. BIHOUIX Philippe, *L'âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable* Seuil, Anthropocène, 2014
2. LE ROY Robert, « Quelles améliorations environnementales pour le bois ? », *Revue Malaquais n°5*, Actes Sud, septembre 2017
3. MANIAQUE Caroline. *Go West - Des architectes au pays de la contre-culture*, Parenthèses, Architectures, 2014
4. STANTON Andrew, *Wall-e*, film d'animation, 2008
5. BONNEUIL Christophe, FRESSOZ Jean-Baptiste, *L'Événement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Seuil, 2013
6. MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER, MINISTÈRE DU LOGEMENT ET DE L'HABITAT DURABLE, *Référentiel « Énergie-Carbone » pour les bâtiments neufs, Niveaux de performance « Énergie – Carbone » pour les bâtiments neufs*, Octobre 2016
7. MENARD Raphaël, *Work in Process, nouveaux bureaux, nouveaux usages*. Exposition au Pavillon de l' Arsenal. Article « Don Drapper, la voiture et le climat », p237 à p265, 2012
8. MENARD Raphaël, DOSSIER Julien et al., *Paris, change d'ère. Stratégie de neutralité carbone de Paris en 2050*, Elioth, 2016
9. MEADOWS Donella H., RANDERS Jorgen, MEADOWS, Dennis. *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*, Rue de l'échiquier, 2012
10. DE ROSNAY, Joël, *Le macroscopie. Vers une vision globale*, Seuil coll. Points, 1975
11. MENARD Raphaël, *Work in Process, nouveaux bureaux, nouveaux usages*. Exposition au Pavillon de l' Arsenal. Article « Don Drapper, la voiture et le climat », p237 à p265, 2012
12. MENARD Raphaël et al., *Guide d'interaction énergie-climat, volume 2, résilience climatique*, ISBN : 978-2-8760-2052-8, Egis, 106 pages, 2013
13. TROMEUR Eric, MENARD Raphaël, BAILLY Jean-Baptiste, and SOULIE Christophe, *Urban vulnerability and resilience within the context of climate change*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 31 mai 2012
14. RODDIER François, *Thermodynamique de l'évolution, un essai de thermobio-sociologie*, Parole Éditions, 2012
15. FRIEDMAN, Yona, *L'architecture de survie*, Ed. Casterman, 1978
16. REY Olivier, *Une question de taille*, Stock, 2014
17. MENARD Raphaël, « Le pic de l'architecture », pp161-168, *Matière Grise*, Direction de l'ouvrage Encore Heureux, architectes, Edition et distribution exclusive, Pavillon de l' Arsenal, 2014



Fig. 412. Un carrefour parisien en 2046. Photomontage, Elioth, dans le cadre du projet ANR Resilis, 2011.

Fig. 413. *Le pic de l'architecture ?*

« [...] Crises de l'énergie et tensions sur les matières, l'architecture sera le point focal de ces profondes mutations à opérer. En parallèle, la population mondiale devrait aussi se stabiliser au cours de ce siècle. La fin de la croissance démographique conduira inéluctablement à une stabilisation, voire à une décroissance à terme du parc bâti mondial. Nous traverserons prochainement le maximum des surfaces bâties. L'architecture, art conquérant de la croissance, devra alors apprendre à devenir un art de la décroissance ; transformations et renouvellements seront plus à l'œuvre que l'édification neuve. » [17]



Partie 2.

Éléments d'architectures renouvelables.

(Précisions pour le temps VII)

Comment dimensionner l'architecture du temps VII ? Une architecture renouvelable retrouvée, tant sur l'énergie que pour la matière, à l'échelle d'une population de près de huit milliards d'individus, participant à une réduction massive de l'empreinte carbone, encourageant la séquestration du carbone atmosphérique et préparée aux chocs à venir, dont le plus certain, le réchauffement climatique.

#19 Les constantes de l'architecture

Les constantes fondamentales dans la physique et l'astronomie. L'histoire et le rôle de l'analyse dimensionnelle en mécanique des fluides.

La sensibilité de l'architecture à un nombre déterminé de grandeurs physiques plus ou moins constante.

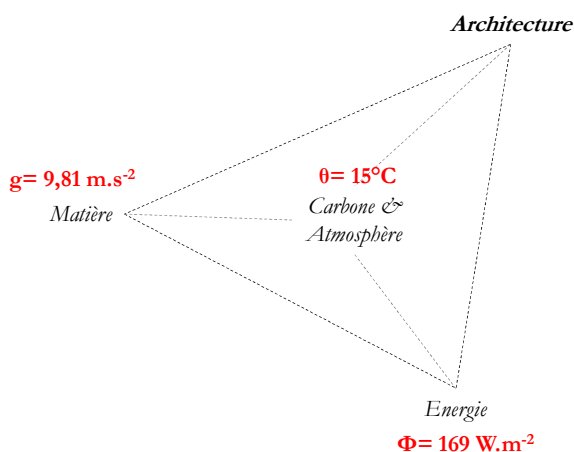
L'architecture du temps VII et ces valeurs.

Pourquoi des constantes ?

Des valeurs permanentes et globales

Pour ce premier chapitre de la deuxième partie, nous nous interrogerons sur les conditions aux limites de l'architecture. Comme pour la physique moderne qui adore les constantes et qui passe son temps à scruter des invariants [1], nous nous attacherons à une méthode similaire. En physique, voici quelques grandeurs définies comme constantes : la célérité de la lumière ; la charge électrique de l'électron ; la constante gravitationnelle. Les mathématiques possèdent elles-aussi quelques « valeurs-piliers » comme π ou e , le nombre d'Euler. En physique et plus généralement en sciences, le jeu algébrique entre ces grandeurs et les unités qui leur sont associées (Fig. 415) permet la prolifération d'une quantité importante de grandeur physique, générant d'autres invariants : des dimensions, des proportions, des *Modulor* pour quantité de phénomènes. Ainsi la manipulation de la constante de Planck, h , engendre les dimensions du temps¹ de Planck et de la longueur de Planck², « insécables d'espace et de temps », invariants débusqués à la lisière de la mécanique quantique et de la relativité.

Fig. 414. *Le tétraèdre des relations de l'architecture avec l'énergie, la matière et le climat. L'ensemble des unités de la physique peuvent être décrites selon les quatre grandeurs suivantes : masse, longueur, temps et température.*



¹ Environ $5,4 \cdot 10^{-44}$ s

² Environ $1,6 \cdot 10^{-35}$ m

Les quêtes de Modulor

Ces grandeurs, les rapports qu'elles entretiennent, révèlent taille et proportion à la totalité des phénomènes universels. En centrant notre *Power of Ten* [2] sur les dimensions de l'homme (#1), quelles sont dans ce cadre les « conditions aux limites » de l'architecture ? Quelles sont les valeurs fondamentales qui font qu'elle ressemble à « ça » ? Quelles sont les grandeurs qui rendent son histoire spécifique aux conditions terrestres ? Ce seraient les prémices d'une histoire universelle, au sens littéral, de l'architecture. Ce chapitre échafaude une première tentative pour ce récit, autour de quatre grandeurs : la gravité, le flux solaire, la température et la lumière (Fig. 414).

Évidemment, cette pensée n'est pas neuve, la Modernité l'avait réveillée entre les recherches ergonomiques du Bauhaus, la fascination pour le nombre d'or, son utilisation par Le Corbusier et Xenakis dans le *Modulor* [4]. Les quatre thèmes - matière, énergie, climat et lumière - détailleront les rapports entretenus entre l'architecture et chacune de ces grandeurs. Aussi, et s'il s'agit de décrire les fondements d'architectures conscientes des limites planétaires [3], seront rappelées quelques valeurs de stocks de matières et de stocks d'hydrocarbures qui conditionnent la durabilité de certaines formes d'architecture.

Vitesse de la lumière:	$c = 2,997\ 95 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Constante de la gravitation:	$G = 6,670 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$
Constante de Planck:	$h = 6,626\ 20 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Charge de l'électron:	$e = 1,602\ 19 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Masse de l'électron:	$m_e = 9,109\ 56 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Constante de Boltzmann:	$k = 1,380\ 62 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
Masse de l'atome d'hydrogène:	$m_{H1} = 1,673\ 35 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Constante de Stefan-Boltzmann:	$\sigma = 5,669\ 56 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$
Constante de la loi de Wien:	$\lambda_m \cdot T = 2,897\ 89 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}^{-1}$
Constante de Rydberg:	$R = 1,097\ 37 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$
Nombre d'Avogadro:	$N_A = 6,022\ 17 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Rayon de Bohr:	$a_0 = 5,291\ 78 \cdot 10^{-11} \text{ m}$
Constante des gaz parfaits:	$R = 8,314\ 34 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

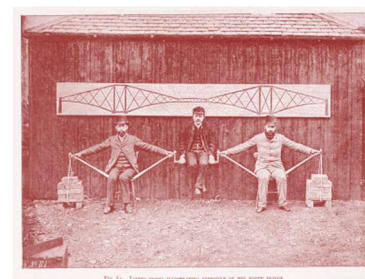
Fig. 415. *Quelques constantes fondamentales*

$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (ou la matière)

Un bref examen des forces en présence

L'histoire de l'architecture est une rhétorique entre la matière et la gravitation. L'architecture est d'abord l'art d'organiser les matières pour une descente des forces vers le sol, et ce de façon efficace et harmonieuse [5]. Les forces gravitaires s'exercent selon plusieurs formes sur les constructions. Elles peuvent être permanentes comme le poids propre de l'édifice et de ses différents composants. Les forces peuvent être variables comme les charges d'exploitation, par le poids des personnes habitant ou empruntant la construction, ou encore par le poids du mobilier

Fig. 416. *Illustration du schéma statique du Forth Bridge*



qu'un plancher d'immeuble doit soutenir. Elles sont gravitaires aussi selon certains chargements climatiques, tel le poids de la neige s'accumulant sur une toiture¹.

Gravité et proportion

La forme architecturale et les proportions de l'architecture sont ainsi très étroitement associées à la constante gravitationnelle terrestre, cette constante² nommée g et qui vaut sur la surface du globe $9,81 \text{ m/s}^2$. La constante de gravité relie la masse à la force statique, par la relation $F=mg$. F est communément appelé le poids et est exprimé en Newton. Sur Jupiter, où la gravitation est près de trois fois plus intense, le Parthénon aurait été plus pataud et ses colonnes bien moins élancées : les forces verticales appliquées sur les colonnes seraient plus importantes, et l'instabilité au flambement (de la matière en compression) aurait accentué un moindre élancement, une proportion plus grossière de ses colonnes (+30% en diamètre selon le tableau ci-dessous).

Fig. 417. *Comparaison des gravités et conséquence sur le dimensionnement à la compression.*

		Mercure	Venus	Terre	(Lune)	Mars
		♀	♀	⊕		♂
Constante de gravité	g N/kg	4	8,8	9,81	1,62	3,7
relatif par rapport à g	g SU	0,41	0,90		0,17	0,38
Diamètre relatif des colonnes du Parthénon	g SU	0,8	1,0		0,6	0,8
Hauteur structurelle relative de la passerelle S. de Beauvoir	g SU	0,6	0,9		0,4	0,6

Fig. 418. *Parthénon sur la Lune : le Carré de d'Art de Foster ?*



Les prestidigitateurs de la pesanteur

À l'inverse, si la vie était possible sur la Lune, et que les Grecs y avaient construit des temples, les colonnes du Parthénon pouvaient avoir une section réduite de moitié. Quelques architectures modernes ont embrassé cette utopie lunaire, une *Architecture Oddity* : Norman Foster par exemple, avec les poteaux très élancés de son *Carré d'Art* à Nîmes en 1993 (Fig. 418). De façon contemporaine, Herzog et de Meuron refont ce tour de prestidigitation avec les mille poteaux du stade Bordeaux, le *Matmut Atlantique*, inauguré en 2015. Ishigami teste lui aussi les limites dans plusieurs de ses projets en fabriquant des illusions d'apesanteur.

¹ Que dire du vent dont les efforts qu'ils engendrent ont aussi une incidence sur les formes ? Le vent, moteur thermodynamique, est d'abord gouverné par la puissance solaire. Sans doute que si le flux solaire terrestre était plus important, la pression exercée par les vents serait plus importante. Le flux solaire conditionne aussi sans doute les efforts climatiques auxquelles les constructions sont assujetties.

² Valeur quasi-constante sur la totalité du globe $g \sim 9,8 \text{ m.s}^{-2}$ avec quelques variations du fait de la géométrie de la géode.

Comme avec sa table, pré-cintrée à froid et d'une finesse *hors de proportion* : l'expression d'un objet, d'une architecture évidente (un toit sur quatre piliers) qui serait « localement », comme par magie, non assujetti à la pesanteur (Fig. 419).

Architecture, expression de la Terre

Cette force de rappel vers la surface du sol, le vénérable d'Arcy Thomson dans sa somme de 1917, *On Growth and Form* [6], expose cette intrication entre l'intensité de la gravité terrestre et la proportion des animaux terrestres :

« Si la force de gravité venait à doubler, notre bipédie serait totalement inadaptée, et la plupart des animaux terrestres prendraient la forme de sauriens courts sur pattes ou encore de serpents. »

Il souligne que cet enchevêtrement va plus loin, puisque l'implication de la forme et de la taille se transporte jusqu'à nos besoins métaboliques fondamentaux [6] :

« En revanche, si l'intensité de la force de gravité diminuait de moitié, nous serions plus légers, plus sveltes et plus actifs, nous aurions un besoin d'énergie, de chaleur et de sang moins important, et notre cœur et nos poumons pourraient être plus petits. »

Quelle est l'origine de cela ? La gravité, pour rendre hommage à une lecture importante, c'est « la partie et le tout » [7], la partie qui interagit avec la somme de tous les composants de matière. Cette somme gigantesque - mais dénombrable - de ces micro-interactions peut être résumée¹ en une relation bilatérale entre l'objet (une architecture par exemple) et le centre de gravité de toutes les contributions des matières présentes : le centre de la Terre. Une relation orientée vers le bas : elle est dirigée, centrée et perpendiculaire à nos « sols moyens », à nos territoires que l'érosion, par l'érosion, fait lentement converger vers une « surface iso-potentielle », c'est-à-dire des reliefs plans, parallèles à la sphère (ainsi donc est le destin de nos collines et de nos montagnes) et dimensionnée par la somme des matières en présence : la masse terrestre. Rayon et masse terrestre vont pour partie gouverner l'architecture.

Gravité et eau

La gravité oriente aussi la descente des éléments naturels, et plus particulièrement le ruissellement de l'eau de pluie ou celle de la fonte des neiges. La gravité dimensionne l'étanchéité d'un édifice dans une relation étroite avec une autre constante physique, la tension superficielle de l'eau (qui est largement prégnante à petite échelle [6]) (Fig. 421). Pierre Riboulet a magnifiquement exploré cette relation et l'a exprimé avec une puissante modénature pour son musée d'art moderne de Villeneuve-d'Ascq (1983) (Fig. 420) ou encore avec le musée de la Préhistoire de Nemours (1982).

Fig. 419. *Magic Table, Junya Ishigami*

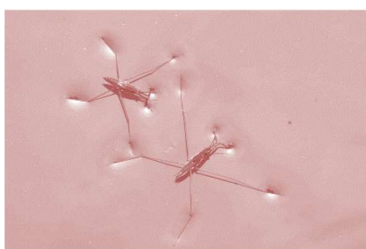


Fig. 420. *Musée à Villeneuve-d'Ascq par Pierre Riboulet*



¹ « intégrée » au sens mathématique.

Fig. 421. *Gerris, ou punaise d'eau, assujetti davantage à la tension superficielle de l'eau qu'à la gravité.*



Poids typique d'une architecture : matière par unité d'espace

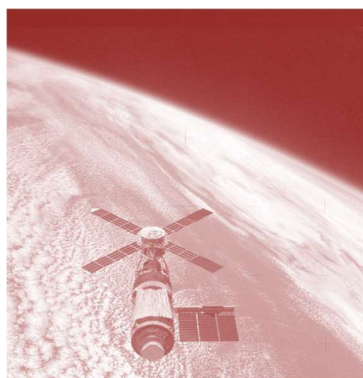
La densité massique typique d'un édifice contemporain est de l'ordre d'un millier de kilo par mètre-carré. Des charges d'exploitation courantes sont de l'ordre de quelques centaines de kilos par mètre-carré, tandis que le poids d'un manteau neigeux sur le toit d'une construction sera lui d'une centaine de kilos par mètre-carré. D'Arcy Thomson [6] rappelle que « *la gravité [...] prend le pas sur la tension superficielle pour les créatures de grande taille.* » et de fait, l'architecture à ranger dans la catégorie des « *créatures de plutôt grande taille* » est peu disposée à marcher sur l'eau comme la punaise d'eau. Dans le quatuor des forces fondamentales -gravitation, électromagnétisme, interaction faible et interaction forte-, elle est pourtant celle dont l'intensité est la plus faible. Évidemment, l'architecture du temps VII interrogera la masse de ses différents composants et empruntera les dilemmes exposés dans le chapitre consacré à l'architecture-matière, celle du temps VI (#17) en lien étroit avec la constante g .

$\Phi = 169 \text{ W par m}^2$ (ou l'énergie)

Cascade de flux

La mère des diagrammes de Sankey

Fig. 422. *Les panneaux solaires des satellites en orbite autour de Mars produisent plus de deux fois moins d'électricité qu'autour de la Terre.*



Après la pesanteur, nous allons voir comme le feu solaire gouverne également l'architecture. Il en est plus particulièrement question dans l'architecture du temps V (#16), ou encore dans les chapitres relatifs au flux solaire (#11, #13 et #15). À l'origine de ce flux, il est une machine thermodynamique transformant sa propre matière en énergie : notre soleil. Dans *Power Density* [8], Vaclav Smil rappelle¹ les éléments importants de sa carte d'identité : une étoile naine, de classe V, appartenant au groupe spectral G2, et dont la voisine la plus proche est Alpha du Centaure localisée à 4,3 années-lumière.

Le rayon de notre astre est plus de cent fois plus grand que celui de la Terre. La distance moyenne Soleil-Terre est de 149,6 Gm, soit près de 150 millions de kilomètres. Sa lumière met huit minutes à nous parvenir. Son flux de consommation de matière² « vaporise » 4,4 tonnes de matière par seconde, transformées en « énergie pure » : le diagramme de Sankey de la matière se déverse dans le diagramme de Sankey de l'énergie, un gigantesque changement d'état de la matière en énergie.

¹ pp42-43

² Et donc de transformation de matière en énergie selon l'égalité célèbre.

Au départ, 63MW par m² et un zoo peu fourni de matières

Smil [8] précise que 91% de la masse de notre astre est composé d'hydrogène, tandis que Dessus et Pharabod [9] indiquent que le soleil est composé à 87% d'hydrogène et de 12% d'hélium : il passe sa vie à transformer de l'hydrogène en hélium, et ce ratio évoluera donc au cours de sa vie. À la surface du soleil, le flux de puissance est 63MW par m², autrement dit un mètre-carré de surface solaire pourrait suffisamment d'énergie pour trente mille terriens contemporains¹.

340W par m² à l'orée de la sphère terrestre

Quelques 150 millions de kilomètres plus loin, la dilution spatiale du flux² fait qu'à l'orée de la Terre, la constante solaire n'est plus que de 1361 watts par m² : elle correspond à la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface d'un mètre-carré située à la distance d'une unité astronomique³, exposée perpendiculairement aux rayons du soleil, et ce, en l'absence d'atmosphère. Cette valeur de 1361 watts par m² coïncide avec le disque éclairé du globe terrestre : c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère. Si on distribue de façon homogène ce flux de puissance non pas sur le disque mais sur la sphère⁴, le rayonnement solaire incident est de 340 watts par m² en moyenne à l'entrée des couches supérieures de l'atmosphère.

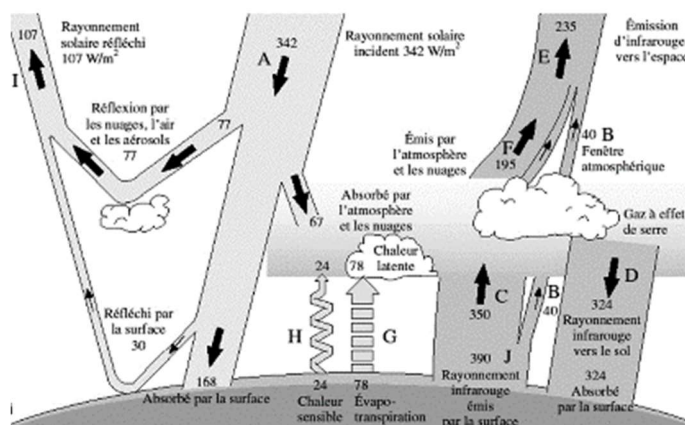


Fig. 423. Flux solaire et d'énergie dans l'atmosphère

¹ Sur la base d'un flux moyen de demande primaire d'environ 2100W.

² Selon une décroissance au carré de la distance, conséquence de la conservation de l'énergie : la valeur du flux, sommé sur la surface reste constante.

³ La distance moyenne Terre-Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres.

⁴ Et donc en divisant cette valeur par 4 en supposant que la surface de la terre est proche de celle d'une sphère.

169W par m² à l'arrivée

Au long de ce grand voyage, seuls 169 des 63 millions de voisins, tous nés sur le même mètre-carré viendront frapper la surface terrestre¹. 169 watts par m² est donc la valeur moyenne de la quantité d'énergie solaire frappant la surface terrestre. Des pôles à l'équateur, ce flux varie entre 80 et près de 250 watts par m². En 2010, et parce que l'humanité habite plus à proximité de l'équateur que des pôles, chaque terrien reçoit en moyenne 206 watts par m². Au regard des besoins moyens (2000 watts), dix mètres carrés pourraient en toute rigueur suffire à assurer la totalité de nos besoins² (chapitre #22).

L'architecture du temps V et des 169 watts par m²*Modulor énergétique*

Comme vu dans le chapitre consacré au temps V (chapitre #16), cette échelle de flux conditionne par exemple la taille des percements dans l'architecture, pour faire entrer l'énergie du soleil, pour chauffer nos logis par exemple (#15). Ce flux dimensionne également la quantité de surfaces productives sur une architecture, tels les panneaux solaires, et gouvernent ainsi une partie de la géométrie et de la matérialité d'architectures recherchant l'autosuffisance [10] (#22). Ce flux structure les matières à construire de l'architecture : temps et espace pour faire sécher une brique au soleil, flux de matières que la photosynthèse est susceptible de générer pour créer du bois d'œuvre, les fibres végétales nécessaires à un mur en pisé. L'architecture est une histoire de ce flux d'énergie, de sa variation géographique et de ses cyclicités temporelles. Le bioclimatisme traduit une expression des formes, le rapport des ombres et des protections mutuelles, la position dans l'espace et dans le temps d'une sorte de « permaculture architecturale » (#15). Ce flux en génère d'autres en cascade comme les flux éoliens (Fig. 424) et les flux hydrauliques (#8). Cette constante possède une relation indirecte avec les architectures productives, comme les moulins à eau ou les éoliennes.

Les horizons des temps V, VI et VII

Nous entamons un siècle singulier et critique de l'humanité. Déplétion des ressources fossiles, stabilisation de la population mondiale, décroissance de la production des minerais, stabilisation des besoins de construction : un *siècle des pics*. L'architecture peut-elle être durable ? En l'état actuel, clairement non. 85% de l'énergie mondiale est encore issue des stocks fossiles et fissiles. L'architecture et ses usages pèsent facilement la moitié des

Fig. 424. *Les variations spatiales et temporelles du flux solaire et ses conséquences sur les courants atmosphériques. Earth Wind Map, par Cameron Beccario.*



¹ 340W/m² est le quart de la valeur de 1360W/m² : la surface de la géode terrestre est le quadruple du disque solaire éclairée ($4\pi R^2$ contre πR^2). La valeur de 169W/m² vis-à-vis des 340W/m² correspond au flux touchant le sol (ou les surfaces aquatiques) : l'écart entre ces deux valeurs correspond à la quantité de flux transformé par la couche atmosphérique (réflexion et absorption) avant d'atteindre le sol.

² Mais avec un rendement de conversion de 100% !

besoins énergétiques : électricité, chaud, froid, mobilités induites et aussi nos consommations d'énergie nécessaire au cycle de construction.

À l'heure actuelle, nous consommons encore frénétiquement du vieux soleil, élixir de la photosynthèse des ères préhistoriques. À l'heure de la rareté de nos stocks d'énergie, 169 watts par m^2 doit guider le projet urbain et architectural (chapitre #16). C'est une valeur de la permanence de la vie sur Terre et de notre capacité à transformer le monde. L'architecture doit se penser dans les modulations géographiques de ce flux (Fig. 425). Un Terrien réclame en moyenne 2000 watts tandis qu'un Européen demande plus du triple. Si nous savions convertir 100% de ce gisement, de cette « douche permanente », la densité maximale sur nos continents serait alors de 800 personnes à l'hectare. Nous sommes très loin de cette hyperdensité et sans doute que d'autres contraintes de flux limiteraient assurément cette asymptote de densité d'usage. Mais à l'orée de 2020, l'humanité convertit moins de 0,02% de l'énergie solaire frappant la surface du globe : d'immenses progrès sont à portée de main (#22) et l'architecture du temps VII construira de glorieuses démonstrations, illustrant les capacités de transformations des 169 watts par m^2 (Φ).

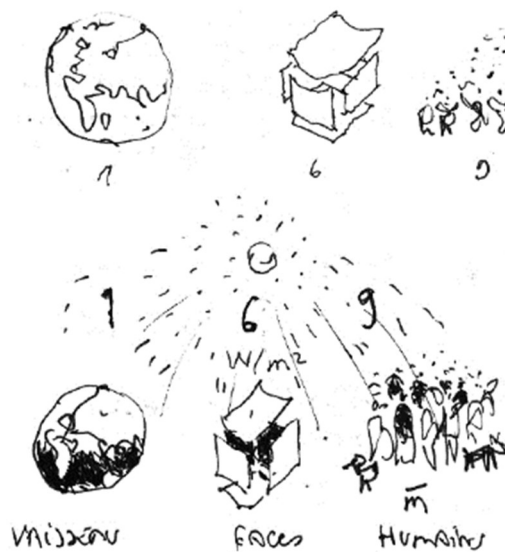


Fig. 425. 169 watts par m^2

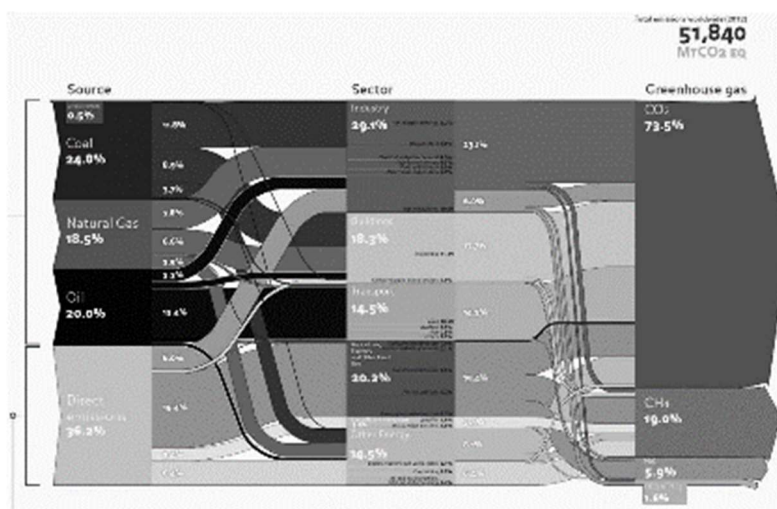
$\theta = 15^{\circ}\text{C}$ (ou le carbone)

Du flux à la température de la vie

Notre agitation moyenne

L'architecture du temps VII est, comme nous l'avons vu (#18), assujettie à la rapidité du réchauffement climatique. Pris en tenaille, entre d'un côté, la douche permanente de la puissance solaire (169W par m^2), et de l'autre, le froid intersidéral du fond du cosmos à -270°C , la température moyenne de notre biosphère est 15°C . Elle correspond à la moyenne de la température sur toute la surface de la Terre¹ pendant une l'année. Nous ne décrivons pas la pluralité des mécanismes d'échanges thermiques, mais cette température très adaptée à la chimie du carbone (et des formes courantes de vie) est largement due à l'effet de serre, ou plus exactement au mécanisme de forçage radiatif. Sans atmosphère, et les gaz assurant l'effet de serre, il régnerait une température moyenne d'environ -18°C sur la surface du globe [13].

Fig. 426. Typologie et diagramme de Sankey des émissions mondiales de gaz à effet de serre en 2012 (source Ecofys). Avec près de $52\text{ GtCO}_2\text{e}$ émises en 2012, les énergies fossiles sont responsables des deux-tiers des émissions, tandis que les émissions directes liées à l'agriculture et aux modifications d'usage des sols émettent le dernier tiers.



Les gaz à effet de serre

En 1861, John Tyndall identifiait les principaux contributeurs à cet effet climatique : la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone, contenus dans l'atmosphère. À l'époque, Tyndall suggère d'ailleurs déjà qu'une modification de la composition chimique de l'atmosphère pourrait avoir une influence sur l'évolution du climat. En 1896, Svante August Arrhenius proposait la première estimation de l'impact de la concentration atmosphérique en

¹ Océans et continents, surface de ces derniers étant ramenée au niveau de la mer.

dioxyde de carbone sur les températures terrestres. Il estimait qu'un doublement de la quantité de dioxyde de carbone pourrait augmenter de 4 °C la température moyenne¹.

Matière, énergie, température

La chaîne de causalité se développe ainsi : la découverte d'un « butin énergétique » transforme une quantité suffisante de matières², contenues jusqu'alors dans la lithosphère, en les libérant après combustion vers l'atmosphère sous forme gazeuse (le CO₂). Cette modification de la composition de l'atmosphère transforme ensuite le bilan énergétique de la Terre [15]. Cette transformation de l'équilibre énergétique se traduit directement sur le climat, et plus généralement sur l'environnement.

$$\text{énergie} \rightarrow \text{matière} \rightarrow \text{énergie} \rightarrow \text{température}$$

Le carbone et le forçage radiatif

Nos consommations d'énergie et ses conséquences sur l'équilibre thermique

Le forçage radiatif est défini comme le bilan entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnement infrarouge sortant de l'atmosphère. D'après [16], le forçage radiatif d'origine anthropique atteint d'ores et déjà de +2,55 watts par m² en 2013 par rapport à 1750³. Du fait des émissions de CO₂ issues de la combustion des hydrocarbures, nous avons largement déséquilibré le bilan énergétique de la « maison Terre ». Le réchauffement climatique traduit l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, très fine pellicule dessinant le pourtour de notre vaisseau planétaire. Établis par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat⁴ pour son cinquième rapport, AR5 [12], les scénarios RCP⁵ définissent quatre scénarios relatifs à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre au cours du 21^{ème} siècle (Fig. 427). Dans ce dernier rapport du GIEC, sur la base de quatre hypothèses distinctes de la quantité de gaz à effet de serre émise dans les années à venir⁶, chaque scénario RCP propose une variante probable du climat qui résultera du niveau d'émission choisi comme hypothèse de travail.

¹ Et selon la relation $\Delta\Phi = F = 5,35 \cdot \ln\left(\frac{c}{c_0}\right)$ [W/m²] sur le forçage radiatif.

² Solide, le charbon ; liquide, le pétrole ; gazeuse, essentiellement le méthane.

³ Avec un intervalle de confiance de plus ou moins 1,1 W par m² et la valeur de m² correspondant à une unité de surface planétaire.

⁴ Ou le GIEC

⁵ Pour *Representative Concentration Pathway*

⁶ Période 2000-2100

Les trajectoires de forçage radiatif

Les quatre scénarios sont nommés d'après la gamme de forçage radiatif ainsi obtenue pour l'année 2100 : le scénario RCP2.6 correspond à un forçage de +2,6 watts par m², le scénario RCP4.5 à +4,5 watts par m², et de même pour les scénarios RCP6 et RCP8.52. À l'orée des années 2020, la tendance d'évolution des émissions semblent malheureusement emprunter la trajectoire des scénarios les plus dramatiques, à savoir RCP6 ou RCP8.52. Il nous reste quelques années pour inverser la tendance et diffuser l'architecture du temps VII sur les constructions neuves et la transformation des existants.

Fig. 427. *Trajectoires d'évolution de la température moyenne terrestre selon les scénarios RCP*

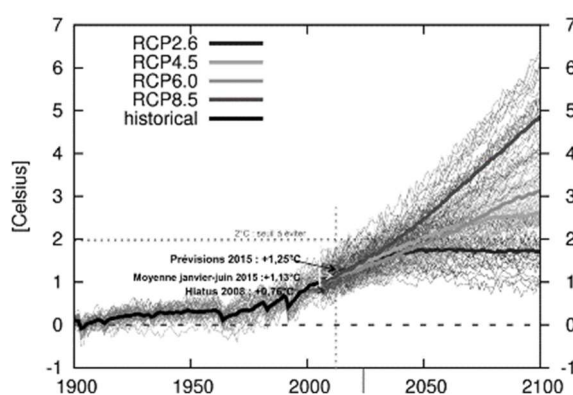
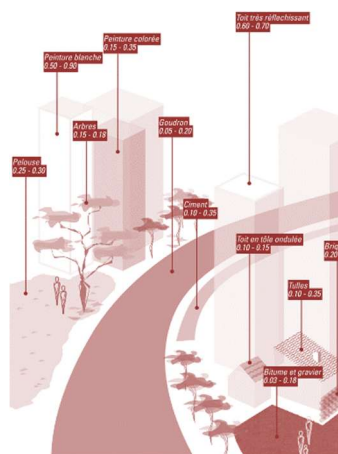


Fig. 428. *Quelques valeurs d'albédo*
[18]

*L'architecture, l'aménagement : de la géo-ingénierie passive ?*

Les constructions et les aménagements possèdent une incidence directe sur le forçage radiatif. Selon la nature de l'état initial, les transformations du cadre bâti et paysager affectent localement l'albédo, ce dernier étant le pouvoir réfléchissant d'une surface, c'est-à-dire le rapport de l'énergie lumineuse réfléchiée à l'énergie lumineuse incidente. L'albédo de la neige fraîche est par exemple compris entre 0,75 et 0,90 : c'est-à-dire que l'énergie solaire renvoyée vers le ciel est comprise entre 75% et 90%. À l'inverse, en situation urbaine, du fait de la colorimétrie sombre de revêtements des bâtiments ou des sols urbains, du fait aussi de la géométrie complexe des tissus urbains, le rayonnement solaire est majoritairement piégé et l'albédo est plutôt voisin de 0,15 [18]. L'albédo moyen de la surface du globe est d'environ 0,34. Dès lors, dans la mesure où le projet est constitué de surfaces dont l'albédo serait supérieur à la précédente valeur, il concourrait en première approche à limiter le forçage radiatif. Aussi dans les zones du globe fortement insolées, il est pertinent d'éclaircir les surfaces les plus exposées au rayonnement comme les toits et les espaces publics non ombragés. À sa façon, l'architecture du temps VII s'apparente à une « géoingénierie passive », la géoingénierie étant l'ensemble des techniques qui visent à manipuler et à modifier le climat terrestre à grande échelle.

À la différence notoire de solutions proposées par certains chimistes et climatologue, fortement décriées et potentiellement dangereuses, l'architecture est par essence une manipulation locale du climat terrestre. En combinant les efforts, le paysage construit et transformé par les hommes pourrait participer à l'augmentation de l'albédo moyen et donc à la limitation du forçage radiatif. Si l'on considère en première approche que le paysage bâti constitue 5% des surfaces émergées (Fig. 435), un accroissement de 0,2 de l'albédo de ces surfaces permettrait de réduire le forçage radiatif d'environ 0,5W par m². Ce point fait l'objet d'un développement plus détaillé dans le retour sur l'expérimentation du sol à albédo variable à Lyon Part-Dieu (#27).

Atténuation et séquestration

Limiter l'élévation à +2°C

L'autre solution plus solide pour limiter le forçage radiatif consiste évidemment en une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre. Le dernier chapitre de la première partie, qui introduisait les enjeux de l'architecture du temps VII (chapitre #18), alertait sur l'urgence de l'atténuation des émissions. La question de la réduction des émissions de gaz à effet de serre est rendue plus pressante chaque année, avec une concentration de dioxyde de carbone ayant franchi le seuil symbolique des 400 ppm, une élévation de la température moyenne globale approchant déjà les +1.5 °C, et une communauté internationale qui s'est avérée incapable de réduire le volume d'émissions annuel, si ce n'est pour l'année de crise économique de 2008.

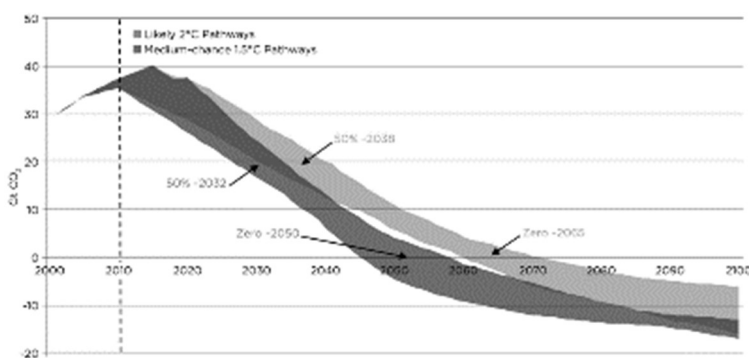


Fig. 429. Trajectoire de neutralité carbone (Joeri Rogelj et al.) mondiale pour respecter l'Accord de Paris et un profil d'émissions compatible avec le scénario RCP2.6 : les émissions d'origine humaine doivent être nulles après 2050.

Budget carbone : budget d'énergies fossiles

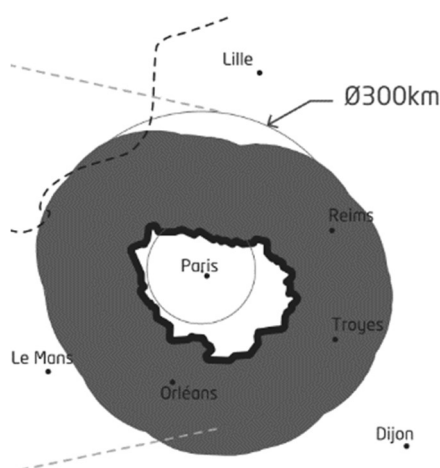
Pour son rapport de 2014, le GIEC a donc développé des budgets carbone associés à des objectifs de limitation de la hausse de température globale moyenne [12]. L'humanité pouvait ainsi émettre 550 milliards de tonnes CO₂ pour obtenir +1.5°C avec 50% de probabilité, ou 1000 milliards de tonnes CO₂ pour rester sous +2°C avec 66% de probabilité. Au rythme actuel, le premier budget sera dépassé aux alentours de 2025 et le second autour de 2035. Fin 2015, à l'issue de la COP21, l'Accord de Paris

fixait un nouveau cap : tout mettre en œuvre pour limiter le réchauffement global à +2°C et viser idéalement +1,5°C à la fin de ce siècle, par rapport à l'ère préindustrielle. Au-delà de ces valeurs d'évolution de la température moyenne, les scientifiques alertent qu'ils sont incapables de prédire le comportement de la machine climatique. Pour parvenir à endiguer un possible emballement, seul le scénario RCP2.6 le garantirait (Fig. 427). Traduit en budget carbone ainsi qu'en trajectoire, les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine devraient être nulles d'ici la seconde moitié de ce siècle (chapitre #22).

Émissions négatives et neutralité carbone

Pour que les objectifs de l'Accord de Paris soient tenus, les experts ont anticipé le recours à des pratiques inédites à cette échelle de capture du CO₂ à grande échelle, constituant ainsi des capacités d'« émissions négatives » : boisement et reforestation, bio-charbon, biomasse avec capture et stockage du carbone, stockage de carbone dans des produits bois, capture directe dans l'air, séquestration dans les sols (Fig. 430)... Étant vu que les trajectoires les plus ambitieuses ne permettent pas de tenir les budgets, la seule solution envisagée actuellement est en effet de les dépasser temporairement, puis d'y revenir en retirant du carbone de l'atmosphère (chapitre #22). La notion de neutralité carbone est issue de cette volonté d'équilibrer à l'échelle mondiale les émissions et les stockages de carbone aux alentours de 2060-2070, puis de rendre l'humanité « *net negative* », stockant plus de carbone qu'elle n'en émet [17].

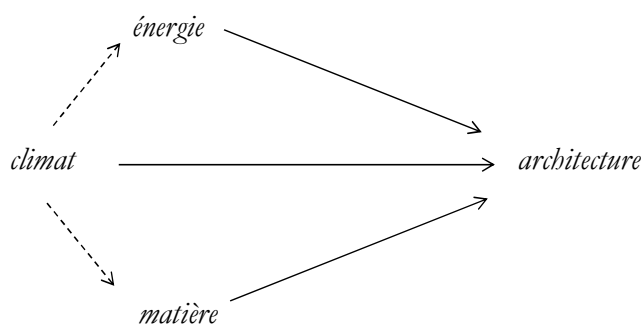
Fig. 430. Bassins versants carbone à l'échelle de l'Ile-de-France. Elioth, 2018. La corolle correspond à l'emprise spatiale des forêts nécessaires à la compensation de onze millions de Français, dont les émissions annuelles auraient en moyenne largement diminué d'ici 2050 pour atteindre 2 tonnes de CO₂ équivalent.



Une modernité à rebours

Autrement dit, nous sommes à l'aube d'une rétroaction incroyable. Nous sommes dépositaires d'informations essentielles sur le destin probable de l'environnement terrestre. Nous possédons des capacités d'anticipation incroyable du fait à la fois des connaissances accumulées sur le climat, sur les progrès des modèles climatiques, comme sur la puissance

technologique des simulations numériques. Nous pouvons voir dans le futur. Nous pourrions aussi rédiger une dystopie, d'un monde actuel à plus de 400ppm mais dont l'essor du numérique aurait été moindre et avec des capacités de prospective climatique, réduites voire nulles. Ce trésor de savoir, de prise de conscience doit maintenant être urgemment converti en bouquet d'actions locales et globales, sur les façons optimales de consommer de l'énergie (#16) et sur les moyens frugaux d'utilisation de la matière (#17). Notre modernité est à rebours : le climat induit des chaînes de causalité inverse sur l'art d'aménager et construire. Ce sera l'architecture du temps VII, l'art de préserver la constante d'une température moyenne d'environ 15°C (θ).

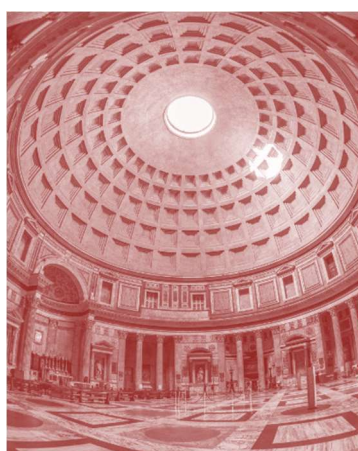


100 000 à 100 lux, du ciel à l'œil. L'architecture

De l'éclaircissement

La vue, sens essentiel

Pour cette quatrième et dernière sous-partie, nous nous pencherons sur la sensibilité de l'un de nos sens. Il ne sera pas question ici d'unité physique particulière, d'une constante exosomatique, voire « a-humaine », mais au contraire d'évoquer le corps humain et plus particulièrement ses capacités de vision. Nous percevons certes l'espace de façon polysensorielle, mais la vue est sans doute le sens privilégié de l'architecture. La quasi-totalité des moyens de représentation du projet sont d'ailleurs d'abord visuels. Parfois des maquettes sont utilisées pour des tests acoustiques pour de grandes salles de concert ; on utilise aussi des échantillons de matériaux pour s'assurer de la qualité de toucher de certains revêtements. On hume éventuellement des échantillons pour évaluer leur odeur et l'impact olfactif qu'ils seraient susceptibles de générer.

Fig. 431. *Le Panthéon à Rome*

Mesure de la sensibilité

Mais la vision binoculaire reste centrale. La sensibilité de la vue est fonction de la longueur d'onde de la lumière. De façon synthétique, nous introduirons dans ce qui suit la sensibilité de l'œil à la lumière, comme celle d'une pellicule photographique ou d'un capteur numérique. Aussi, nous utilisons généralement la notion du flux lumineux, qui caractérise la puissance lumineuse de la source, normalisée à la sensibilité de l'œil, de façon à ne mesurer qu'une puissance susceptible de provoquer la sensation visuelle ; son unité de mesure est le *lumen* (lm).

L'éclairement caractérise lui, la puissance lumineuse qui atteint une surface donnée. Son unité est le *lux* (lux) et correspond à des lumens par m². La mesure de l'éclairement permet de déterminer si la quantité de lumière qui parvient à l'objet est suffisante pour que celui-ci soit perçu. On utilise généralement un luxmètre composé d'une cellule, qui transforme le flux lumineux reçu en une grandeur électrique mesurable. Ces définitions établies, il est remarquable de constater que l'œil humain perçoit des objets soumis à des niveaux d'éclairement très variés. Le tableau ci-dessous indique quelques ordres de grandeur :

Plein soleil, à midi au sol	100 000 lux
Temps nuageux au sol	2 000 à 10 000 lux
Bureau	400 à 600 lux
Prérequis en bureau	200 à 300 lux
Habitation	150 à 300 lux
Rue éclairée au sol	20 à 50 lux
Pleine lune au sol	0,25 lux

Échelle des percements du fait de la sensibilité de l'œil

Ainsi, depuis ses origines, l'architecture compose une relation savante, entre d'un côté la source lumineuse de nos cieux – dont l'éclairement est généralement entre dix à cent milles lux - et de l'autre, nos intérieurs éclairés entre dix et mille lux. Au cours de la première partie (chapitres #15 et #16 notamment), il avait été question de la thermique des constructions et des percements dans l'enveloppe. La sensibilité optique de l'œil humain est un autre déterminant essentiel. Il est certain que les formes architecturales et les tissus urbains auraient été différents si les besoins en facteur de lumière du jour étaient métaboliquement d'une autre nature. Si la vue humaine avait été moins sensible, les percements en façade et dans les toits auraient eu assurément une autre importance. Beaucoup d'activités humaines se suffisent d'un éclairement à 200 lux environ ; aussi, même sous un ciel gris et couvert à 10000 lux, le cinquantième de trous dans la toiture obturant l'intérieur suffirait pour assurer les apports lumineux suffisants.

Architecture et amplification lumineuse

Avant cet horizon, l'histoire moderne de l'architecture est jalonnée de quelques références ayant testé des dispositifs architectoniques d'amplification lumineuse, à l'instar des héliostats d'une centrale à tour pour le solaire thermodynamique (chapitre #13). L'installation paysagère et scénographique du Théâtre de la Pleine Lune par Humbert Camerlo et avec la collaboration de Peter Rice était une splendide démonstration low-tech et poétique pour concentrer la lueur de la pleine lune vers le foyer de la scène d'un petit amphithéâtre niché dans les Cévennes (Fig. 432).

Déclinaison métropolitaine, *business oriented* et *high tech*, Norma Foster avait conçu un système optique extrêmement sophistiqué pour la tour de la HSBC à Hong-Kong (Fig. 433), où la conjugaison d'un réflecteur extérieur et d'un plafond catadioptrique dans l'atrium autorise l'éclairage naturel de l'intérieur de la tour et de son piétement. Un peu plus tard, Foster récidivait avec la coupole du Reichstag à Berlin. Jean Nouvel a lui aussi expérimenté des jeux optiques sophistiqués et périscopiques avec notamment le soubassement de l'Institut du Monde Arabe ou plus récemment pour sa tour en Australie, *One Central Park*. Autres recherches, plus sculpturales avec les lustres et *light pipes* de James Carpenter et les sculptures de lumière, plus prospectives et iconoclastes chez Guy Rottier et ses lumiducs [20] (dont les recherches ont aussi été abordées au chapitre #16).

Chez Elioth, il y eut aussi des explorations utilisant des algorithmes évolutionnaires pour chercher la modénature optimale d'un profond patio pour propager la lumière dans une grande opération tertiaire à Paris, ZAC Austerlitz avec Arep et AJN.

Luminosité de nos cieux

Comme pour l'irradiation solaire (chapitre #10), l'éclairage possède également une relation étroite avec la géographie. Selon les continents, les topographies, les latitudes, la disponibilité lumineuse change en quantité et en qualité, cette dernière exprimant la part directe et la part diffuse et ses fluctuations temporelles. Aussi, une même architecture, plongée dans des géographies différentes, engendrera autant d'ambiances lumineuses et des façons variées d'appréhender la spatialité. De façon plus quantitative, un même édifice implanté à Oslo ne disposera pas de la même autonomie en lumière naturelle que son jumeau à Séville. En analogie avec la thermique, la lumière devrait aussi posséder sa table de degrés-jours unifiés : une proposition à ajouter dans le programme du temps VII (chapitre #21). L'architecture renouvelable documentera de façon approfondie cette climatologie des ambiances lumineuses, thématique féconde tant pour les enjeux énergétiques que pour une caractérisation sensible et précise de l'émotion lumineuse, thématique de recherche du laboratoire Lipid à l'EPFL par Marilyn Andersen.

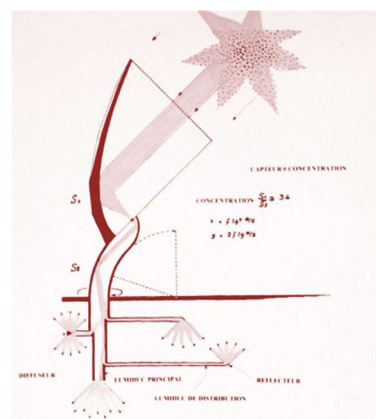
Fig. 432. *Le Théâtre de la Pleine Lune*



Fig. 433. *Tour de la HSBC*



Fig. 434. *Les besoins en lumière selon Guy Rottier*



Bibliographie

1. COSTA DE BEAUREGARD, Olivier, *Le Temps des physiciens*, ed. Aubin, 1996
2. EAMES, Charles, Ray, *Powers of Ten*, documentaire 9 minutes, 1977
3. MEADOWS Donella H., RANDERS Jorgen, MEADOWS, Dennis. *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*, Rue de l'échiquier, 2012
4. GIEDON Siegfried, *Espace, temps, architecture*, La Connaissance, Bruxelles, 1968
5. MUTTONI Aurelio, *L'art des structures*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2004
6. THOMPSON D'Arcy, *On Growth and Form* (en français *Forme et Croissance*), 1917
7. HEISENBERG Werner, *La Partie et le Tout*, 1969
8. SMIL Vaclav, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015
9. DESSUS Benjamin, PHARABOD François, *L'énergie solaire*, Que sais-je?, 2002
10. HEGGER Manfred, FUCHS Matthias, STARK Tommy, ZEUMER Martin, *Energy Manual: Sustainable Architecture*, Birkhäuser, 2008
11. BONNEUIL Christophe, FRESSOZ Jean-Baptiste, *L'Événement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Seuil, 2013
12. IPCC, *Climate Change 2014 Synthesis Report, Fifth Assessment Report (AR5)*, 2014
13. LE TREUT Hervé, JANCOVICI Jean-Marc, *L'effet de serre: allons-nous changer le climat?* Flammarion, Champs Sciences, 2009. 217 p.
14. MALM Andreas, *L'anthropocène contre l'histoire. Le réchauffement climatique à l'ère du capital*, La Fabriques éditions, 2017
15. GUGGENHEIM Davis, *Une vérité qui dérange*, documentaire, 2006
16. MINISTÈRE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, I4CE, *Datalab, Chiffres clés du climat. France, Europe et Monde*, 2018
17. MENARD Raphaël, DOSSIER Julien et al., *Paris, change d'ère. Stratégie de neutralité carbone de Paris en 2050*, Elioth, 2016
18. MENARD Raphaël et al., *Guide d'interaction énergie-climat, volume 2, résilience climatique*, ISBN : 978-2-8760-2052-8, Egis, 106 pages, 2013
19. HESCHONG Lisa, *Architecture et Volupté thermique*, Marseille, Parenthèses, 1981
20. WILLEMIN Véronique, Guy Rottier, *Architecte*, Éditions Alternatives, 2008

Fig. 435. *Récapitulatif de la technosphère*

Scale and diversity of the physical technosphere: A geological perspective

Cearreta,⁸ Erle C. Ellis,⁹ Jacques Grinevald,¹⁰ Peter Haff,¹¹ Juliana A. Ivar do Sul,¹² Catherine Jeandel,¹³ Reinhold Leinfelder,¹⁴ John R. McNeill,¹⁵ Eric Odada,¹⁶ Naomi Oreskes,¹⁷ Simon James Price,^{2,18} Andrew Revkin,¹⁹ Will Steffen,²⁰ Colin Summerhayes,²¹ Davor Vidas,²² Scott Wing²³ and Alexander P. Wolfe²⁴

	Surface	Epaisseur	Densité	Masse	Volume	% terres émergées	poids par humain
	Mkm ²	cm	g/cm ³	Tt	Tm ³	%	t/cap
Aires urbaines	3,7	200	1,50	11,1	7,4	2%	1494
Habitat rural	4,2	100	1,50	6,3	4,2	3%	848
Pâturage	33,5	10	1,50	5,0	3,35	22%	676
Terres cultivées	16,7	15	1,50	3,8	2,505	11%	506
Fonds marins explorés	15	10	1,50	2,3	1,5		303
Utilisation des sols et sols érodés	5,3	10	1,50	0,8	0,53	4%	107
Routes rurales	0,5	50	1,50	0,4	0,25	0,3%	50
Forêts plantées	2,7	10	1,00	0,3	0,27	2%	36
Réservoirs	0,2	100	1,00	0,2	0,2	0,1%	27
Chemins de fer	0,03	50	1,50	0,0	0,015	0,0%	3
Total	81,83			30,1	20,22	45%	4 050

Epaisseur équivalente 25 cm

Surface des terres émergées 149 Mkm²

Surface totale terrestre 510 Mkm²

Population mondiale, estimation 2016 7,43 Ghab

Epaisseur équivalente sur surface terrestre 4,0 cm

#20 L'approche globale

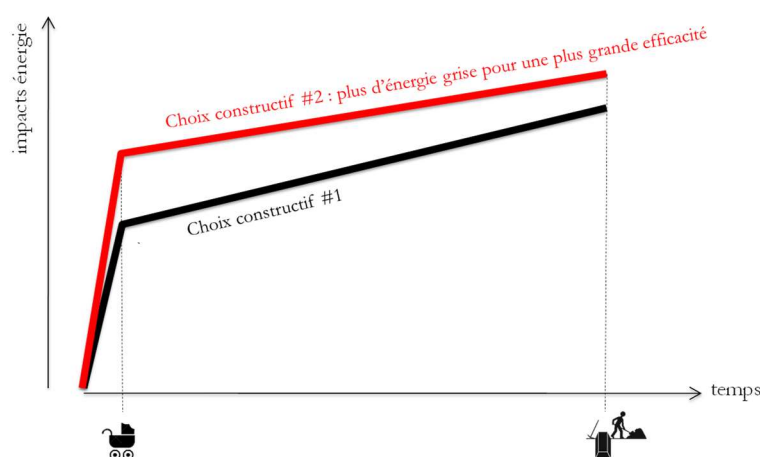
Un précis des bilans environnementaux sur la durée de la construction. Application à un dilemme : la meilleure énergie est-elle celle que l'on ne consomme pas ? Ou est-elle celle que l'on produit en plus ? Doit-on orienter nos actions vers une réduction de la demande ou les diriger vers la production¹ ?

Les bilans énergie-matière d'une construction

Le design total

En 2016, le *Victoria and Albert Museum* de Londres rendait hommage à l'ingénieur Ove Arup² au travers de l'exposition *Engineering the World : Ove Arup and the Philosophy of Total Design*. Plutôt que de « design total », nous précisons dans ce qui vient quelques principes, quelques règles pour quantifier simplement les impacts écologiques du projet à travers quelques métriques-clés : les bilans (i), les flux moyens et diagrammes énergie-matière (ii) et les temps de retour (iii). Dans le chapitre #5, les définitions des bilans avait été déjà présentées. Ce chapitre complète et précise ces notions pour tenter de mieux caractériser l'architecture du temps VII.

Fig. 436. La comparaison entre deux scénarios constructifs et le bilan en fin de vie.



Les deux égalités décrits ci-dessous (Eq 9 et Eq 10) forment les valeurs des bilans en énergie (indice e) et en matière (indice m), exprimées en fonction des paramètres de flux (f), de temps de vie (T) et de stocks, de dettes constructives au moment de la construction ou de la transformation

¹ Ou les émissions négatives si la question se pose sur le carbone.

² 1895 - 1988 et fondateur de la firme éponyme.

(S). Ces bilans seront donc homogènes à des stocks, à des grandeurs indépendantes du temps.

$$\text{Eq 9. } \mathcal{B}_e = f_e \cdot \mathcal{T}_{vie} + S_e$$

$$\text{Eq 10. } \mathcal{B}_m = f_m \cdot \mathcal{T}_{vie} + S_m$$

Un crible pour les choix de parti

Les bilans énergie-matière peuvent aussi s'exprimer de façon relative, comme instrument de résolution de dilemme entre deux choix de parti (Fig. 436). Comme nous l'avons vu, l'architecture du temps VII doit mesurer, peser, ausculter ses incidences sur l'environnement. Aussi, pour apprendre à déflouter le tiraillement entre deux stratégies, la méthode de comparaison des bilans est essentielle comme éléments d'appréciation pour une bifurcation. Elle permet d'évaluer la pertinence d'un choix de parti n°2 (Eq 12), qui serait l'évolution d'un choix de parti n°1 (Eq 11).

$$\text{Eq 11. } \mathcal{B}_1 = f_1 \cdot \mathcal{T}_{vie} + S_1$$

$$\text{Eq 12. } \mathcal{B}_2 = f_2 \cdot \mathcal{T}_{vie} + S_2$$

Notons cependant que les hiérarchies peuvent différer selon qu'on évalue le bilan en énergie primaire non renouvelable consommée (et un bilan avec un indice e), la masse totale de matières non renouvelables utilisée (m) ou encore le cumul des émissions de gaz à effet de serre. Dans une situation de comparaison, et en supposant que les durées de vie sont analogues, nous notons ΔS , l'écart entre les exutoires constructifs de chaque choix de parti ; Δf mesure l'écart entre les flux (Fig. 437).

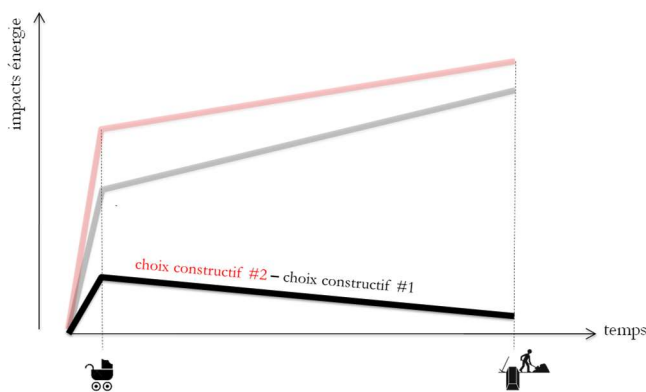


Fig. 437. *Le chronogramme de la différence*

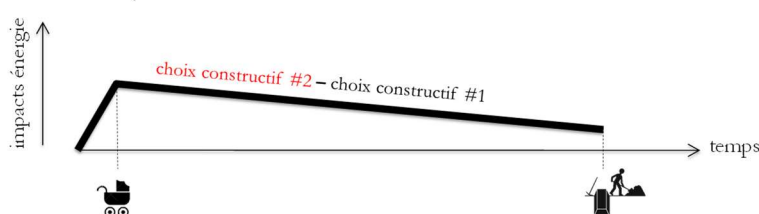
L'écart de bilan peut ainsi fournir un bon indicateur pour distinguer deux choix de parti.

$$\text{Eq 13. } \Delta \mathcal{B} = \mathcal{B}_2 - \mathcal{B}_1 = \Delta f \cdot \mathcal{T}_{vie} + \Delta S$$

Comparaison entre plusieurs scénarios

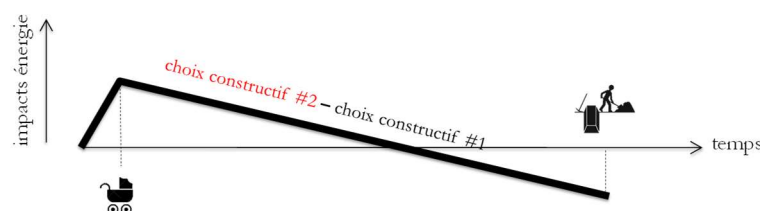
Dans une situation fictive, la courbe ci-dessous caractériserait le chronogramme d'un indicateur écologique particulier entre deux options constructives (Fig. 438). Selon cette trame, le deuxième choix constructif (#2) génère une dette écologique (ou financière) constructive qui ne sera jamais remboursé sur la durée de vie caractéristique. Cette trajectoire serait la signature d'une mauvaise stratégie de design. Elle pourrait par exemple s'opérer pour tester les vertus ou non du remplacement d'un double vitrage par un triple vitrage : l'écart de carbone gris¹ est-il remboursé dans un délai de temps court ? (#15)

Fig. 438. *Illustration d'un bilan négatif selon la mesure d'un impact énergétique.*



À l'inverse, la courbe ci-dessous est représentative d'un choix pertinent (Fig. 439) dans le cas où l'externalité analysée est l'énergie pour cet exemple : l'écart entre les deux scénarios peut être interprété comme le comportement typique d'une utilité de production d'énergie renouvelable. L'intérêt de l'approche en « différence de bilans » est qu'elle révèle des signatures analogues à celle d'utilités renouvelables (vu aux chapitres #8, #11 et #13).

Fig. 439. *Illustration d'un bilan pertinent.*



Sur sa durée de vie, l'énergie non consommée par rapport au « choix constructif #1 » sera supérieure à son surcoût constructif, au sens énergétique du terme. Si la variable analysée est la quantité de matière sur un site donné, ce chronogramme pourrait illustrer par exemple un effort d'aménagement permettant (ou favorisant) la production de biomasse sur site, comme dans le cas d'un aménagement agricole.

¹ Triple vitrage $\sim 50\text{kgCO}_2$ par m^2 contre $\sim 30\text{kgCO}_2$ par m^2 de double-vitrage

Flux moyen et diagramme énergie-matière

Flux moyen, le bilan rapporté à la durée de vie

Nous pouvons aussi rapporter les valeurs de bilan pour établir un bilan moyen, qui sera donc le flux moyen équivalent de l'externalité analysée¹ sur la durée de vie du système (Eq 14). Cette valeur sera homogène à un débit, à un flux. Sans indice spécifique, le bilan moyen s'exprime donc de la façon suivante :

$$\text{Eq 14. } \frac{B}{T_{vie}} = f + \frac{S}{T_{vie}}$$

Comparaison des bilans moyens de l'énergie et de la matière

Dans ce chapitre, le principe consiste aussi à comparer les bilans de plusieurs systèmes physiques, en intégrant évidemment l'architecture dans cette analyse générale. Pour une construction, et sur la totalité de sa durée de vie, quels enseignements pourra-t-on par exemple déduire du rapport entre la totalité de la matière consommée rapportée à la quantité d'énergie consommée ? Aussi, on notera un paramètre essentiel dans le futur de notre exploration : le rapport entre la matière nécessaire à la production énergétique ou à la non-consommation énergétique (Fig. 440).

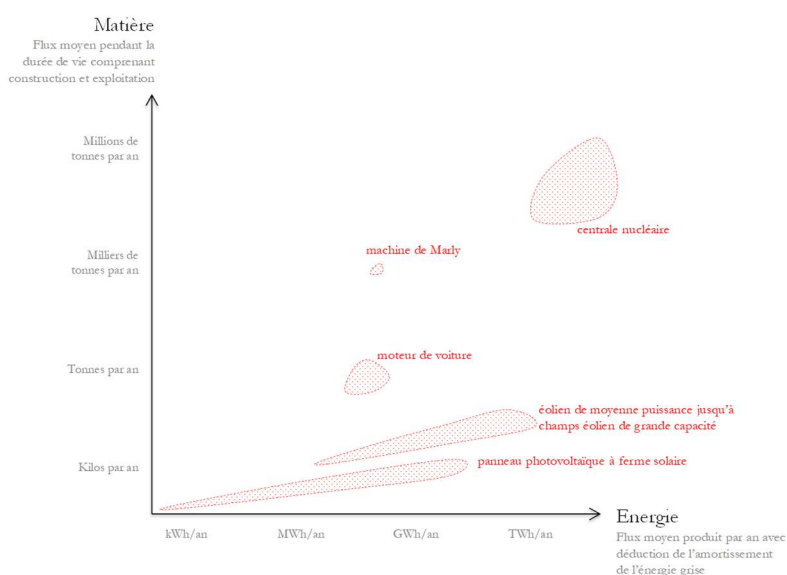


Fig. 440. Synthèse énergie-matière de plusieurs systèmes de production d'électricité. Comparaison entre B_e/T_{vie} et B_m/T_{vie}

L'âge des choses légères (séquestrant les pollutions du passé)

C'est l'une des clés du temps VII : faire en sorte que chaque unité de matière non renouvelable produise le maximum d'énergie renouvelable sur sa durée de vie. L'architecture, les aménagements, les artefacts du temps VII visent cet objectif ultime « matière nulle pour énergie infinie », une transformation de l'adage de Le Ricolais (chapitre #17). Quelques valeurs

¹ Energie ou matière ou CO₂ ou etc.

Fig. 441. Une éolienne en bois



ont été déjà indiquées au fur et à mesure de la partie 1, au cours de l'exploration des énergies renouvelables, notamment dans les chapitres #8, #9 et #12. À terme, à l'asymptote du temps VII, nos productions d'énergies renouvelables seront intégralement générées par des architectures essentiellement composées de matières renouvelables ou réemployées (Fig. 441).

Diagramme énergie-matière de quelques utilités énergétiques

Dans ce qui suit, nous appliquons ce principe d'analyse à quelques utilités énergétiques, avant de l'appliquer dans un second temps à l'architecture. Le diagramme ci-avant fait apparaître une grande variété de position sur cette carte de représentation (Fig. 440). Elles ont d'ailleurs quelques parentés avec les diagrammes de Vaclav Smil [1] (Fig. 442).

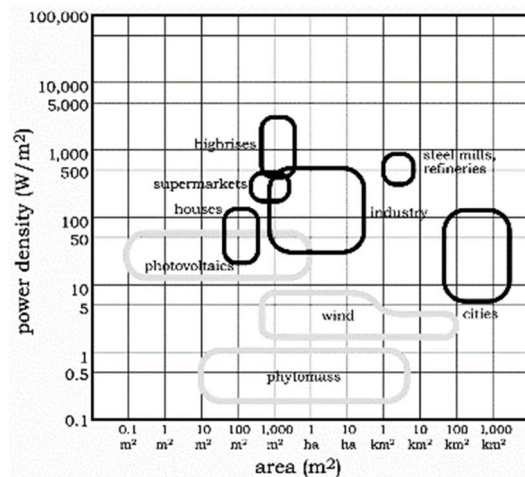


Fig. 442. Diagramme de Vaclav Smil

On distingue d'ailleurs quelques effets d'échelle : la somme de la matière consommée pour une centrale nucléaire est à la mesure du flux d'énergie transformée. On repère aussi les utilités plus efficaces, celles dont la pente est la moins élevée (Fig. 443). Nous interrogerons dans la partie 3, à travers quelques digressions sur des expériences constructives personnelles, les relations entre l'échelle des objets et leur bilan énergie-matière (notamment pour les Montagnes Solaires #25 et dans le prolongement de Wind-it #26).

Fig. 443. Un bilan du stock de matière nécessaire pour produire un kWh d'énergie mécanique ou électrique.

	Durée de vie	Matière flux moyen	Energie flux moyen	Matière / Energie
Panneau photovoltaïque	25 ans	0,8 kg/m ² .an	-180 kWh/m ² .an	4 gr par kWh
Eolienne à axe vertical - Wind-it	30 ans	0,5 t/an	-53 MWh/an	10 gr par kWh
Eolienne Vesta 1,5MW	30 ans	38 t/an	-3 750 MWh/an	10 gr par kWh
Centrale nucléaire	60 ans	201 000 t/an	-7 446 000 MWh/an	27 gr par kWh
Moteur de voiture	5 ans	300 kg/an	-2 900 MWh/an	103 gr par kWh
Machine de Marly	133 ans	912 t/an	-2 176 MWh/an	419 gr par kWh

Les temps de retour

La bonne échelle temporelle

Pour un système donné, et dans l'hypothèse où S et f sont de signe opposé, comme si l'on agrège énergie grise et flux de production d'une énergie renouvelable, il existe de fait une valeur associée à l'annulation du bilan, au bout d'un certain temps (Fig. 444).

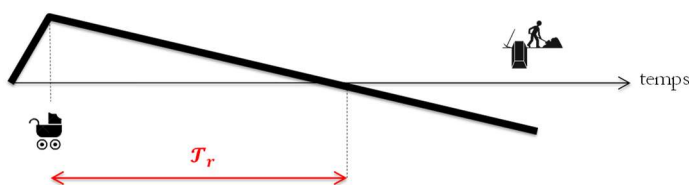


Fig. 444. *Le temps de retour.*

Cette valeur que nous noterons T_r et que nous nommerons « temps de retour », obéit par définition à l'équation Eq 15, par nullité de Eq 9.

$$\text{Eq 15.} \quad 0 = f \cdot T_r + S$$

Le temps de retour compare les externalités générées par la construction (ou la transformation d'une situation existante) au flux d'externalités associé à l'usage. En divisant un stock par un flux, on obtient en effet une quantité homogène à un temps (Eq 16). Dans le cas par exemple d'une infrastructure énergétique, ce temps de retour peut correspondre au rapport entre l'énergie nécessaire à l'édification (l'énergie grise) avec le flux de production (Fig. 445). Cette valeur est par contre négative (et n'est pas donc pas de sens) dans le cadre d'un flux positif (consommé).

Fig. 445. *Un temps de retour énergétique compris entre deux et quatre ans pour un panneau photovoltaïque.*



$$\text{Eq 16.} \quad T_{\text{retour}} = \frac{S}{-f} = -\frac{\text{stock}}{\text{flux}}$$

Cette analyse peut aussi être appliquée à d'autres externalités comme au ratio entre la quantité de matières initiales et la capacité de la machine à réhabiliter un flux de matière de basse qualité en haute qualité (i) ; ou au rapport entre émissions de gaz à effet de serre liées à la construction de la machine comparées aux émissions évitées lors de son activité ou par exemple dans le cas de la rénovation énergétique d'un existant lorsqu'en isolant la toiture d'un bâtiment (émissions d'un stock), on attend une diminution de la consommation de sa chaudière à gaz par exemple (réduction d'un flux d'émissions).

Relation avec le bilan

Notons que si ce temps de retour mesure un bilan d'énergie, il sera d'autant plus court que l'énergie grise nécessaire à l'édification du système producteur (S) sera faible tandis que la production sera élevée (f) (Eq 16). Ainsi, pour un coût énergétique de fabrication donné, le temps de retour énergétique d'un même panneau photovoltaïque positionné dans le plateau de l'Atacama au Chili¹, l'un des records planétaires d'irradiation solaire, sera par exemple bien moindre que si ce panneau est installé à Helsinki (#13).

Une généralisation selon plusieurs choix constructifs

Par extension, ce temps de retour peut aussi permettre de comparer deux scénarios constructifs différents (Eq 17) et d'évaluer alors la pertinence d'un choix de conception :

$$\text{Eq 17.} \quad \Delta B = 0 = \Delta f \cdot \mathcal{T}_{\text{retour}} + \Delta S$$

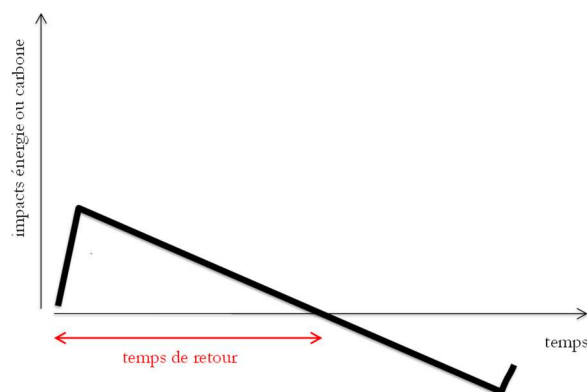
$$\text{Eq 18.} \quad \mathcal{T}_{\text{retour}} = -\frac{\Delta S}{\Delta f} = -\frac{\Delta \text{stock}}{\Delta \text{flux}}$$

Comme dans le cas du temps de retour, l'écart de bilan peut aussi fournir un bon indicateur pour distinguer deux choix de parti (mais sous réserve que leur durée de vie soit identique) :

$$\text{Eq 19.} \quad \mathcal{J}_r = \frac{\Delta S}{-\Delta f}$$

Le « choix de parti n°2 » sera a priori plus pertinent que le n°1 dans la mesure où au bout d'un certain temps, le bilan n°2 (Eq 12) est inférieur à celui du n°1 (Eq 11). Dès lors, si le temps de retour est positif et contenu dans une échelle de temps inférieure à la durée de vie estimée (Eq 19), alors le choix de parti n°2 serait pertinent du point de vue de la quantité analysée (Fig. 446).

Fig. 446. *Le temps de retour comme un rapport entre le stock et le flux. Cette grandeur n'a de sens que positive et suppose que l'un des termes, le stock ou le flux soit négatif*



¹ Environ 2900kWh par m² et par an, soit un flux moyen de plus de 300 W/m²

Par récurrence, ce principe de design pourrait s'appliquer à quantité de dilemmes constructifs d'une construction donnée et à une multitude d'échelles, et fournir ainsi un canevas global d'écoconception généralisée [3] (Fig. 447). Elle réclame toutefois le bon renseignement des stocks et des flux de chacun des options. L'architecture du temps VII est gourmande en informations. (Ce point est abordé au chapitre #18)

La conception dans les bilans

Pour notre approche globale, nous pourrions aussi faire débiter le temps zéro du bilan au moment de la conception, et non à l'instant du processus constructif. Avec ce regard élargi, nous intégrerons alors les externalités propres à l'acte de conception et de développement du projet. Ce point n'est pas neutre, il interpelle la cohérence de l'attitude des concepteurs, leur engagement quant à l'application sur leurs modes d'exercice des contraintes écologiques. Doit-on par exemple accepter de prendre l'avion pour un prospect qui souhaiterait confier une commande d'un lodge neutre en carbone à Madagascar ? Il est probable que l'aller-retour en avion coûte plus cher en carbone que le cumul des économies réalisées sur plusieurs années ! Au-delà du sujet sensible des déplacements professionnels, de l'inertie des modes de vie, de l'imaginaire culturel dominant, les modes d'organisation et les méthodes de travail ont un impact important sur l'environnement, et plus particulièrement sur les émissions de CO₂.

Combien de Wind-it pour rembourser les trajets en avion ?

Le projet Wind-it qui fait l'objet d'un chapitre dédié (#26) est une illustration de ce dilemme. Cette invention propose une solution se substituant à des petites infrastructures qui recourent habituellement aux énergies fossiles et donc émettrices de CO₂. Avant les commandes des premiers clients, les développeurs de notre start-up, fondée en 2014, ont dû parcourir la planète pour tester le marché et convaincre les prospects (Fig. 448). À fin 2016, voilà de façon grossière une estimation des gaz à effet de serre : environ 40 tonnes de CO₂ à raison d'environ vingt allers-retours intercontinentaux (S_{CO_2}). Dans l'hypothèse où une solution Wind-it évite l'émission annuelle de 15 tonnes de CO₂ par an ($-f$), cela permet de calibrer le temps de retour carbone de l'innovation. Ainsi, trois Wind-it installées et en activité au moins une année, devraient en toute rigueur compenser le surcoût initial d'émissions de carbone lié à l'innovation. L'équation du nombre N minimum de tours Wind-it permettant de « rembourser » la « mise de départ carbone » initiale s'écrit à partir de (Eq 15) :

$$\text{Eq 20.} \quad 0 = N \cdot f \cdot 1 + S_{CO_2}$$

Fig. 447. *Le surplus d'énergie grise (et d'émissions CO₂) générée par la complexité augmentée de la voiture hybride est-il rapidement remboursé ? Tout dépendra de l'usage effectif.*



Fig. 448. *Wind-it au Madagascar*



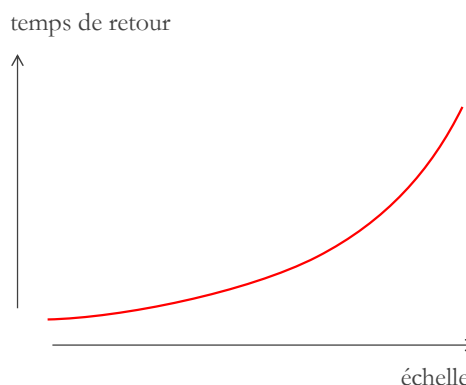
Exemple du bâtiment et de son isolation en temps de retour

Le bilan énergie-matière (et par extension écologique) se traduit à toute échelle, à celle modeste d'un petit projet de construction voire pour le choix de ses composants. À titre d'exemple, nous pourrions en particulier étudier l'épaisseur idéale d'un isolant thermique, dans une situation donnée. En première approche, pour un matériau homogène, le coût écologique de sa mise en œuvre croît avec le volume mis en œuvre et donc avec l'épaisseur utilisée sur l'enveloppe du bâti. En toute rigueur, la pose d'un isolant induit des coûts de mise en œuvre indépendants de son épaisseur : éléments ponctuels de fixation, systèmes de raccord aux angles et aux franges du manteau, etc. En première approximation, nous considérons cependant que le stock S croît selon l'épaisseur e . En contrepartie, plus l'isolant est important, plus la résistance de paroi augmente, et à la clé, l'efficacité thermique. Au premier ordre, l'écart de flux des besoins thermiques croît de façon inverse à l'épaisseur pour la conduction et la valeur constante (l'unité) correspond à la contribution de la part convective, indépendante de l'isolant. Le temps de retour typique s'écrit alors :

$$\text{Eq 21.} \quad \mathcal{T} = \frac{\Delta S}{\Delta f} \propto \frac{e}{1-\lambda/e}$$

Cette relation (Eq 21) montre que le temps de retour (écologique ou financier) croît avec la quantité d'isolant mise en œuvre, voire de façon quadratique (Fig. 449).

Fig. 449. Temps de retour en fonction de l'épaisseur d'un isolant. Évolution du temps de retour selon l'épaisseur de l'isolant : plus l'épaisseur est importante, plus il faut attendre pour retrouver un équilibre sur le bilan en énergie (ou en CO₂).



La nécessité de viser des temps de retour courts, bien en-deçà des temps de vie caractéristiques des composants de l'architecture réclame donc de modérer la quête de la performance en usage afin de trouver les bons optimaux écologiques (et financiers). Hubert Lempereur concluait de façon similaire au terme de *Son histoire de l'isolation* [4].

Exemple du bâtiment et de son isolation en temps de retour

Avec un autre regard, et en auscultant l'écart de bilan associé à la variable « épaisseur d'isolant thermique », e , la relation algébrique s'écrit :

$$\text{Eq 22.} \quad \Delta B = \Delta f \cdot T_{vie} + \Delta S \propto T_{vie} \left(1 - \lambda/e \right) + \alpha e$$

Le tracé du bilan fait apparaître un point minimum. Évidemment, cette variable dimensionnelle, l'épaisseur optimale, est spécifique à chaque situation de projet et à la nature des isolants thermiques testés¹. À chaque contexte, et plus particulièrement du binôme climat-programme, et si le maître d'ouvrage permet cet investissement de « matière grise », d'informations et d'intelligence apportée au projet [5], une approche complète avec plusieurs choix d'isolants serait idéale afin d'arbitrer sur des choix pertinents locaux.

Le temps de retour carbone du triple vitrage

Ce scénario documente le choix entre un double vitrage et la plus-value d'un passage triple vitrage, pour une paroi exposée au sud et sans masque. L'architecte du temps VII pourrait être confronté à ce choix à la fois dans le cas d'un édifice neuf ou dans le cas de la transformation d'un existant. Le triple vitrage renforce certes l'isolation moyenne de l'ensemble menuisé, mais sa capacité à transmettre l'énergie solaire (facteur solaire) est réduite du fait d'une épaisseur de verre supplémentaire. Dès lors, le triple vitrage devrait a priori permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre (f_{CO_2}) en contrepartie d'une plus-value constructive de carbone gris (S_{CO_2}). Les hypothèses pour opérer ce choix sont les suivantes :

	Situation initiale Double-vitrage	Situation finale Triple-vitrage
Isolation	1,8 W/m ² .°C	1,1 W/m ² .°C
Facteur solaire	0,70	0,60
Carbone gris (S_{CO_2})	30kgCO ₂ e par m ²	50kgCO ₂ e par m ²

Pour cette simulation, il convenait aussi de choisir une valeur typique d'intensité carbone de la production thermique. Les valeurs habituelles sont les suivantes :

Charbon	384 grCO ₂ /kWh _{th}
Fioul domestique	300 grCO ₂ /kWh _{th}
Gaz naturel	234 grCO ₂ /kWh _{th}
Gaz propane ou butane	274 grCO ₂ /kWh _{th}

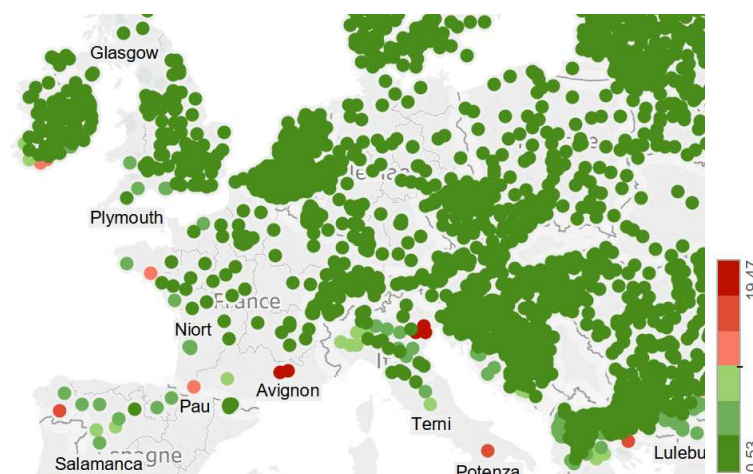
¹ Encyclopédie des isolants par CSTB : une diversité à rappeler dans la question de l'épaisseur optimale

Fig. 450. Carte de temps de retour carbone pour le passage d'un double en triple vitrage et dans le cas d'une production de chaleur par gaz naturel. Ci-dessous, extrait de la carte avec les emplacements où les temps de retour carbone seraient supérieurs à 5 ans.



La carte ci-dessous a été établie avec l'hypothèse d'une production thermique par le gaz pour l'ensemble des situations testées. La valeur de bascule retenu est de 5 ans. De fait, un temps de retour plus long interrogerait les vertus de la complexité matériautique supérieure du triple vitrage : dans la mesure où la production thermique se « verdissait » (passage au biogaz, au solaire thermique etc.), la réduction des émissions d'usage (f_{CO_2}) augmenterait d'autant le temps de retour carbone.

Fig. 451. La carte des temps de retour carbone pour le passage d'un double vitrage en un triple vitrage



Une traduction économique

EROI et taux de retour (TRE)

Temps de retour et taux de retour énergétique

Les bilans présentés avant sont d'abord des écritures physiques du métabolisme du projet. Sans doute avant, la finance s'est emparé d'instruments permettant d'évaluer la performance économique des projets. Parmi ceux-là, le EROI, pour *Energy Return On Investment*,¹ ou en français le TRE, pour taux de retour énergétique est le rapport d'énergie nette utilisable par une source donnée d'énergie, rapportée à la quantité d'énergie dépensée pour obtenir cette énergie. À la différence du temps de retour vu précédemment, le taux de retour est sans unité : c'est une proportion temporelle.

$$\text{Eq 23. } TRE = EROI = \frac{-fT_{vie} + S}{S} = \frac{T_{vie}}{T_r} + 1$$

Pour une technique donnée de production d'énergie, le taux de retour énergétique doit donc présenter une valeur supérieure à l'unité, pour être considérée comme source d'énergie. Il est donc nécessaire que la durée de vie caractéristique dépasse le temps de retour de l'objet analysé. Dans le

¹ Ou encore EROEI, "Energy Returned On Energy Invested".

cas des énergies renouvelables, il est crucial de parvenir à maximiser leur pérennité afin d’optimiser leur taux de retour énergétique, paramètre important des architectures du temps VII. Cette notion de taux de retour peut aussi s’appliquer au cas des énergies fossiles, en particulier à la croissance des taux de retour des extractions de brut [2]. Le tableau ci-dessous détaille quelques fourchettes de valeur de taux de retour¹ :

Type d’énergie	EROI ou TRE
Biodiesel	1.3
Sable bitumineux	3
Huile de schiste	5
Solaire photovoltaïque	6.8
Nucléaire	10
Hydrocarbures	14.5
Éolien	18
Charbon	80
Hydroélectrique	100

Dans *Comment tout peut s’effondrer* [6], Servigne et Stevens rappellent la relation étroite entre le TRE et le prix du baril de pétrole en citant Heun et De Witn “*Energy return on (energy) invested (Eroi), oil prices, and energy transition*” : plus le taux de retour est faible, plus l’extraction de cette énergie fossile est coûteuse.

Le Levelized Cost of Energy (LEC) ou le coût généralisé

Définition

Le LEC est une méthode comptable pour évaluer le coût de production d’une énergie utilisée. De façon simplifiée, le LEC établit le rapport entre la somme des coûts d’une installation énergétique (avec ses capex et opex, voir chapitre #5) et le cumul de sa production pendant sa durée de vie. Le LEC intègre dans sa formule (Eq 24) l’actualisation financière avec le paramètre r , en général de quelques pourcents.

$$Eq\ 24. \quad LEC = \frac{\sum_{t=1}^N \frac{I_t + M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^N \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Avec :

¹ Source : <http://energie-developpement.blogspot.com/2012/10/EROEI-taux-retour-energetique.html>

LEC , coût de production (en € par kWh)

I_t , dépenses d'investissement à l'année t (en €)

M_t , dépenses d'entretien et maintenance pour l'année t (en €)

E_t , production d'énergie (ou non-consommée) (en kWh)

r , taux financier (en %)

N , durée de vie (en années)

Le LEC est une forme particulière de temps de retour (Eq 16) : son numérateur comprend des grandeurs homogènes à des stocks (S), tandis que le dénominateur cumule des flux (f). Le LEC monétarise le temps de retour et y incorpore un amortissement financier. Il agrège un coût matière-énergie de la génération du flux d'énergie. Le LEC est paramètre déterminant pour justifier la pertinence des énergies renouvelables et selon leur situation d'implantation. La chute du LEC du photovoltaïque et de l'éolien ont été pour partie responsable de la perte de compétitivité des Montagnes Solaires (#25)

Type d'énergie	LEC ¹ (\$/MWh) min	max
Solaire photovoltaïque, toiture résidentiel	187	319
Solaire photovoltaïque, grande ferme	46	53
Éolien	30	60
Nucléaire	112	183
Charbon	60	143
Gaz, cycle combiné	48	78

Le LEC comme stratégie de design

Comme nous l'avons vu avant, le LEC s'applique de prime abord à des utilités de productions énergétiques (dont les techniques abordées aux chapitres #8 et #13). Dans ce qui suit, nous testons un détournement de cette évaluation en l'appliquant à une comparaison de consommation entre situation A et une situation B. De fait, une non-consommation correspond bien virtuellement à une production. Le remplacement d'un simple vitrage par un double vitrage peut être considéré comme une centrale de production potentielle, en évitant des dépenses thermiques. Nous avons déjà abordé ces comparaisons relatives entre un projet n°1 et un projet n°2 dans ce chapitre autour des notions de bilan énergie-matière et de temps de retour.

¹ Source, extrait d'estimation de la banque Lazard, 2017.

Réduire ou produire ?

Là encore, l'architecture du temps VII réclame des outils, des thermomètres simples, afin d'évaluer une stratégie. L'intérêt du LEC est qu'il permet d'interroger le dilemme entre production et non-consommation d'énergie. De fait, pour certaines situations, le coût de la non-consommation peut devenir très prohibitif et il serait sans doute préférable de construire (ou de réhabiliter) plus simplement et diriger l'investissement de façon contextuelle et adaptée [7]. Cet enjeu est évoqué au terme de l'exploration du temps V, de l'architecture-énergie (#16).

L'exemple de la transformation des existants

Poser le problème

L'architecture du temps VII posera un regard neuf sur le patrimoine existant, en ayant pleinement conscience de la dette écologique d'une démolition-reconstruction. Les déconstructions seront sans aucun doute beaucoup plus sélectives : l'architecture du temps VII sera une nouvelle ère de la sauvegarde et de la préservation des actifs existants d'actifs de matières et la dette d'énergie grise et de carbone gris qu'ils ont pu réclamés pour exister. Concernant la mise à niveau énergie-carbone des existants, l'approche en LEC sera l'un des outils utiles pour ajuster l'investissement en matières (les ajouts de stock « *S'* » présentés au chapitre #5). Sur le volet énergie et les besoins de chauffage, pour un même bouquet technique, le rendement économique des travaux est fonction *a minima* des quatre variables suivantes :

1. Le coût des travaux associé à la rénovation ou la plus-value de travaux associée à une amélioration technique d'un projet neuf (consistant par exemple à opter pour du triple vitrage plutôt qu'à du double vitrage). Il s'agit de la variable *I* mentionnée en Eq 24 ou l'équivalent d'un *S'*.
2. L'intensité climatique à l'emplacement géographique du bâti (avec souvent comme indicateur principal pour la demande de chauffage, les degrés-jours unifiés) ainsi que l'intensité de l'usage de la construction (soit le nombre d'heures d'utilisation du bâtiment, corrélé aux températures de consigne associées à cet usage).
3. La durée d'obsolescence (ou la durée d'utilisation) du système technique choisi (et la provision en conséquence de l'amortissement de l'investissement consenti) et les coûts récurrents d'entretien-maintenance à estimer pendant la durée de vie (soit le temps de vie présenté en #5).
4. Les coûts financiers induits par le type de montage choisi : investissement sur fonds propres, prêts bancaires etc. Par souci de simplicité, nous prendrons par la suite un taux d'actualisation financier s'échelonnant sur une durée de vie identique au système choisi.

Appliquée à l'échelle territoriale, la péréquation des quatre variables permet de hiérarchiser les priorités d'intervention sur le parc à rénover. L'analyse présentée dans la suite de ce chapitre, insiste sur la nécessité d'explorer de façon décentralisée les mécanismes locaux, permettant de créer les effets de seuil, permettant le déclenchement rapide des travaux de rénovation énergie-carbone.

Une méthode simplifiée pour les existants

Nous avons vu que la mesure des économies d'énergie induites par une rénovation fonctionne à l'identique de l'évaluation du coût de production d'énergie selon une technologie donnée. Un investissement est consenti au temps initial afin de réduire la consommation énergétique : on mesure alors l'économie de consommation comme une production équivalente. Le LEC du bouquet testé permet d'identifier les points de parité, ou les effets de seuil à engendrer dans le cadre de la tarification progressive dans un contexte donné. Selon ce choix d'analyse, par souci de simplification de Eq 24, en considérant que le taux d'actualisation est de l'ordre de quelques pourcents, on peut alors établir qu'au premier ordre, le coût de production équivalent (en énergie utile thermique) est alors déterminé par l'égalité suivante :

$$\text{Eq 25.} \quad LEC_{\text{rénovation}} \cong \frac{(I_{\text{fourniture}} + I_{\text{pose}})}{\eta_{\text{bât}} DJU_{\text{filtré}}} \left(\frac{1}{N} + \frac{r}{2} \right) + \frac{M}{E}$$

Avec :

LEC , coût de non-consommation (en € par kWh)

$I_{\text{fourniture}}$, coût de fourniture de la rénovation (en €)

I_{pose} , coût de la main d'œuvre (en €)

N , durée d'obsolescence de la rénovation (en année)

$\eta_{\text{bât}}$, variation d'efficacité énergétique du bâti (en kWh/°C.j)

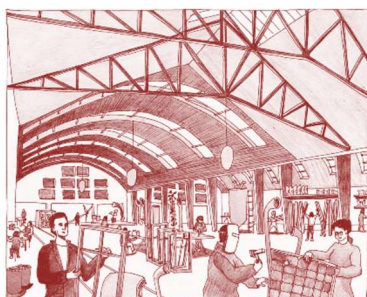
$DJU_{\text{filtré}}$, degrés-jours filtrés des usages, selon la réalité de la température de consigne et de l'occupation réel des locaux (en °C.j)

Rappelons que pour ce qui concerne les degré-jours unifiés, les DJU annuels moyens varient en France de 1400 pour la Corse à 3600 dans les Alpes jusqu'à 3800 DJU dans le Jura pour une température de consigne de 18°C dans un local occupé de façon permanente en période de chauffe.

Un premier exemple

Dans la simulation ci-après, nous évaluons l'effet induit par le remplacement de 10m² de simple vitrage par du vitrage isolant pour un logement. Dans cette première approche, le coût d'entretien-maintenance a été négligé (M). La détermination de cinq variables permet alors d'estimer le coût de production équivalent des kilowattheures thermiques économisés :

Fig. 452. *La Renaissance des Fabriques. L'atelier de reconfiguration des tissus existants du quartier. Dessin Diane Berg.*



1. I, l'investissement initial : le coût de remplacement des menuiseries comprenant la dépose, la fourniture et la pose des fenêtres isolantes. On suppose dans cet exemple que les travaux sont uniquement motivés par les économies d'énergie. Il y aurait évidemment des effets d'aubaine si cette transformation était la résultante d'autres nécessités : amélioration phonique, confort hygrothermique, ravalement de la façade etc.
2. E, économies annuelles de chauffage, produit de deux paramètres : le renforcement de l'efficacité intrinsèque du bâti par cette isolation renforcée (i). Notons que cette valeur pourra comprendre une incertitude relative à la qualité de la fourniture comme de la pose. L'agrégation de l'intensité climatique et de l'usage fonction à la fois de la situation géographique, de la température de consigne et du nombre d'heures d'usage du bâti considéré (ii).
3. N, la durée d'obsolescence de l'installation. Là encore, la qualité de la fourniture et le soin de la pose peuvent avoir un impact.
4. Enfin, r, le coût d'actualisation de l'investissement initial sur la durée du temps provisionné d'obsolescence.

Résultats

Les résultats de la simulation montrent l'extrême sensibilité du résultat final selon les cinq variables. Sur la droite du tableau (Fig. 453), l'histogramme compare les coûts de non-production de chaque tirage aux prix typiques des énergies finales thermiques (gaz et électrique).

Fig. 453. Exemple de LEC appliqué pour le remplacement de fenêtres simple vitrage en double vitrage, dans le cas d'une rénovation par exemple.

EXEMPLE DU REMPLACEMENT DE 10m ² DE FENETRES SIMPLE VITRAGE EN DOUBLE VITRAGE							
situation de rénovation	I coût des travaux	ecart efficacité W/C	DJU °C.j / an	N années	r actualisation	coût énergie € TTC/kWh _{TH}	gaz électricité
scénario initial # 1	4 000 €	40	2500	15	4%	→ 0,14 €	
scénario # 2	4 000 €	40	2000	15	4%	→ 0,18 €	
scénario # 3	4 000 €	40	3000	15	4%	→ 0,12 €	
scénario # 4	6 000 €	40	2500	15	4%	→ 0,22 €	
scénario # 5	2 000 €	40	2500	15	4%	→ 0,07 €	
scénario # 6	4 000 €	40	2500	15	2%	→ 0,13 €	
scénario # 7	4 000 €	40	2500	15	6%	→ 0,16 €	
scénario # 8	4 000 €	20	2500	15	4%	→ 0,29 €	
scénario # 9	4 000 €	50	2500	15	4%	→ 0,12 €	
scénario # 10	4 000 €	40	2500	10	4%	→ 0,20 €	
scénario # 11	4 000 €	40	2500	20	4%	→ 0,12 €	
scénario # 12	8 000 €	30	1500	10	6%	→ 0,96 €	
scénario # 13	2 000 €	50	2500	20	2%	→ 0,04 €	

Ces tests préliminaires révèlent :

1. La nécessité de mettre en place une stratégie permettant de réduire les coûts d'investissement et notamment les coûts associés à la pose. Elle interpelle également la compétitivité économique des composants de fourniture.
2. La nécessité de hiérarchiser la rénovation selon la situation géographique et l'intensité d'usage. Ce premier exemple montre aussi le besoin de spatialiser les approches, pour adapter les filières en fonction de la régionalisation des coûts de production.
3. Enfin, la durée d'obsolescence et le financement agissement également au premier ordre du coût de production équivalent.

Sur cet exemple, et à l'aune des tarifs TTC de quelques vecteurs finaux, seules les cas 5 et 13 semblent d'emblée compétitifs. Les cas 3,9 et 11 peuvent être intéressants si l'énergie finale utilisée pour le chauffage est de l'électricité. Notons toutefois que le nombre de cas pourrait être augmenté dans le cadre de l'application d'une tarification progressive (et donc si coût de production est en-deçà d'un tarif « malussé », ce point est développé dans le chapitre #21).

Quelques cartes de LEC pour le remplacement de baies

Scénario du passage d'un simple vitrage en double vitrage

Dans ce qui suit, nous allons établir l'importance de la situation climatique pour apprécier l'impact économique de la transformation d'un existant, dont les vitrages exposés en façade sud (et dans l'hypothèse d'absence de masque), seraient remplacés par des doubles vitrages plus isolants. Les caractéristiques de l'état initial (situation n°1) et de l'état transformé (n°2) sont résumées ci-dessous :

	Situation initiale Simple vitrage	Situation finale Double-vitrage
Isolation	5 W/m ² .°C	1,8 W/m ² .°C
Facteur solaire	0,85	0,70

Cette analyse complète les développements déjà abordés au cours du chapitre #15, dédié notamment au solaire passif. Comme développée avec l'équation Eq 5, les « plongées climatiques » de ces situations n°1 et n°2 prendra en compte à la fois la température équivalente de l'emplacement géographique (établie à partir des degrés-jours unifiés) et le flux solaire moyen récupérable sur une façade sud sans masque pendant une période

de chauffe comprise entre le 15 octobre et le 15 avril¹. Pour ce scénario, nous retenons les paramètres suivants :

$$I = 400\text{€ TTC par m}^2$$

$$N = 25 \text{ ans}$$

$$r = 2\%$$

La carte ci-dessous (Fig. 454) est une géographie de la pertinence du remplacement de simples vitrages en vitrages isolants (pour une façade sud sans masque). Les points verts correspondent à des emplacements où les coûts équivalents de non-consommation sont compétitifs, ceux dont les LEC sont à parité avec les vecteurs typiques, comme le gaz ou l'électricité avec des prix de fourniture de l'énergie thermique finale comprise entre 0,04 et 0,10 €. À l'inverse, les points oranges et rouges mentionnent des situations climatiques non pertinentes et où l'intérêt économique d'une telle transformation, selon les hypothèses décrites serait ci-avant, seraient douteuses, à moins d'autres justifications comme le confort acoustique et hygrothermique. À La Rochelle, avec un prix de non-consommation à 18c€ par kWh thermique, il serait pertinent de sonder d'autres alternatives sans compter les impacts potentiellement défavorables vis-à-vis du confort estival avec une isolation renforcée.



Fig. 454. Carte européenne du LEC du passage d'un simple vitrage en double vitrage. Scénario bas.

Scénarios pour le passage d'un double vitrage en triple-vitrage

La situation précédente illustre un dilemme relatif à la transformation des existants. Ce scénario interroge l'interrogation quant aux choix entre un double vitrage et la plus-value d'un passage triple vitrage pour une paroi exposée au sud et sans masque. L'architecte du temps VII pourrait être confronté à ce choix à la fois dans le cas d'un édifice neuf ou dans le cas de la transformation d'un existant. Le triple vitrage renforce certes l'isolation moyenne de l'ensemble menuisé, mais sa capacité à transmettre l'énergie solaire (facteur solaire) est réduite du fait d'une épaisseur de verre supplémentaire. Les hypothèses pour opérer ce choix sont les suivantes :

¹ Données climatiques issues de la base de données horaires de la Nasa, année 2010 (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/FTPSubset.pl>)

	Situation initiale Double-vitrage	Situation finale Triple-vitrage
Isolation	1,8 W/m ² .°C	1,1 W/m ² .°C
Facteur solaire	0,70	0,60

Nous retenons les paramètres suivants :

- Plus-value de 100€ par m² (ΔI)
- Durée de vie estimée à 25 ans (N)
- Taux d'actualisation de 2% (r)

La carte ci-dessous présente d'abord les géographies où l'alternative du triple vitrage semble peu pertinente (Fig. 455). On constate qu'une grande partie de l'Europe méridionale est concernée par cette situation, dont une grande part du territoire français. À Quimper, le coût de non-consommation atteindrait même 60c€ par kWh thermique ! A ce coût-là, il serait beaucoup plus rentable dans un autre système de production thermique renouvelable comme des panneaux solaires thermiques par exemple (#11).

Fig. 455. Extrait de carte européenne du LEC du passage d'un double vitrage en triple vitrage. Emplacements prohibitifs avec un coût de non-consommation supérieur à 15c€ par kWh

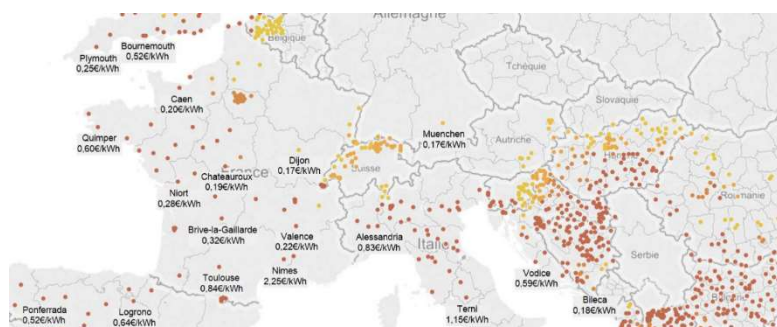
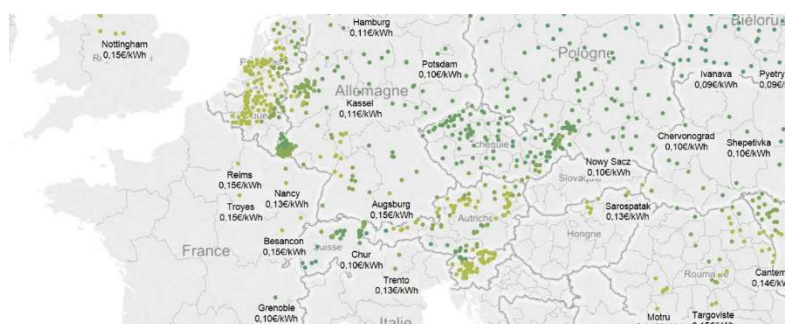


Fig. 456. Extrait de carte européenne du LEC du passage d'un double vitrage en triple vitrage. Emplacements compétitifs avec un coût de non-consommation inférieur à 15c€ par kWh



En extension du chapitre consacré aux chronogrammes dans la première partie (#5), ce chapitre a présenté quelques métriques pour sonder les stratégies énergie-matière-carbone de l'architecture du temps VII, et ce, à différentes échelles de conception, jusqu'aux composants architecturaux. Le champ d'investigation est immense et le chapitre suivant énonce des hypothèses de recherche complémentaires et interpelle sur la dimension politique du temps VII et la nécessité d'élaborer un récit désirable, collectif et inclusif pour l'ensemble des mutations à venir [8].

*

Bibliographie

1. SMIL Vaclav, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015
2. AUZANNEAU Mathieu, *L'or noir, la grande histoire du pétrole*, La Découverte, 2015
3. KAZAZIAN Thierry, *Design et développement durable : Il y aura l'âge des choses légères*, Victoires Éditions, 2003
4. LEMPEREUR Hubert, « Histoire de l'isolation », feuilleton en sept épisodes, *d'Architecture*, 2017
5. CHOPPIN Julien, DELON Nicola (direction de l'ouvrage), *Matière Grise*, Pavillon de l'Arsenal, 2014
6. SERVIGNE Pablo, STEVENS Raphaël, *Comment tout peut s'effondrer. Petit manuel de collapsologie à l'usage des générations*, Seuil, Anthropocène, 2015
7. MENARD Raphaël, « Le pic de l'architecture », pp161-168, *Matière Grise*, Direction de l'ouvrage Encore Heureux, architectes, Edition et distribution exclusive, Pavillon de l'Arsenal, 2014
8. DION Cyril, *Petit manuel de résistance contemporaine*, Actes Sud, 2018

#21 Programmes du temps VII

Quelques propositions pour accélérer l'activation du temps VII. Vers une nouvelle participation des concepteurs au débat public : sans doute les plus amènes à déterminer la bonne échelle, à dessiner la juste proportion des solutions des transitions. Ouvertement politique, ce chapitre recense et récapitule quelques propositions amorcées depuis une quinze dernières années.

Un big-bang nécessaire

Lors du deuxième congrès international des mathématiciens tenu à Paris en août 1900, David Hilbert présenta une liste de problèmes qui tenaient jusqu'alors les mathématiciens en échec. Ces problèmes devaient, selon Hilbert, marquer le cours des mathématiques du 20^{ème} siècle, et a posteriori, il ne s'était pas trompé. Publiée après la tenue du congrès, la liste définitive comprenait 23 problèmes, aujourd'hui appelés les problèmes de Hilbert. L'architecture du temps VII génère une myriade d'enjeux et d'inspirations. Elle réclame des outils simples pour conforter les choix de parti (#20). Elle soulève aussi une multitude de champs d'investigation à différentes échelles. De façon thématique, ce chapitre détaille quelques propositions.

Aménagement du territoire

Proposition : accélérer la transition énergétique dans les territoires ruraux

En zones peu denses, la dépendance à l'automobile (et la consommation de carburant qui va avec) va souvent de pair avec des tissus résidentiels étalés, moins compacts, et donc plus énergivores toutes choses par ailleurs égales. La conjugaison de ces caractéristiques inhérentes à la basse densité augmente de façon importante le budget énergétique des ménages [1]. Le cumul des charges du carburant des mobilités individuelles et du chauffage pour le logement peut aisément atteindre 5000 euros par an et par ménage. La proposition serait donc la suivante : la puissance publique dédiée des investissements spécifiques vers ces territoires de faible densité, et plus particulièrement ruraux. Pour un double objectif donc, à la fois de transition énergétique, comme de cohésion démocratique - ces territoires souffrant souvent d'un sentiment de délaissement - , des mécanismes d'aide, fléchés vers les basses densités, seront créés afin de renforcer de façon simultanée l'efficacité énergétique du bâti et des mobilités individuelles.

Par exemple vers la rénovation énergétique des existants ou par des incitations à l'intégration d'énergies renouvelables¹, ou des primes à la casse « augmentées » et orientées vers des solutions de mobilité très peu émettrices, comme les véhicules électriques ou hybrides rechargeables. Les dépenses énergétiques pourraient alors être divisées facilement par cinq et les émissions de gaz à effet de serre au moins d'autant (Fig. 457).

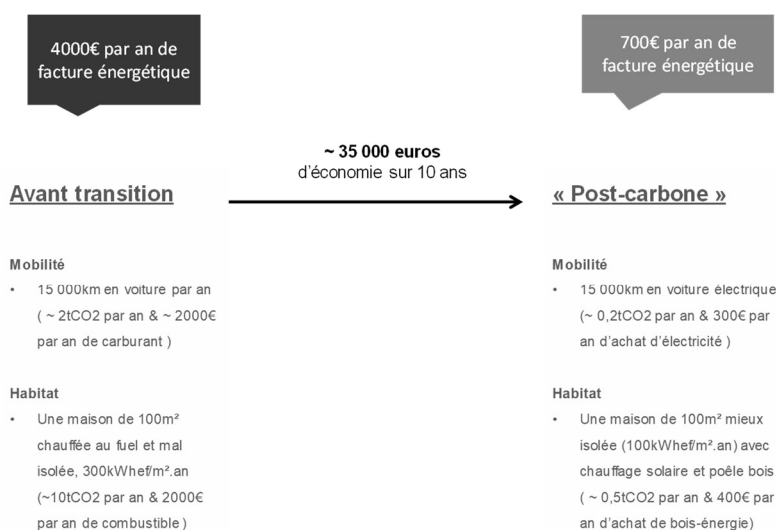


Fig. 457. Une synthèse présentée lors d'atelier des territoires en Corrèze, avec Obras, juillet 2017 : les économies réalisées par le passage à un couple bâtiment bas carbone : de 12 tonnes de CO₂ à moins d'une tonne.

Cette proposition est à la fois issue de l'article rédigé sur les relations entre densité et énergie, *Dense cities in 2050 : the energy option* (2011) [1], comme des discussions lors de missions comme celles effectuées avec Elioth pour une prospective de l'Ouest varois auprès de la DTM (2016), ou plus récemment lors d'ateliers de territoire en Corrèze en expertise énergie-climat pour l'équipe d'Obras (2017).

Proposition : des territoires positifs et le réaménagement des sols

Il est urgent de réveiller la fierté des territoires à faible densité : territoires agricoles, espaces sylvicoles, zones péri-rurales, aires péri-urbaines, friches industrielles... Ils sont les futurs « bassins versants d'énergie », les « bassins versants de matériaux », comme les nécessaires « bassins de séquestration de CO₂ » [2]. Les habitants de ces territoires attendent un signal fort qui les replacerait ainsi au centre du collectif de la nation. Les transitions passeront assurément par la basse densité, plutôt que par les grands centres urbains et les métropoles (#22). Plus que de *smart cities*, nous avons besoins de villes, de bourgs, de hameaux, fiers et placés au

Fig. 458. Changement d'usage des sols agricoles



¹ Une vertu des territoires à basse densité et du ratio intéressant surface de toiture par personne et donc d'un productible de photovoltaïque *pro persona* intéressant.

centre des préoccupations politiques : ils sont des leviers formidables pour les transitions, la basse densité facilitant aussi les libertés d'expérimentation. Un débat important est à enclencher avec la communauté agricole pour l'affectation des sols et la part dévolue aux productions animales, responsables de façon directe et indirecte d'émissions importantes de gaz à effet de serre (Fig. 458). À titre d'exemple, une vache émet annuellement l'équivalent d'une à deux tonnes de CO₂ (émissions de méthane liées à la digestion) et elle réclame environ un hectare comme emprise alimentaire. Si l'usage de certains sols (élevage extensif par exemple) était reconsidéré et transformé en forêts durablement exploitées, la capacité de réduction serait alors de plus de 5 tonnes par hectare et par an. Le mode d'occupation des sols est un enjeu considérable pour une feuille de route nationale de neutralité carbone, comme pour l'autonomie énergétique, en scénarisant notamment les « plans de récolte énergétique » [3] (#22).

Proposition : instaurer une viscosité géographique des échanges commerciaux

Ce serait une variation de la taxe Tobin, destinée à relocaliser les économies et à encourager les savoir-faire locaux. En première esquisse, cette fiscalité géographique s'appuierait sur une grille mondiale abstraite, calquée sur l'orientation de la grille latitude-longitude, et selon un pas de 100 par 100 kilomètres (Fig. 459). Pour toute transaction entre deux points situés sur deux carreaux limitrophes de la grille, la ponction serait par exemple de 0,1% (ce pourcentage serait évidemment à calibrer). Dans le cas d'une transaction entre deux entités distantes de mille kilomètres, la taxe serait alors de 1%, et elle atteindrait 10,5% pour dix mille kilomètres et 22% pour une transaction à l'antipode. Cette taxe générerait ainsi une viscosité géographique dans les échanges, limiterait et ralentirait la vitesse de circulation des énergies et des matières à l'échelle planétaire. Elle amortirait la mondialisation des échanges. Sa collecte financerait une agence mondiale de relocalisation, cette dernière redistribuerait ensuite son budget vers des initiatives concourant à reconstituer des mix industriels et agricoles, locaux, et plus résilients et évidemment en phase avec les attentes du temps VII.

Proposition : des typologies de stratégies de neutralité carbone par densités

À l'échelle nationale, force est de constater la difficulté de la neutralité carbone, eu égard la densité moyenne et l'affectation des sols (#22). Aussi, et dans le prolongement de l'étude menée pour la ville de Paris pour sa stratégie de neutralité carbone à horizon 2050 [2], il serait nécessaire de décliner ces visions de moyen et long terme pour différentes typologies de densité et de situations territoriales : échelles métropolitaines nationales, villes moyennes, petites villes et bourgs, espaces ruraux, etc. À l'échelle nationale, puis à l'échelle continentale, ce seraient des scénarios gigognes de neutralité, qui permettraient de tester leur couplage et leur consolidation (Fig. 460). Pour les territoires littoraux et les surfaces maritimes, des analyses spécifiques seraient conduites et participeraient ainsi à l'écriture d'un scénario national global, avec l'intégration de l'outre-mer et de la totalité des surfaces maritimes.

Fig. 459. Une taxe Tobin géographique

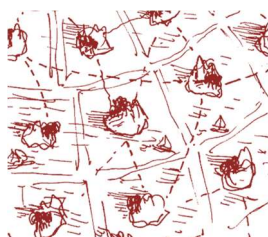
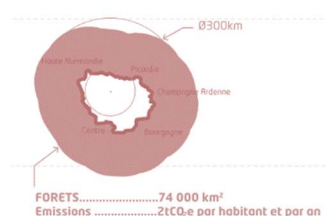


Fig. 460. Bassin versant carbone potentiel de l'Ile-de-France



Fiscalité et économie

Proposition : une fiscalité incitative récompensant l'intensité d'usage

Cette proposition concerne un système de bonus-malus fiscal et dont l'assiette serait partiellement spatiale (habitation, foncier etc.) et qui encouragerait l'utilisation maximale des surfaces existantes. Les impôts dont l'assiette est bâtie sur la surface seraient progressifs. Cette transformation fiscale pourrait stabiliser l'évolution tendancielle de la surface résidentielle rapportée à l'habitant, en incitant à « l'intensification qualitative », voire à réduire à terme l'emprise spatiale individuelle. Pour la surface résidentielle, on constate en effet une évolution croissante de la surface moyenne par personne. Cette « dilution » génère des externalités énergétiques et écologiques considérables : accroissement des besoins de construction (énergie grise, carbone gris etc.) et augmentation des externalités liées à l'exploitation. Cette inflation affecte aussi l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâti : la réduction de la demande (en kWh par m² par exemple) étant diminuée -voire annihilée- par une augmentation des mètres-carrés. L'idée consiste à moduler le coût marginal de la fiscalité : ponctions faibles (voir crédit d'impôt) pour les utilisateurs intenses (en surface par personne) et à l'inverse, coût marginal important pour les déciles de la population disposant d'une surface importante *pro persona*. À l'instar de la progressivité de l'impôt sur le revenu, cette fiscalité par tranche induit une « force de rappel » vers une échelle soutenable d'emprise physique et incite à mieux redistribuer la richesse spatiale¹.

Proposition : un bonus-malus selon la quantité

Cette proposition étend le principe de l'incitation fiscale précédente. Elle concernerait une déclaration par chaque ménage de la totalité de ses intrants énergétiques consommés². Ce relevé serait établi au moment de la déclaration de revenus des ménages. Son principe pourrait aussi être étendu à la fiscalité des entreprises. Pour les ménages, cette déclaration permettrait de déduire à la fois la quantité d'énergie primaire consommée par personne du foyer³ ainsi que l'évaluation des émissions de CO₂, sur le modèle par exemple des questionnaires permettant d'estimer son empreinte carbone. Sur la base de ces données, une corrélation serait effectuée selon le revenu du ménage. Elle générerait une modulation de l'impôt sur le revenu, voire un crédit d'impôt pour récompenser les bonnes pratiques et/ou encourager les investissements des ménages pour la transition énergétique et bas carbone. Avec le croisement sur les revenus, il n'y aura pas de « double-peine » pour les ménages précaires qui habiteraient dans une passoire énergétique et qui seraient dépendant de l'usage de véhicules gourmands en carburant. À l'inverse, pour les ménages aisés, dont on connaît aussi la relation étroite entre revenus et impacts climat-énergie⁴, cette

Fig. 461. Extrait du principe de non-linéarité de la fiscalité selon l'intensité d'usage

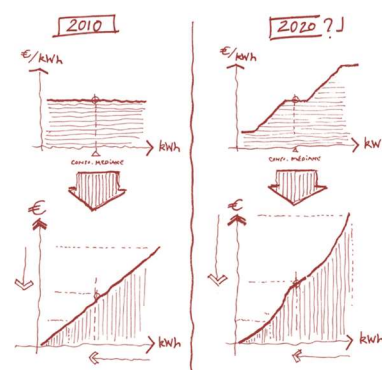


Fig. 462. Vers un changement de relation entre la quantité et le prix. Le principe d'une fiscalité écologique adaptée au niveau de vie. Changement de paradigme : le coût unitaire croît avec la quantité !



¹ Voir la note spécifique élaborée lors de l'étude sur les « 50000 logements » pour la métropole de Bordeaux (RM pour Eliothe, 2010).

² Avec une déclaration sur l'honneur sur la consommation de carburant pour les mobilités en intégrant idéalement les déplacements aériens par exemple

³ En kWh par personne et par an

⁴ Étude de l'Iddri par exemple

modulation fiscale pourrait générer prises de conscience écologiques, des effets de rappel et des incitations fiscales pour une réduction de l'empreinte des déciles de la population les plus aisés.

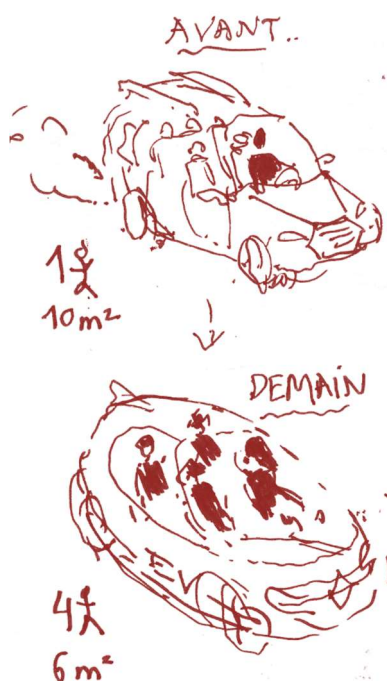
Proposition : un super-bonus pour la mobilité écologique partagée

Les transports du quotidien, la mise en œuvre de nouveaux transports collectifs réclame généralement des investissements colossaux : les infrastructures pour les tramways, les extensions des réseaux de métro, les rénovations de matériels roulants etc. Cette proposition interpelle donc la bonne affectation des ressources publiques et des investisseurs privés. Si nous envisagions le covoiturage comme un micro-transport commun en puissance ? Et si, pour massifier cet usage, la puissance publique subventionnait partiellement cette pratique ? Le soutien public irait à ces « micro-opérateurs » de transport collectif, dans la mesure où les véhicules offrant ce service seraient à faible émission. L'objectif serait d'augmenter de façon massive le taux d'occupation des véhicules et de réduire les mobilités automobiles sans passager. Ce dispositif pourrait aussi être élargi aux deux-roues électriques disposant d'une place passager. En d'autres termes, la puissance publique créerait son propre *BlaBlaCar*, subventionnerait les trajets évités et encouragerait les rencontres et le dialogue citoyen par la massification du covoiturage écologique.

Proposition : une taxe carbone spécifique à la construction

Pour une construction contemporaine, le carbone gris d'un mètre-carré bâti est d'environ 750 kg de CO₂ (CSTB pour BBKA, 2016) ; pour une construction bas carbone, la moitié. Si le surcoût de coût de construction est par exemple de cent euros, le coût de la tonne évitée est donc d'environ 300 euros. Une fois livré, le différentiel total d'émissions de gaz à effet de serre émis sur cinquante ans de durée de vie, l'ordre de grandeur serait similaire. Il y a donc pour le secteur du BTP un frein économique spécifique au développement massif des solutions constructives à très bas carbone (RM, 2008). Le secteur du BTP doit inventer un marché spécifique des externalités écologiques et une taxe carbone idoine. Il pourrait profiter de la généralisation des FDES¹ et de la maquette numérique pour adopter les bilans carbone et les analyses de cycle de vie au moment de la passation des marchés. Ce dispositif permettrait d'encourager des filières courtes et favoriserait évidemment le développement de l'ensemble de la filière du biosourcé et du réemploi à l'échelle nationale. La production d'une liste de facteur d'émissions monétaires par composants constructifs pourrait aussi être un outil didactique (Fig. 464)

Fig. 463. L'éco-covoiturage encouragé, catalysé et partiellement financé par la puissance publique. Passer du gros SUV, avec une personne uniquement à l'intérieur, une surface projetée au sol de 10m² contre une automobile légère, densément occupée, et occupant 6m² au sol.



¹ Les fiches déclaratives environnementales et sanitaires.

Type	CO ₂	P.U.	F.E.M.	
Poutre bois	100kgCO ₂ /m ³	1500 €/m ³	0,05	kgCO ₂ /€
Profilé acier	2kgCO ₂ /kg	5 €/kg	0,5	kgCO ₂ /€
Vitrage	20kgCO ₂ /m ²	20 €/m ²	1	kgCO ₂ /€
Bâtiment	750kgCO ₂ /m ²	1500 €/m ²	0,5	kgCO ₂ /€

Proposition : instauration de la taxe sur la matière ajoutée

La taxe sur la matière ajoutée intervient tout le long de la chaîne de production-construction et affecte l'incorporation de matières non issues du réemploi ou non issue de la biomasse. Ce mécanisme est analogue à la TVA, et permet de limiter la ponction sur les stocks de matière non renouvelable (minerais, sable etc.) dans la chaîne des acteurs. La taxe sur l'énergie fossile ajoutée (TEfA) mesure à chaque maillon la consommation d'énergie fossile et encourage tous les acteurs de la filière de la construction à modifier la nature de leur mix d'approvisionnement énergétique.

« Un peu de politique-fiction : imaginons que le gouvernement européen ait mis en place la TMA, une taxe sur la matière ajoutée. Cette fiscalité incitative et innovante invite l'ensemble des acteurs de la chaîne au réemploi et/ou à l'usage de matières renouvelables issues de la transformation solaire, à l'instar, par exemple, des mécanismes de bonus-malus mis en place sur existant pour l'achat de véhicules neufs. Sur la totalité de la chaîne, chaque acteur est alors vertueusement incité à réduire au maximum l'ajout de matières neuves, non renouvelables. [...] »¹

Architecture et urbanisme

Proposition : obligation de toits solaires pour toutes constructions neuves²

Cette obligation a pour base le constat de la compétitivité acquise des panneaux photovoltaïques et de la parité-réseau prochainement généralisée sur la totalité du territoire. Sous conditions de condition d'exposition, il y aurait obligation d'une intégration minimale selon la destination programmatique et des capacités d'autoconsommation et d'autoproduction. Le gisement national serait à quantifier et à documenter via les scénarios *négaWatt* ou encore le scénario Ademe, *Mix électrique 100% renouvelable ?* (2016).

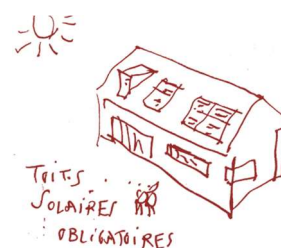
Proposition : s'engager sur la durée de vie, documenter l'atlas de mine urbaine

Fig. 464. Une première approche pour estimer des facteurs d'émissions monétaires (FEM) à l'échelle des composants de la construction.

Fig. 465. Principe de taxes sur matière ajoutée et énergies fossiles consommées au long du process de création de valeur



Fig. 466. Toits solaires obligatoires



¹ Extrait Menard R., Le pic de l'architecture, pp161-168, extrait du catalogue « Matière Grise », Direction de l'ouvrage Encore Heureux, architectes, Edition et distribution exclusive, Pavillon de l'Arsenal, 2014 et voir compléments d'échange avec Carl Enckell.

² Et rénovations lourdes.

Fig. 467. *Cadastré matériaux et stock carbone*



Lors du dépôt du permis de construire, le maître d'ouvrage et les concepteurs définissent et s'engagent sur la durée de vie prévue pour le bâtiment en cohérence avec les choix de parti constructifs. Ces informations sont cautionnées dans les registres publics (et en open data). Cet engagement limite à terme les mécanismes d'obsolescence et la réduction des cycles de destruction-reconstruction. Cette collecte permet de consolider le gisement de matériaux prévu pour la future construction (neuve ou réhabilitation lourde) : ainsi un « cadastre matériautique » se constitue et préfigure la « mine urbaine »¹ permettant d'identifier spatialement les densités de matières disponibles et par type sur SIG et/ou maquette numérique urbaine. Sur ce cadastre augmenté, les densités de stock carbone piégées dans les constructions sont également répertoriés et permettent d'identifier les densités de séquestration de carbone dans les constructions et les aménagements urbains.

Proposition : un plan national d'augmentation de l'albédo

Cette programmation pluriannuelle est une stratégie nationale d'affectation des sols et de leur pouvoir de réflexion. Elle synthétise la participation française à la réduction du forçage radiatif global. Aux échelles métropolitaines, ce plan est précisé pour réduire les effets d'îlot de chaleur urbain. La colorimétrie des grandes infrastructures s'éclaircisse progressivement. Des recherches sont entreprises pour tenter d'éclaircir certains sols agricoles. Les toits blancs sont obligatoires pour les véhicules. Idem pour les toits des toitures non productives.

Proposition : une « face B » pour le permis de construire

Cette proposition souhaite faire évoluer le contenu du permis de construire. Cette évolution réclamerait au concepteur et à son maître d'ouvrage d'élaborer un plan B, une alternative programmatique potentiel. Le projet de base démontrerait ainsi sa réversibilité programmatique potentielle à moindre frais.

« Mais quel futur à nos programmes neufs qui sont devenus des bêtes de course programmatiques ? Dans la logique d'une inévitable optimisation technico-économique, nous avons produit des monstres typologiques, incapables de devenir autre chose qu'eux-mêmes. Dans l'article « Mutations des programmes », était testée l'hypothèse d'une mise à jour de pratique réglementaire : lors du dépôt du permis de construire, pourquoi ne pas demander au concepteur et à son maître d'ouvrage de proposer un plan B ? Cette obligation de la mutabilité potentielle interrogerait à rebours spatialité et matérialité même du projet. De la capacité d'un amoncellement savant de matières à être pluriel dans le temps. Il s'agirait tout simplement de proposer une faisabilité pour une autre destination programmatique : comment des bureaux peuvent devenir locaux d'enseignement, comment un hôpital peut se muer en logements. » [5]

« Pourquoi réglementairement, n'y a-t-il pas une face B du projet ? Comme un 45 tours. On l'achetait pour les titres de la face A, mais on était content de

¹ Voir extrait de l'atlas produit par les étudiants de master en architecture dans le cadre du projet Super Phénix sur la cité Descartes.

découvrir ceux de la face B, qui pouvaient être aussi intéressants ! Ce serait un bel exercice, à la fois intellectuel et opérationnel, de proposer un scénario de base, pour lequel la mission a été confiée, et un second scénario qui démontre d'un point de vue technique, environnemental, etc. la possibilité d'héberger un autre programme à moindre frais. Il est très dommage que l'on ne se paye pas ce petit supplément d'intelligence pour porter ces quelques possibilités. [...]. Il y a un certain nombre de choses qui peuvent être plutôt de l'ordre d'une redéfinition de second œuvre, du déplacement de certains réseaux intérieurs, qui ne supposent pas une remise en cause du gros œuvre. » [8]

Proposition : changer le modèle économique des concepteurs

« Architectes, ingénieurs, concepteurs : tous rémunérés par une dîme, ponctionnée sur le flux de construction, par un pourcentage capté sur les norias de toupies à béton, par une quote-part sur les mètres carrés livrés. Comment trouver dès lors la liberté de pouvoir « dire non » pour construire moins – voire ne pas construire du tout –, lorsque notre conscience nous susurre l'inutilité de la programmation ? Par ce principe de rémunération – consistant à capter quelques pour cent du coût de construction –, les concepteurs sont rémunérés symboliquement comme des apporteurs d'affaires : une motivation largement suffisante pour revoir de fond en comble notre modèle économique. Le paysage construit de nos villes et de nos territoires devrait pourtant davantage apparter l'architecte à un médecin et inciter à préférer « consulter un projet » et à « soigner un quartier » avec des honoraires davantage associés à la prestation intellectuelle qu'à l'horizon du volume de matières transformées. » [5]

Comment représenter la permanence de l'architecture ?

Au stade de l'avant-projet, en plus du plan B, il s'agirait de faire évoluer les méthodes de représentations du projet. Cela commencerait par interdire la diffusion des perspectives d'esquisse sauf à une maîtrise d'ouvrage avertie. Il y a urgence à éviter les promesses d'image jamais tenues, de rendus photoréalistes souvent vulgaires et aguicheurs, concourant aussi à galvauder le choix de la commande. L'architecture ne doit pas être vendue comme un objet, présentée à la société comme un bien de consommation courante. La perspective de rendu de concours d'une tour de bureaux exploite le même outil de visualisation que le rendu présentant le design d'un futur smartphone. Pourtant les durées caractéristiques de vie n'ont strictement rien à voir. Je confesse aussi un rêve éditorial : consacrer un livre d'architecture à l'avant-après de la production contemporaine. À gauche, la perspective de concours ; à droite selon le même point de vue, le projet livré. Nouvel s'en sortirait plutôt bien avec sa tour Agbar à Barcelone par exemple. Ricciotti serait en queue de peloton avec le stade Jean Bouin à Paris : la comparaison du projet livré avec la perspective évanescence du concours serait terrible.

Fig. 468. *Couverture de Construire réversible*

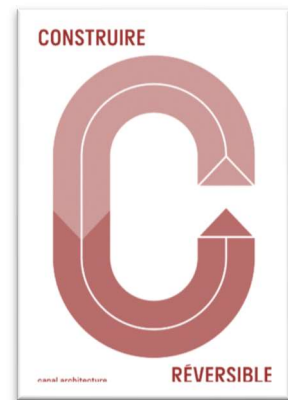


Fig. 469. *Perspective par Elioth dans le cadre de Resilis et projection dans le futur. La rue de Lancry dans le 10^{ème} arrondissement en 2046 en pleine canicule estivale.*



Les images seraient rendues publiques au stade de l'avant-projet détaillé, lorsque les concepteurs se sont engagés sur le coût de l'ouvrage : au moins, concepteurs et maîtrise d'ouvrage assumeraient une cohérence entre l'engagement d'un coût et celui d'une image. À ce moment de la conception, les concepteurs produiraient aussi des représentations de l'ouvrage à demi-vie, une génération plus tard. Ce serait un exercice prospectif fécond, invitant les parties prenantes à ce questionner sur le monde de demain et se figurer comment le bâtiment s'est patiné, comme il s'est transformé. La question du temps est souvent au cœur de ma pédagogie, en forçant les étudiants à la projection dans le futur. De fait, traditionnellement, l'enseignement de l'architecture, du design et du paysage est l'apprentissage d'outils spatiaux. Nous apprenons à faire des maquettes et non des films. Nous réalisons des perspectives et non des story-boards. Nous rédigeons une note d'intentions mais non un script. Il faut apprendre à voir dans le temps, projeter l'architecture en « $x-t$ » en sus de « $x-y$ ». C'est ce que nous réalisons avec la frise temporelle de la *Renaissance des Fabriques*¹ et le story-board du plan masse.

Culture et enseignement

Fonder une grande école dédiée aux transitions

La première et la deuxième révolution industrielle ont eu leurs grandes écoles. À l'heure de la Modernité naissante, les états emportés par le premier mouvement thermo-industriel (la France aux premières loges), créaient les institutions assurant les formations de haut niveau en osmose avec leur époque (#12). Les cinq mues contemporaines (énergie, climat, matière, démographie et numérique) réclament elles-aussi de nouveau corpus disciplinaire et sans doute d'autres façons d'enseigner avec en ligne de mire, un paradigme différent que la course à la croissance. Et si l'Europe, ou à moindre échelle la France, créait une haute école écologique multi-disciplinaire ? Cette grande école transmettrait à la fois les savoirs scientifiques et techniques fondamentaux ; elle investiguerait aussi les modèles macro et micro-économiques des transitions comme ceux de la post-croissance ; elle interrogerait les modes organisationnels, institutionnels et culturels pour préparer les *mondes d'après* (Fig. 470). Elle s'intéresserait à l'agriculture, à l'urbanisme, à l'architecture et au design. Cette haute école européenne utiliserait les qualités et les infrastructures des grandes écoles actuelles. Elle serait hybride entre *moocs* et un réseau physique avec les institutions d'excellence actuelle. Elle proposerait un parcours d'excellence globale pour former une élite des transitions.

Fig. 470. *Pour la terre, l'écologie et la permanence : la devise de la nouvelle grande école*



¹ Pour le rendu du concours EDF Bas Carbone à Lille

Former les maîtres, les professeurs et les élus à la soutenabilité

Dans son élan, cette école générerait une descendance de formations similaires et une diversité de projets pédagogiques autour de l'enseignement des questions écologiques. Et elle susciterait aussi une réforme profonde des écoles des maîtres, avec un corpus pédagogique majeure sur les enjeux écologiques. Cet outil d'enseignement serait mis à la disposition de la formation continue des élus de la République : acquérir le bagage minimum pour comprendre les enjeux.

Programme de R&D-commando autour de la mer et des océans

La France est une nation maritime majeure. Paris contrôle déjà la deuxième plus grande zone économique exclusive du monde, avec un peu plus de 11 millions de kilomètres carrés, juste derrière les États-Unis et devant l'Australie. Rapporté au citoyen, un français dispose donc d'environ 16 hectares de mer et de presque un hectare de continent. Un cumul de 17 hectares alors qu'un humain dispose en moyenne de 7 hectares¹. Selon ce prisme, la France est un territoire maritime à 95%, alors qu'à l'échelle globale, la proportion maritime est de 71%. La politique de transition énergétique et écologique doit absolument intégrer cette double spécificité : une densité globale moindre que la moyenne mondiale et un territoire hautement maritime ! Cela réclame un énorme programme de recherche et développement : atténuation (par les énergies renouvelables marines, par la biomasse marine), options de stockage et séquestration etc. Évidemment le développement des énergies marines, éolien offshore, technologies solaires flottantes (Fig. 472) : la France devrait récolter l'essentiel de ses énergies par la mer, c'est une chance inouïe.

Fig. 471. *L'École d'Athènes par Raphaël (1510)*



Fig. 472. *Vertige horizontal*



Post-scriptum

Vers une analyse énergie-matière exhaustive de l'architecture

Au terme du programme pour notre temps VII, il serait merveilleux de reconstruire une histoire de l'architecture qui analyserait *a posteriori* les impacts écologiques des constructions passées, au prisme de l'énergie et de la matière. Quel a été l'impact CO₂ de la *Neues Galerie* de Mies van der Rohe à Berlin ? quelle a été l'énergie grise de la Cité Radieuse de Le Corbusier à Marseille ?

Proposition pour une définition (1)

L'architecture est la science de l'arrangement éphémère, savant et gracieux de matières renouvelables, capables de filtrer les flux d'énergie, en quantité appropriée et en qualité adaptée aux différents usages. Elle catalyse les liens sociaux, développe le vivant et participe à la révélation de la beauté.

¹ En faisant le rapport entre la surface totale de la géode et la population mondiale. Retenons que la part continentale du « terrien moyen » est plus importante.

Fig. 473. *Extrait de La Belle Verte,*
film de Coline Serreau



Proposition pour une définition (2)

L'architecture, matière immobile au cours de sa vie, est le substrat indispensable pour le cycle de la vie. Les hommes ont besoin d'énergie et de points stables de matière, de pivots pour habiter et vivre ensemble. L'architecture est un catalyseur au sens chimique du terme : elle est nécessaire pour accélérer les processus sociaux et culturels. Elle est fondamentale pour constituer les lieux de l'imaginaire, de la représentation du monde et l'expression du lien des hommes entre eux et avec l'environnement.

Épilogue du temps VII

Le *Green Dream* de Winy Mass a eu lieu (chapitre #3). L'humanité a résolu et a réussi sa triple mutation, énergie-matière-carbone. L'architecture s'est adaptée. Quel est ce nouveau régime permanent planétaire, ce rebond attendu du temps III (chapitre #9) à plusieurs milliards d'humains ? Voilà une nouvelle ère qui aura mis en place les infrastructures pérennes, celles des flux renouvelables, générant la croissance et le partage du savoir et qui aurait conscience de l'inévitable limitation de la densité humaine.

*

Bibliographie

1. MENARD Raphaël, *Dense Cities in 2050: The Energy Option ?*, Summer Study Proceedings, ECEEE, 2011
2. MENARD Raphaël, DOSSIER Julien et al., *Paris, change d'ère. Stratégie de neutralité carbone de Paris en 2050*, Elioth, 2016
3. MENARD Raphaël et al., *Reforme, rapport final de recherche*, programme Ignis Mutat Res, 2014
4. MENARD Raphaël, « Introduction au développement durable » (p134 à 139) et contributions dans le reste de l'ouvrage, *Naissances et renaissances de mille et un bonheur parisien*, J. Nouvel, JM Duthilleul et M Cantal-Dupart, Les éditions du Mont Boron, avril 2009, 638 pages.
5. MENARD Raphaël, « Le pic de l'architecture », pp161-168, *Matière Grise*, Direction de l'ouvrage Encore Heureux, architectes, Edition et distribution exclusive, Pavillon de l'Arsenal, 2014
6. MENARD Raphaël, « Mutations des programmes » (p27 à 31), dans *Architecture = durable*, Catalogue de l'exposition du Pavillon de l'Arsenal, 2008
7. MENARD Raphaël, « Un Petit Dessin vaut mieux qu'un long discours » (p64 à 71), Perspectives Durables, *L'Architecture d'Aujourd'hui*, 2011
8. MENARD Raphaël, « Pourquoi réglementairement n'y-a-t-il pas une face B du projet ? » dans RUBIN Patrick et al., *Construire Réversible*, Canal Architecture, 2017

Fig. 474. *Les ISU à la campagne*



#22 Les densités critiques de l'autonomie et de la neutralité

Retrouver les chemins de l'autonomie. La fin d'une parenthèse de deux siècles fossiles. Fabriquer une nouvelle convergence globale, une myriade d'autonomies en réseau.

Quel est le périmètre d'équilibre entre la demande et la récolte des flux renouvelables ? Quelle est la densité, la ligne de niveau d'une topographie de l'énergie qui distinguerait les territoires autonomes ? Quelles sont les bonnes échelles de gouvernance pour orchestrer autonomies énergétiques et neutralités carbone ?

Introduction

Ce chapitre a pour origine une intervention donnée à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, intitulée « les territoires à 1 watt »¹. En novembre 2015, avant cette conférence, Léo Benichou adressait par courriel la question suivante à Fanny Lopez, Marc Barthelemy et moi :

« Inspiré par le travail de Marc Barthelemy sur les réseaux, de Raphaël Ménard sur les bassins versants énergétiques, et bien sûr de Fanny Lopez sur le rêve de déconnexion, j'aimerais formuler la problématique suivante. Étant donné les enjeux de la mobilisation de la ressource énergétique solaires (et dérivées) au service des sociétés humaines. Étant donné les coûts énergétiques des infrastructures (fixes et mobiles) qui permettent de collecter, transformer, stocker, acheminer et délivrer vecteurs et services énergétiques. [...] Comment déterminer une échelle optimale de foisonnement, de mutualisation de nos infrastructures énergétiques ? Quelles seraient les dimensions pertinentes pour faire apparaître des seuils, des basculements entre régimes d'optimalité dans le dimensionnement de nos réseaux ? Entre dépendance et autonomie, "jacobinisme nucléocrate" et "idéal de déconnexion", comment la physique peut-elle nous aider à donner un peu de sens à l'eau tiède ? »

De façon brouillonne, je répondis avec ces premiers arguments :

« 1 watt par m² est pour moi la bonne bascule, l'ordre de grandeur du seuil du flux primaire, point d'équilibre possible entre densité d'une offre renouvelable foisonnée et complexe (avec un mix associant biomasse et solaro-éolien, hors spécificités locales d'autres flux : géothermique et hydraulique) et une densité de demande agrégée. Pour une demande primaire par individu qui aurait décliné autour de 4000W, la densité moyenne P+E² de l'aire considérée serait alors de 250 personnes par km². Hors zones métropolitaines, le grand canton (ou le petit département) dessine pour moi l'aire de convergence entre les deux densités.

¹ En 2016 dans le cadre des séminaires doctoraux

² P+E pour la densité sommant population et emploi, parfois un indicateur plus pertinent.

[...] *Dans les pays du sud, cela pourrait être sans doute moins ! Demande individuelle plus faible et gisement solaire plus élevé. »*

David Mac Kay et autres lectures

Avant de préciser cette toise, cette juste échelle de la permanence, les réflexions qui suivent ont été inspirés par les travaux de David Mac Kay. Ce physicien de Cambridge, décédé prématurément en avril 2016 a écrit une référence majeure sur les questions énergétiques. Dans son ouvrage *Sustainable Energy- Without the Hot Air*, Mac Kay détaille les enjeux techniques et spatiaux d'une transition énergie-carbone [1]. Il explicite les dimensionnements autorisant la convergence entre notre demande énergétique et un mix adapté de productions renouvelables¹. Cette méthode rejoint les travaux des *Négawatt*² articulant leurs propositions autour du triptyque-slogan « sobriété, efficacité et renouvelables ». Un autre chercheur, le Canadien Vaclav Smil documente lui les densités spatiales de flux d'énergie, en production comme en demande [2].

À quoi rapporter la mesure écologique ?

Je m'inscris dans cette filiation « mac kayenne », une construction méthodique de recollement entre demande et production pour l'énergie, entre émissions et séquestration pour le carbone. Amory Lovins, fondateur du *Rocky Mountain Institute*, documente aussi les enjeux d'autonomie, bien que Smil puisse se montrer critique concernant sa bonne intégration des enjeux spatiaux des énergies renouvelables [3]. La force de la description de Mac Kay consiste à mesurer l'énergie à l'échelle de l'individu, d'impliquer ainsi nos responsabilités citoyennes. Mac Kay nous interpelle sur l'urgente transition culturelle et se fait l'écho de l'aphorisme de Buckminster Fuller : « *Il n'y a pas une crise de l'énergie mais simplement une crise de l'ignorance* ». Mac Kay et le canevas quantitatif de la *Société à 2000 watts* coïncident en replaçant l'usage au cœur des évolutions nécessaires. Sur la métrique, le dénominateur de l'individu³ diverge de celui, courant, des concepteurs pour qui la vertu énergétique est traditionnellement rapportée à la surface. Dans la comptabilité de conception, les kWh annuels sont évalués par mètre-carré, les émissions de CO₂ également. La demande est dérivée à l'espace, au contenant. C'est un quotient⁴ inadapté car une architecture sans usage ne

¹ Notons aussi que Mac Kay développe aussi la question de la production d'énergie issue de la fission nucléaire. Mac Kay précise les capacités de décroissance de la demande énergétique en Grande-Bretagne ; et simultanément, il analyse l'implantation contextuelle d'un bouquet possible d'énergies renouvelables. Sur ce périmètre géographique, il scénarise donc les trajectoires techniquement et socialement envisageables, pour faire converger offre et demande énergétique : un scénario de croissance pour la première, par l'implémentation coordonnée de capacités renouvelables ; de l'autre, une réduction de la consommation par l'efficacité et la sobriété.

² <https://www.negawatt.org/>

³ Ou de l'usage.

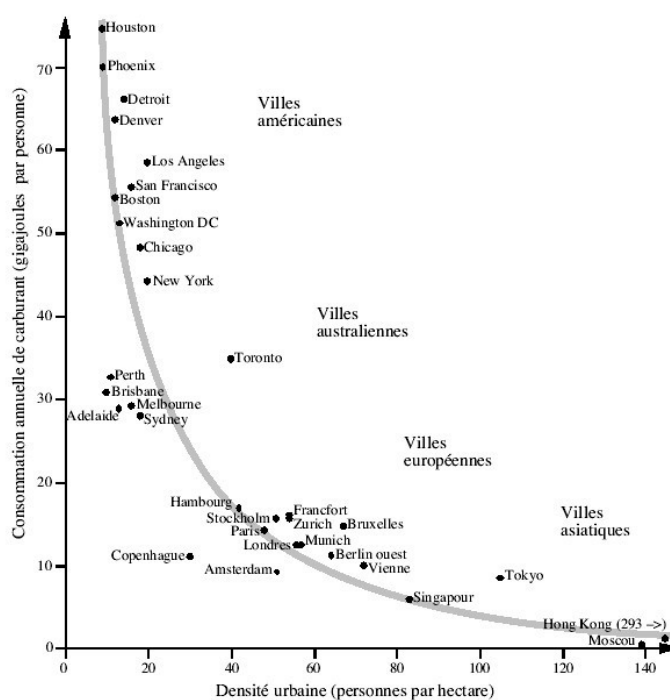
⁴ Notons qu'il en est aussi généralement de même pour l'efficacité des transports et en particulier l'automobile. L'essentiel de l'effort semble se concentrer sur une réduction de la consommation de carburant du véhicule et /ou de la réduction de ses émissions, alors que le vrai critère devrait d'abord être le service rendu et

génère aucune externalité : elle n'a ni besoin d'être chauffée, ni d'être éclairée, etc. et donc elle ne devrait pas consommer¹ d'énergie².

La densité de population est-elle une force de rappel suffisante ?

Les questions liées à la densité ont souvent suscité ma curiosité. Dans l'article *Dense Cities in 2050 : The Energy Option ?* [4], j'introduisais un début de controverse à ce réflexe de pensée : la densité urbaine serait la condition nécessaire de la vertu écologique. En effet, il y a vingt ans, les chercheurs australiens Newman et Kenworthy mettaient en évidence la relation entre densité urbaine³ et demande d'énergie liée à l'usage individuel de l'automobile [5]. Issue de relevés dans les grandes métropoles mondiales, cette corrélation révélait qu'à densité croissante, la consommation de carburant se réduisait (Fig. 475).

Fig. 475. *Densité nette de population en abscisse et consommation d'énergie en ordonnée. Kenworthy et Newman, 1989*



Cette courbe qui montre l'impact de la densité⁴ sur une portion de notre demande énergétique, cette asymptote devenue entretemps célèbre, génère l'illusion que la demande individuelle décroît fortement avec une densité urbaine importante, comme si cette dernière permettait de pondérer

encourager alors une augmentation massive du taux d'occupation des automobiles par le covoiturage.

¹ Sauf si la gestion automatique du bâtiment prévoit par exemple un maintien à une température de consigne minimale.

² Écart courant de langage : l'énergie ne se consomme pas vu que le premier principe de la thermodynamique qu'elle se conserve : c'est la qualité de l'énergie qui se consomme.

³ Nombre d'habitants et d'emplois rapporté à la surface nette urbaine.

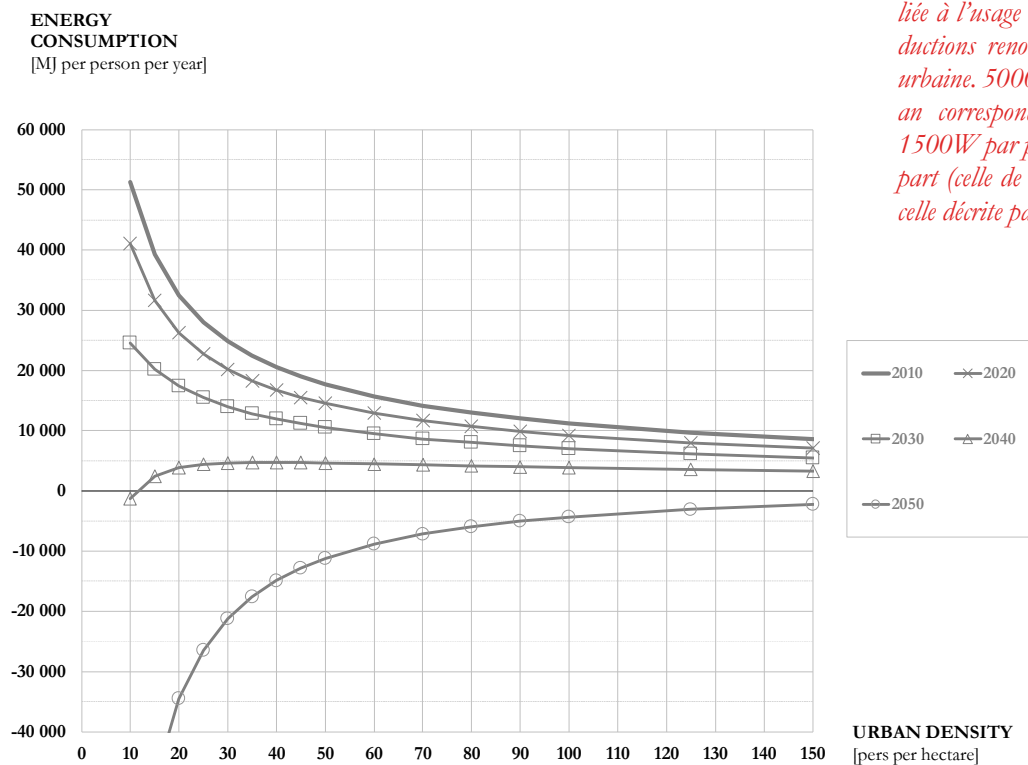
⁴ Exprimée elle généralement en habitants par hectare

l'inflation mécanique liée à la densité de l'usage, voire de rendre infinitésimale la densité surfacique de demande énergétique.

Le galop de la densité

Dans l'article de 2011 [4], je montrais que cette corrélation évoluerait au cours des prochaines années, du fait de l'amélioration de l'efficacité du parc automobile et de son usage, du fait également de l'intégration massive des énergies renouvelables, grâce à leur maturité technique et à leur compétitivité économique. J'interrogeais cette balance entre densité de demande et densité de production sur un périmètre circonscrit d'évaluation de l'énergie (Fig. 476).

Fig. 476. Graphique extrait de l'article *Dense Cities in 2050 : The Energy Option ? (2011)*, scénarisation de l'évolution demande énergétique liée à l'usage de l'automobile et de productions renouvelables selon la densité urbaine. 50000 MJ par personne et par an correspondent à un peu plus de 1500W par personne. La courbe de départ (celle de 2010) reprend l'allure de celle décrite par Newman et Kenworthy.



Ainsi, dans le prolongement de cet article, ce papier interrogera de façon plus globale la sensibilité des flux selon la densité. Nous verrons comment ce paramètre détermine les pressions maximales d'autonomie énergétique et/ou de neutralité carbone.

	↓ Flux entrants	Flux sortants ↑
Energie	Production locale d'énergies renouvelables	Demande énergétique finale ou consommation d'énergies
Carbone	Pompage de CO ₂ atmosphérique et séquestration carbone	Emissions de gaz à effet de serre directes et/ou indirectes

La demande ou la consommation à l'échelle de l'individu (Lagrange)

Pour analyser cette grille, nous nous inspirerons de la mécanique des fluides et de ses modèles de description qui peuvent opter pour deux points de vue : celui dit « eulérien » ou l'autre, « lagrangien ». Ce sont deux référentiels distincts, deux façons différentes de décrire la nature. Dans le cas de la description de Lagrange, les équations sont établies du point de vue de la particule en mouvement, une sorte de récit vu par le protagoniste de la scène, la particule de matière elle-même. Pour quantifier la demande, nous préférons donc sauter sur la particule en mouvement qu'est l'individu, ou comme la particule 'monnaie' dans *Les aventures extraordinaires d'un billet de banque*, chanson de Bernard Lavilliers de 1975. Dans la première partie, nous ferons comme Mac Kay [1] qui dérive les flux de demande à la personne¹ ; idem pour le carbone, en estimant les émissions équivalentes à l'individu².

L'offre ou la production à l'échelle des territoires (Euler)

Pour Euler, la narration est omnisciente : le monde est décrit depuis une position immobile, la matière est observée par un observateur statique. Dans la deuxième partie, nous évaluerons selon ce schéma les capacités de production d'énergies renouvelables d'un territoire (ou ses capacités de séquestration carbone), comme Smil dans *Power Density* [2]. Nous verrons aussi comment la densité spatiale d'usage³ autorise la transposition des points de vue.

¹ Par exemple en watts par individu.

² En tonnes CO₂ eq. par individu et par an.

³ Ou de population

Densités critiques et bassins versants

Armés de quelques outils de quantification, la troisième partie évoquera un cas concret, l'exemple d'un petit territoire urbain de quelques hectares à Lille, testant l'hypothèse de l'autonomie énergétique en 2050 [6]. Nous analyserons pour quelles raisons il ne parvient pas à assurer son autosuffisance énergétique. Nous illustrerons une typologie de trajectoires de transition énergétique selon différentes densités, dont le « point critique » est ce fameux watt par unité de surface, « courbe de niveau de référence de l'autonomie énergétique ». Nous préciserons l'enjeu jumeau du carbone, les questions spatiales entre territoires intensément émetteurs, et ceux pouvant agir comme des pompes à carbone atmosphérique, piégeant l'atome de carbone dans la biomasse, dans nos campagnes et nos forêts en particulier : ces territoires peu denses.

Les unités employées dans l'article (qualité de l'énergie)

Dans quelques-uns des diagrammes de cet article, apparaîtra la notion de taux d'exergie¹ [7]. Cette valeur mesure la qualité de l'énergie². Plus ce taux est proche de l'unité (ou de 100%), plus la qualité énergétique est importante³. *A contrario*, la basse chaleur (celle par exemple du chauffage d'un logis) aura un taux d'exergie très faible, de l'ordre de quelques pourcents⁴.

Les unités employées dans l'article

Pour la quantité, l'unité de mesure qui fera foi sera le watt (W). Il mesure un flux d'énergie, un débit temporel d'énergie, une puissance. En employant cette unité, nous ne sommes pas forcés de rapporter une quantité d'énergie (comme par exemple des kWh⁵) à une durée temporelle (par exemple une année). Dès lors, un logement « à 50kWh par m² et par an » sera un habitat⁶ à « 6 watts par m² »⁷. Autre exemple, le gisement solaire

¹ Les travaux de *Réforme* [7] faisaient la part belle à une expression bidimensionnelle de la donnée énergétique : caractériser sa quantité mais aussi sa qualité. Comme en mathématique et dans le cas du passage des nombres réels aux complexes, une partie de nos travaux avait consisté à jeter les bases d'une « algèbre de l'énergie ».

² Comme l'argument d'un nombre complexe (et l'énergie serait alors son module)

³ L'électricité possédant un taux d'exergie de 100% par exemple.

⁴ La Terre est constamment « arrosée » du flux permanent de l'énergie solaire et dont la valeur de qualité, le taux d'exergie, est extrêmement élevée, environ 97%.

⁵ Cette unité est d'ailleurs composite puisque de façon typographique, elle est l'accolement d'une puissance (W ou kW) avec une quantité de temps (une heure) et explicite donc la multiplication d'une puissance par du temps. Après avoir lu ces lignes, vous comprendrez qu'il est inexcusable de lire cette aberration (vue malheureusement parfois) consistant à écrire kilowattheure en ~~kWh/h~~ !

⁶ 50kWh divisés par les 8760 heures que comptent une année.

⁷ Évidemment, il ne faudra pas confondre cette valeur avec celle du dimensionnement du chauffage qui serait sans doute voisine de 50 à 100 watts par m² et qui correspondrait à une valeur de pointe, comme la puissance maximale d'un moteur de voiture en quelque sorte.

parisien est¹ de 130 watts par m² : il correspond à la moyenne du flux solaire, été comme hiver, jour comme nuit. Selon cette convention, le temps n'intervient plus, on évalue un flux moyenné sur une période de temps caractéristique². Des kWh par jour ou des kWh par année (etc.) ne sont rien d'autres qu'une puissance moyenne : une quantité d'énergie divisée par une durée³. Enfin, sauf précision, les unités énergétiques seront des valeurs exprimées en énergie primaire, en amont du cycle de vie de l'énergie. Dans certains cas, la mention « électrique » ou « thermique » précisera la qualité énergétique du flux considéré, et fournira donc une indication sur le « taux d'exergie » du flux ou de la quantité évoquée.

Densité de la demande énergétique

Variations autour des 2000 watts

Une moyenne à 2000 watts

La demande énergétique est lagrangienne, nous rapportons les besoins énergétiques à la personne. La démarche *Société à 2000 watts*, née en Suisse⁴, procède ainsi et fixe un cadre pour élaborer des scénarios urbains visant une division d'au moins par trois de la demande individuelle d'énergie. Cette méthode est globale ; elle agrège les consommations liées au bâti, celles de la mobilité, des infrastructures et de l'alimentation. En Europe, la demande primaire d'énergie est d'environ 6000 watts par individu en moyenne,⁵ soit plus du triple de la moyenne mondiale, qui s'établit à peu plus de 2000 watts par personne⁶.

¹ Exprimée en kWh, l'irradiation solaire horizontale vaut environ 1100 kWh par m² et par an.

² L'année en règle générale, sauf mention spécifique.

³ L'unité de temps fera éventuellement son apparition lorsque nous évaluerons un stock, une réserve : par exemple pour quantifier la capacité de stockage d'une batterie électrique (sous forme de Wh ou kWh par exemple).

⁴ <http://www.2000watt.ch/fr/>

⁵ De fait, en 2014, la consommation primaire d'énergie en France était de 10159PJ soit un flux moyen de 322 GW, pour une population d'un peu plus de 66 millions à cette date, soit donc 4879W. Ou à 50 000 kWh d'énergie primaire annuellement par personne, ou à 5 tonnes équivalent pétrole.

⁶ Et ce, sans prendre en compte nos imports d'énergie grise, lorsque nous importons des produits transformés ou finis hors de nos frontières et dont l'énergie nécessaire à leur fabrication n'est donc pas comptabilisée dans nos consommations nationales. L'un des buts de la démarche de la *Société à 2000 watts* est aussi de responsabiliser les concepteurs et la chaîne de décision de l'aménagement, pour organiser et architecturer la décroissance énergétique et des émissions de gaz à effet de serre, et ce, dans une approche holistique.

Une gamme de 200 à 20 000 watts

Il y a deux siècles, avant les transitions fossiles, la consommation était autrement plus faible : de 500 à 1000 watts par personne (#9). Aujourd'hui, quantité et qualité¹ de nos besoins énergétiques sont fortement liées au niveau de vie². Dans *Réforme* [7], nous avons testé la relation entre la demande et la latitude géographique. Dans le diagramme ci-contre (Fig. 477), pour la bande comprise entre les latitudes 30° Sud et 30° Nord, anneau épais centré sur l'équateur où vit plus des deux tiers de la population mondiale, cette « grande société » est à 1000 watts, intensité voisine de celles de nos arrières grands-parents.

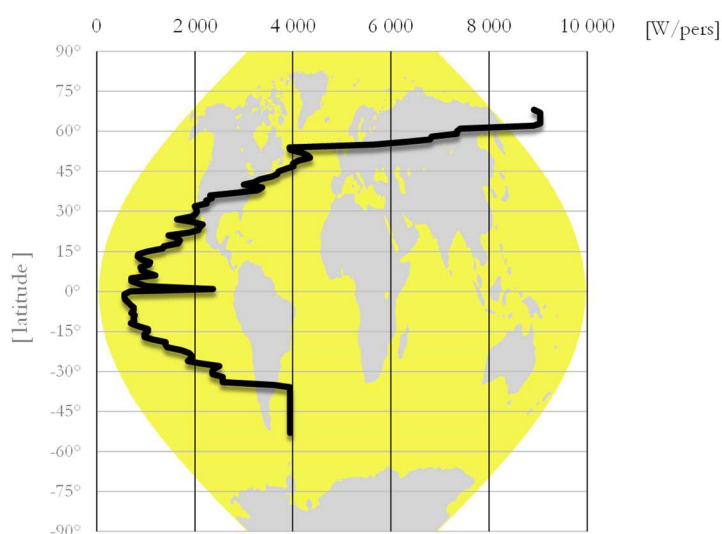


Fig. 477. *Demande individuelle d'énergie primaire (en W par personne) et corrélation selon la latitude. D'après Réforme, programme Ignis Mutat Res (2014)*

Évidemment, il ne s'agit pas d'un nouveau déterminisme géographique, ni de la découverte d'une corrélation entre climats et demandes d'énergie. Ce graphique révèle la relation entre niveau de vie et latitude, illustration du clivage entre pays du Nord et pays du Sud. Autant aussi de trajectoires distinctes pour les régions du monde pour se diriger vers la permanence énergétique (100% renouvelable) et la neutralité carbone.

¹ Évolution tendancielle de la consommation d'exergie par terrien depuis la nuit des temps. Passage de 500W à 2000W en deux siècles. Taux d'exergie très faible dans premier cas (10% comme première valeur) et 30% dans le second cas. Une consommation d'exergie sans doute décuplée. De fait, la demande de nos aïeux étant essentiellement concentrée sur des besoins de chaleur (pour se chauffer, cuire ou transformer la matière). Depuis les Trente Glorieuses, l'explosion des mobilités, de la communication et du numérique engendrent des besoins énergétiques finsaux autrement plus qualitatifs d'un point de vue thermodynamique : le mouvement est une énergie hautement qualitative, tout comme les flux électromagnétiques du traitement et de la transmission de l'information.

² Généralement mesuré en PIB annuel par habitant.

0,1 watts par m² en moyenne continentale

Densités de demande

La densité d'usage permet de transposer la demande individuelle en densité spatiale selon l'égalité ci-dessous (Fig. 479). La densité d'un territoire est généralement exprimée en personne par km² ou en personne par hectare. On effectuera les conversions avant l'application directe du produit. Via la densité d'usage, on transforme ainsi le regard lagrangien en un point de vue eulérien. Pour la France métropolitaine, dense¹ d'environ 120 habitants par km² et avec une demande moyenne par Français de quelques 6000 watts², la densité de demande énergétique est d'environ 0,6 watt par m². Pour Paris, avec plus de 20 000 habitants par km², la densité de demande atteint alors 120 watts par m², valeur voisine du flux solaire moyen frappant la capitale³ !

$$\text{Densité de demande [W/m}^2\text{]} = \text{Demande individuelle [W/pers]} \times \text{Densité [pers/m}^2\text{]}$$

Généralisation à l'échelle planétaire

Si on effectue le produit de la demande individuelle par la densité fonction de la latitude géographique [7], nous obtenons une relation entre la demande surfacique et la latitude (Fig. 478). On constate que la demande moyenne continentale est de 0,1 watts par m² et qu'elle chute à 0,03 watts par m² si l'on intègre les océans et les mers. Les continents compris entre les latitudes 25° Nord et 55° Nord sont en moyenne les plus friands d'énergie : plus de 0,2 watts par m². Cela reste toutefois trois fois inférieur à la densité de demande française pour deux raisons : la France est plus dense en moyenne que dans ces bandes continentales et sa population réclame 6000 watts contre 4000 watts moyens requis par un terrien habitant entre 44° Nord et 51° Nord.

La densité de demande d'énergie à travers les âges

De façon historique, Smil synthétise la chronologie des densités de demande aux grandes époques de l'humanité [2]. À l'ère des chasseurs-cueilleurs, il y a plusieurs dizaines de milliers d'années, la densité humaine était d'un individu pour 10km² dans les environnements arides, pour augmenter jusqu'à une personne par km² près des côtes. La densité de demande était d'environ 0,1 milliwatt par m², soit le millième de la valeur contemporaine⁴ (#7). Avec l'agriculture et l'intensité de vie du néolithique, la densité croît à 20 personnes par km² et le flux de demande croît à 4mW par

Fig. 478. La densité de demande énergétique selon la latitude. D'après Re-forme [7]

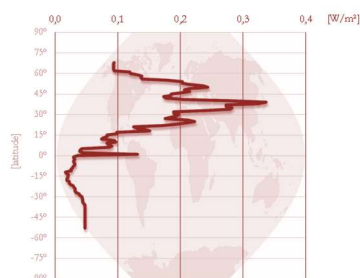
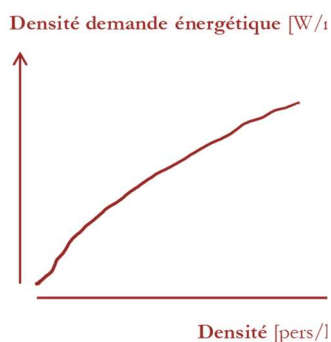


Fig. 479. Équation de la densité de demande

Fig. 480. Le léger tassement de la demande énergétique rapporté à la surface urbaine (qui croît éventuellement moins vite que la densité), mais une fonction très largement croissante de l'intensité usage ou de la densité humaine.



¹ Plus de 64 millions d'habitants en métropole rapportés à une aire de plus de 550000 km²

² En énergie primaire pour rappel

³ Environ 1100kWh par m² et par an correspond à environ 130 watts par m².

⁴ Environ 0,1 watts par m², moyenne continentale.

m², valeur du Soudan aujourd'hui ou de la Guyane. Plus tard, à Rome, à l'intérieur des murs d'Aurèle, la densité atteignait 67 000 personnes par km² et conduisait à une intensité de 7 watts¹ par m², valeur peu éloignée de l'exemple fictif que nous détaillerons plus loin, situé à Lille en 2050. De façon contemporaine, le tableau récapitule par ordre décroissant quelques valeurs de densité de demande (Fig. 481). Record à Singapour avec plus de 100 watts par m², conjugaison d'une demande individuelle élevée et d'une très haute densité ; à l'autre extrémité, la Mauritanie réclame 1 milli-watt par m², cent mille fois moins qu'à Singapour.

	Demande W/pers	Densité pers/km ²	Densité de demande W/m ²		Demande W/pers	Densité pers/km ²	Densité de demande W/m ²
Singapour	14 123	7681	108	Pakistan	443	239	0,1
Hong-Kong	5 144	6480	33	Oman	8 120	10	0,1
Bahreïn	15 008	1643	25	Nouvelle-Calédonie	5 144	14	0,1
Corée du Sud	6 820	490	3,3	Islande	22 433	3	0,1
Pays-Bas	8 099	403	3,3	Turkménistan	6 486	10	0,1
Qatar	17 486	168	2,9	Tunisie	966	66	0,1
Belgique	8 365	342	2,9	Équateur	1 143	54	0,1
Koweït	15 677	149	2,3	Tadjikistan	1 034	54	0,1
Luxembourg	11 172	197	2,2	Chili	2 372	23	0,1
Japon	5 411	337	1,8	Russie	6 498	8	0,1
Israël	4 011	365	1,5	Maroc	632	72	0,05
Émirats arabes unis	20 523	64	1,3	Canada	12 719	3	0,04
Allemagne	5 538	228	1,3	Bhoutan	2 333	19	0,04
Royaume-Uni	4 728	259	1,2	Djibouti	1 296	33	0,04
Maldives	848	1324	1,1	Bresl	1 673	24	0,04
Suisse	5 725	185	1,1	Argentine	2 617	15	0,04
Italie	3 998	203	0,8	Colombie	991	40	0,04
Tchéquie	5 030	129	0,6	Paraguay	2 250	16	0,04
France	5 434	119	0,6	Uruguay	1 614	19	0,03
Danemark	4 768	129	0,6	Gambie	182	163	0,03
Autriche	5 942	98	0,6	Togo	240	123	0,03
Liban	1 454	398	0,6	Belize	2 042	14	0,03
Slovaquie	4 393	112	0,5	Kirghizistan	1 035	27	0,03
Jamaïque	1 853	26,3	0,5	Nigéria	151	184	0,03
Pologne	3 466	123	0,4	Kazakhstan	4 220	6	0,03
Espagne	4 324	93	0,4	Ghana	252	106	0,03
Portugal	3 258	117	0,4	Algérie	1 739	15	0,03
Hongrie	3 460	107	0,4	Australie	8 495	3	0,02
Grèce	4 381	82	0,4	Yémen	473	47	0,02
États-Unis	10 079	32	0,3	Pérou	883	23	0,02
Chine	2 248	140	0,3	Nicaragua	409	44	0,02
Irlande	4 464	67	0,3	Sénégal	232	66	0,02
Malaisie	3 084	88	0,3	Bénin	174	85	0,01
Thaïlande	1 995	131	0,3	Zimbabwe	424	32	0,01
Ukraine	3 506	74	0,3	Côte d'Ivoire	198	68	0,01
Bulgarie	3 565	63	0,2	Cambodge	157	83	0,01
Inde	602	367	0,2	Myanmar	159	81	0,01
Bangladesh	197	1119	0,2	Kenya	156	74	0,01
Roumanie	2 220	92	0,2	Lesotho	173	64	0,01
Norvège	13 504	15	0,2	Sierra Leone	122	76	0,01
Iran	3 826	48	0,2	Guinée-Bissau	205	45	0,01
Turquie	1 695	102	0,2	Surinam	2 389	3	0,01
Viet Nam	621	276	0,2	Bolivie	813	9	0,01
Ouzbékistan	2 463	63	0,2	Mozambique	256	29	0,01
Estonie	5 512	28	0,2	Cameroun	166	42	0,01
Suède	7 644	20	0,2	Gabon	1 040	6	0,01
Afrique du Sud	3 749	40	0,2	Zambie	304	19	0,01
Costa Rica	1 371	91	0,1	Laos	203	28	0,01
Arabie Saoudite	9 872	12	0,1	Angola	371	14	0,01
Jordanie	1 645	73	0,1	Congo	405	12	0,005
Mexique	2 037	59	0,1	Soudan	172	24	0,004
Finlande	7 628	16	0,1	Guyane française	1 542	3	0,004
Venezuela	3 793	31	0,1	Botswana	957	4	0,003
Cuba	1 148	100	0,1	Guyana	902	3	0,003
Égypte	1 355	84	0,1	Namibie	1 081	3	0,003
Sri Lanka	343	327	0,1	Mongolie	947	2	0,002
Irak	1 515	71	0,1	Mauritanie	398	3	0,001
Indonésie	815	130	0,1				
Nouvelle-Zélande	6 571	16	0,1				

Fig. 481. *Quelques valeurs de flux de demande énergétique par pays. Données de 2012 pour les populations. Données de 2009 pour les valeurs d'énergie (source : International Energy Statistics, 2012)*

¹ D'après Smil toujours.

Densité de production renouvelable

La production renouvelable est eulérienne

Quelques densités par énergies renouvelables

En amont de la demande, la production d'énergies renouvelables est le fait de l'aménagement du territoire. Les flux de production sont consécutifs des choix d'affectation des sols : pour la production agricole ou sylvicole (#11) ; pour les capacités renouvelables installées, comme une ferme éolienne (#8) ou un champ photovoltaïque (#13) ou un barrage hydraulique par exemple. On produit des watts par unité de surface, sans relation immédiate avec la densité humaine. Dans *Power Density* [2], Smil cite une quantité impressionnante de données par types de production renouvelable : 5 à 10 watts électriques par m² pour un champ photovoltaïque¹ ; de l'ordre de 2 à 3 watts électriques par m² pour une ferme éolienne ; et en général d'environ 0,1 watt² par m² pour la biomasse. Dans *Sustainable energy* [1], Mac Kay indique des ratios similaires.

Fig. 482. *Quelques valeurs des densités de production par Mac Kay [1] servant de valeur moyenne pour quantifier le résultat des plans de récolte énergétique. D'après Reforme, programme Ignis Mutat Res [7]*

	<u>Rendement moyen</u>	<u>Taux d'exergie moyen</u>
■ Improductif	0%	0%
	Rdt. solaire	
■ Solaire photovoltaïque	~ 10%	~ 100%
■ Solaire thermique	~ 40%	~ 15%
■ Biomasse	~ 0,1%	~ 30%
	Rdt. surfacique	
■ Eolien	~ 2 W/m ²	~ 100%
■ Autres solaires	~ 10 W/m ²	~ 100%
■ Géothermie	variable	~ 20%

Notre douche solaire

Comment structurer un mix de productions locales ? Quel investissement d'énergie, de matière et de savoir faut-il consacrer pour disposer de systèmes spatiaux capables de convertir les flux traversant un territoire ? Les flux primaires sont solaires, ou éoliens, ou hydrauliques, ou marins ou géothermiques. La biomasse est, elle, un « vecteur énergétique intermédiaire »³ issue de la photosynthèse et donc fille de l'énergie solaire. Aussi, l'énergie la plus homogène sur la surface du globe est le flux solaire. Il est le plus dense dans le cortège des renouvelables : 169 watts par m² en moyenne sur la surface terrestre (#19). En France, ce sont 130 watts par m² avec beaucoup d'instantanés où ce flux est nul (la nuit) et quelques rares moments où il atteint parfois jusqu'à 1000 watts par m² (Fig. 483). Dans

¹ Valeur à ne pas confondre avec la puissance-crête de la ferme. Cela signifie que par hectare, la production électrique annuelle sera de l'ordre de 5.10000.8766 et 10.10000.8766 donc entre 438 et 877 MWh d'électricité par an.

² Thermique ou à usage métabolique

³ Bien que ce soit un peu réducteur.

le sud de la France, le gisement dépasse en général 150 watts par m². En Mauritanie, il dépasse les 200 watts par m² tandis qu'en Norvège, à Hel-sinki, il atteint 80 watts par m². Ce flux primaire est donc assez équitable-ment réparti sur la planète et très disponible dans la zone où est située la grande majorité de la population mondiale : beaucoup de terriens dispo-sent en fait de plus de 200 watts par m².

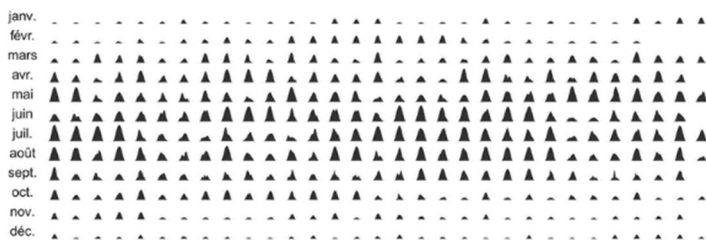


Fig. 483. *Évolution temporelle du signal solaire. Calendrier du flux solaire horizontal disponible à Paris selon les mois et les journées. Les valeurs les plus hautes correspondent à des intensités pouvant atteindre près de 1000W par m². Néanmoins, en comptabilisant les jours et les nuits et l'ensemble des variations saisonnières, le flux solaire à Paris est d'environ 130W par m², soit environ 25% inférieure à la moyenne planétaire de 169W par m². Diagramme réalisé avec le logiciel « R » par Félix Pouchain pour Elioth.*

Une belle centaine de watts par mètre-carré

Chaque territoire est « arrosé » d'au moins une centaine de watts par unité de surface : cela est bien plus que la majorité des densités de demande que nous avons listées par pays précédemment¹. Encore faut-il convertir efficacement ce flux, avec un « mezzé de capacités renouvelable » en os-mose avec les besoins du territoire : de la nourriture comme carburant pour les métabolismes du vivant, de la basse chaleur pour la volupté ther-mique de nos habitats, de la chaleur modérée pour notre toilette, de la chaleur à plus haute température pour nos fourneaux², et des formes plus qualitatives de l'énergie³ comme celles permettant le mouvement, la lu-mière ou l'électricité, vecteur essentiel de la modernité, autorisant ensuite le traitement, la diffusion et le stockage de l'information. Pour la produc-tion, l'égalité ci-dessous (Fig. 484) sera l'impitoyable produit de nos terri-toires, le rendement étant une moyenne pondérée des différentes contri-butions⁴ de chaque récolte énergétique⁵.

Fig. 484. *Formule de la densité de pro-duction*

$$\text{Densité d'offre [W/m}^2\text{]} = \text{Gisement renouvelable [W/m}^2\text{]} \times \text{Rendement [\%]}$$

¹ Qui rappelons-nous étaient pour la plupart des pays listés de quelques dixièmes de watt par m²

² Et quelques usages de transformation de la matière.

³ À exergie élevée donc.

⁴ Formule pour estimer la densité équivalente de production renouvelable d'un fragment d'espace (en projection horizontale). À l'échelle territoriale, le rendement correspondra à un rendement moyen, foisonnement d'une diversité de rendements différents : biomasse, solaire, éolien, hydraulique, géothermie etc.

⁵ Les énergies spécifiques comme la géothermie ou l'énergie hydraulique feraient l'objet d'une évaluation à part. Il s'agit ici de voir les sols et quel que soit leur dimension comme un capteur solaire en puissance.

Les plans de récolte énergétique

Un nouveau calque cartographique

Les plans de récolte énergétique sont les instruments graphiques qui avaient été développés dans le cadre de *Reforme* [7]. Ils permettent justement d'estimer le rendement de conversion équivalent d'un territoire et de visualiser son mix de productions renouvelables (Fig. 485). À chaque aménagement énergétique¹, nous associons un rendement typique. À l'instar des MOS, ces cartes présentant le mode d'occupation des sols, cette nouvelle représentation établit un « mode d'occupation énergétiques des sols ». Si le territoire est observé comme un système solaire, comme un « portefeuille de rendements renouvelables » pondéré par les surfaces relatives et leur rendement, nos territoires peuvent sans doute accéder à des valeurs supérieures à un watt par mètre-carré, valeur-cible de la demande de territoires dont les densités sont comprises entre 100 et 1 000 personnes² par km².

Une quantification du flux de production d'un territoire

Les plans de récolte évaluent chaque territoire quel que soit son échelle, spécifient les zones improductives et les parties délivrant une production d'une certaine quantité et d'une certaine qualité³. Dans le futur, selon chaque plan de récolte énergétique et sa situation géographique, nous pourrions imaginer la création d'un signal temporel de son flux de production⁴. Rétrospectivement, il y a cent mille ans, le néolithique était déjà une révolution énergétique, la composition des premiers plans de sol permettant de maximiser le rendement de l'approvisionnement agricole⁵ et sa robustesse. Nos aïeux composaient des plans de récolte spécifiques à la biomasse. Le petit millième du rendement typique des surfaces agraires composait des territoires à 0,1 watt⁶ selon les savantes polycultures de la biomasse. Aussi, l'empreinte énergétique individuelle devait sans doute être au moins supérieure à 5000m² (voire d'un hectare) et la densité critique de ses temps anciens devait sans doute se situer autour de 100 à 200 individus par km² (#7).

¹ L'agriculture étant évidemment l'un de ceux-là

² Fourchette de demande comprise entre 1 000 et 10 000 watts par personne

³ Dans la mesure où l'on renseigne un taux d'exergie pour chaque type de vecteur énergétique.

⁴ En quantité et en qualité.

⁵ Par l'accumulation des savoirs sur la façon d'organiser de façon optimale le vivant.

⁶ En Europe, le gisement solaire étant de l'ordre d'une centaine de watts et le rendement typique de la biomasse étant de l'ordre de 0,1%, la densité de production pouvait être localement de l'ordre de 0,1W/m².

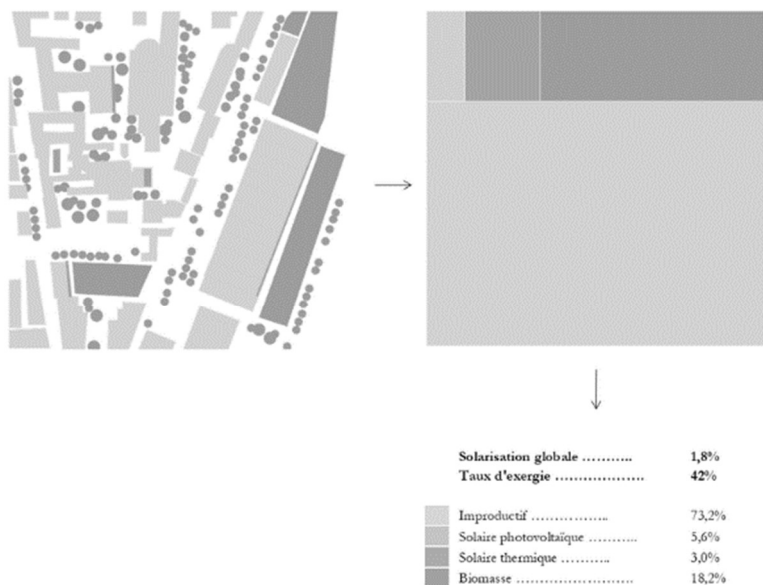


Fig. 485. Un exemple de plans de récolte énergétique réalisés par l'équipe Reforme. L'exemple d'un quartier dans Paris, carreau de 100 par 100 mètres, résumé ensuite par un carré décomposant les productions (et la part non productive énergétiquement en gris)

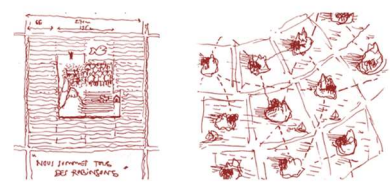
Autonomie, les territoires à 1 watt

Les 7 hectares, surface par personne du jardin planétaire

De la petitesse de nos territoires de récolte

Au cours des deux siècles passés, la croissance de la population mondiale a été phénoménale et sur cette période le nombre de terriens a été multiplié par sept¹ (#12). Cette accélération démographique a induit en proportion inverse une réduction drastique de la surface moyenne de globe par terrien. Si nous évaluons l'aire planétaire par habitant, le résultat surprend en général : on se figure généralement des échelles au moins kilométriques. Au contraire, notre place est très comptée et la métaphore du *spaceship earth*² n'a jamais aussi pertinente : nous ne disposons que de sept hectares par et les deux-tiers sont de l'eau³ (Fig. 486). De façon équitablement partagée, chaque humain cultive un lopin d'un peu moins de 150 mètres de côté pour subvenir à la totalité de ses besoins⁴ (Fig. 487). Cette fraction de globe

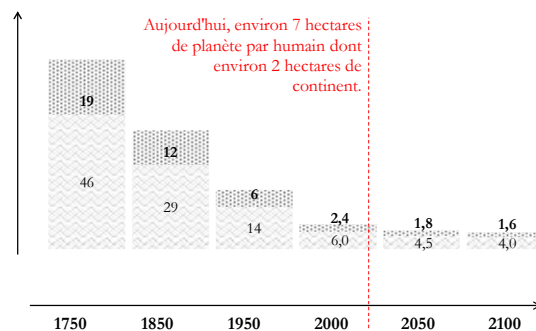
Fig. 486. Zoom sur un jardin de sept hectares (la préfiguration d'un lieu ludique et pédagogique nous confrontant à l'échelle de nos récoltes individuelles). En 2050, chaque humain disposera d'une surface continentale équivalente à un carré de 135 mètres de côté, insérée dans une pièce d'eau d'environ 270 mètres de côté. À droite, un dessin illustrant le réseau des dix milliards de jardins planétaires.



¹ En préface de la seconde édition de *Something new under the sun*, l'auteur, John R. Mac Neill considère que les énergies fossiles (et le « flash » historique de puissance qu'elles auront autorisé) sont à l'origine de la plupart des transformations de la biosphère, de la lithosphère, de l'atmosphère et de l'aquasphère [8]. Ce « tsunami énergétique » a parallèlement engendré une croissance démographique mondiale exponentielle, l'une de ces nombreuses courbes en crosse, symptomatique de l'Anthropocène, popularisé par Crutzen et largement documentée par Bonneuil et Fressoz dans *L'évènement Anthropocène* [9].
² Initiée par Stevenson et non par Buckminster Fuller.
³ Superficie totale : 510 065 700 km² ; superficie des océans : 360 700 000 km² (70,71 %) ; superficie des terres émergées : 149 400 000 km² (29,29 %)
⁴ Et notamment de sa demande énergétique.

Fig. 487. *Évolution de la surface de terre par terrien depuis 350 ans. Le passage d'un paysage de récolte (terre et océans) de 65 hectares en 1750 à moins de 7 hectares en 2050. En trois cents ans, la surface potentielle pour capter énergie et matière a été réduite d'un facteur dix, alors que les besoins individuels en énergie et en matière ont grandi d'un ordre de grandeur. En 2050, la surface continentale par humain correspondra à un carré dont le côté est inférieur à 140 mètres.*

serait représentative de la diversité des paysages terrestres : déserts, montagnes, friches etc. : un échantillon, une chimère géographique¹. Sur cet espace, notre terrien compensera également ses émissions de gaz à effet de serre pour garantir sa neutralité carbone à brève échéance, d'ici 2050.



population	[pers]	791 000 000	1 262 000 000	2 521 000 000	6 051 000 000	8 000 000 000	9 000 000 000
densité	[pers./km ²]	2	2	5	12	16	18
	[ha continent]	19	12	6	2,4	1,8	1,6
	[côté continent en m]	432	342	242	156	136	128
	[ha eau]	46	29	14	6,0	4,5	4,0
	[ha totaux]	64	40	20	8,4	6,4	5,7
	[côté total en m]	803	636	450	290	253	238

Des jardins dont le rendement devrait tendre vers 0,1%

Du fait de l'accroissement considérable des besoins énergétiques et de l'intensité des émissions de CO₂, ces presque huit milliards de jardins devront être autrement plus productifs, à hauteur de deux ordres de grandeur supérieurs à ceux d'il y a deux siècles, la demande énergétique totale ayant été multiplié par près de 70. Toutefois, si nous parvenions à convertir que 0,03% du gisement solaire frappant chacun de ces sept hectares, nous obtiendrions les fameux 2000 watts nécessaires à chaque terrien. Cela paraît bien peu, facilement accessible et la composition d'un « plan de récolte énergétique planétaire » finalement parfaitement faisable (#16).

¹ À des fins pédagogiques, nous pourrions songer à fabriquer un lieu pour illustrer cet horizon, un parc thématique dédié à cette illustration, à cet « expérience physique de la dimension maximale ». Nul doute qu'elle pourrait séduire le philosophe Olivier Rey, lui qui documente le « hors d'échelle » et le « hors de proportion » de la Modernité dans *Une question de taille*.

Le récit d'une transition urbaine dans la métropole

Un projet en 2050 à Lille sur une friche industrielle

Pour illustrer cette quête de l'autonomie à plus petite échelle, l'exemple qui suit est prospectif. Il se déroule entre aujourd'hui et 2050 au sein d'un îlot de quelques hectares du centre de Lille (Fig. 489). Fin 2015, le projet « La Fabrique de la Renaissance »¹ était désigné lauréat du concours EDF Architecture Bas Carbone qui proposait d'appréhender à l'échelle d'un quartier existant de Lille, les transformations nécessaires pour dessiner un paysage énergétique en 2050.

L'idée maîtresse de notre projet consista à réintégrer ateliers et usines dans le cœur des métropoles et à élaborer un manifeste décrivant la trajectoire des mutations entremêlées de l'énergie, de la matière et de la culture [6]. Entre 2015 et 2050, la Troisième Révolution Industrielle n'est pas une « ubérisation » de l'économie (Fig. 488). Cette transformation est d'abord culturelle, une utopie politique où tous les habitants participent à la transformation du tissu bâti et des moyens de mobilité, avec l'enthousiasme d'une frugalité joyeuse. En 2050, ce quartier est autonome sur l'ensemble des besoins énergétiques du bâti, grâce notamment à la mise en place du Duc, infrastructure solaire *low tech*.

L'autonomie énergétique est-elle accessible à 50 habitants à l'hectare ?

À une échelle plus large, sur une quinzaine d'hectares, périmètre sur lequel le projet agit, nous avons décrit la stratégie de décroissance de la demande énergétique, une sorte de scénario négaWatt local. Dans un second temps, nous avons développé un scénario d'augmentation de la production d'énergies renouvelables. Au terme de cette méthode, nous verrons comment la densité guide l'autonomie énergétique. Quand tous les efforts ont été concrétisés pour limiter la demande et que la forme urbaine a offert le maximum de ses possibilités de solarisation, *seule la densité permet alors de contrôler l'autonomie énergétique du territoire.*

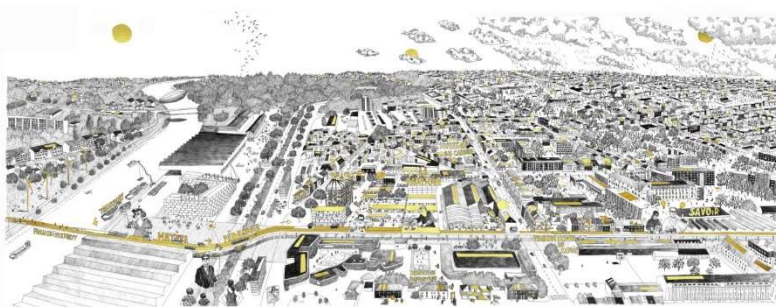


Fig. 488. *Zoom et vue à l'intérieur de la Fabrique de la Renaissance. Dessin, Diane Berg.*



Fig. 489. *Vue générale de la Fabrique de la Renaissance (169-architecture & Obras, architectes et urbanistes, dessin Diane Berg)*

¹ De l'équipe 169-Architecture, Obras et Elioth.

Scénario d'évolution de la demande énergétique

La demande énergétique est évaluée sur un périmètre large : cadre bâti, mobilité individuelle¹, additionnée à l'alimentation et à l'amortissement constructif, l'énergie grise rapportée à sa durée d'obsolescence. Nous avons suivi les préceptes de la *Société à 2000 watts* : tout compter dans la demande². Nous analysons la demande à l'aune de paramètres techniques et d'usages, dont les variables de densité³ et d'emprise dans le bâti⁴. Dans notre récit, ce dernier paramètre quantifie la décroissance de la surface résidentielle *pro persona* constatée dans l'eurorégion à partir de 2040 : le bonheur spatial, ce n'est pas nécessairement plus d'espace⁵.

État initial, rappel de la situation en 2015 : 22 watts par m²

En 2015, la densité urbaine⁶ du site est de 50 personnes à l'hectare. Le parc automobile est presque exclusivement thermique. Le tissu bâti, bien que fortement contigu, possède des qualités d'isolation médiocres. La demande typique est de 250 kWh annuels⁷ par m². Pour une emprise dans le bâti⁸ de plus de 60 m², le flux de demande est alors de l'ordre de 4000 watts par habitant⁹. Avec un mix composé à 85% d'hydrocarbures, les émissions annuelles sont d'environ 9 tonnes de CO₂ pour chaque habitant¹⁰. En parcourant le diagramme, il apparaît qu'avec des paramètres d'équipement standards, la densité de demande peut atteindre plus 70 watts par m² de sol urbain. Cette densité de demande devient alors comparable au gisement solaire horizontal lillois¹¹. Avec cette intensité de la demande, il devient illusoire d'espérer une autonomie énergétique du territoire : il réclamerait en effet un rendement moyen de conversion supérieur¹² à 50% (Fig. 490).

¹ En exploitant les courbes de Newman et Kenworthy liant densité et distance parcourue par individu

² La demande énergétique liée à la mobilité de loisirs n'est pas comptée par exemple. Rappelons-nous qu'un aller-retour Paris-New York correspond à environ 6000kWh pour un usager de seconde classe. Se « payer énergétiquement » un aller-route annuel sur une distance de ce type équivaut donc à 700 watts, soit le tiers des 2000 watts !

³ La variable « d », en personne par hectare.

⁴ La variable « e », en mètre-carré bâti par personne.

⁵ Autre hypothèse aussi, le ratio de conversion en énergie primaire de l'électricité sera en 2050 de 1,6 pour l'eurorégion lilloise.

⁶ Au sens « P+E » sur les quinze hectares.

⁷ Soit près de 30 watts en moyenne par m² de basse chaleur

⁸ Addition de l'emprise résidentielle et des usages professionnelles essentiellement.

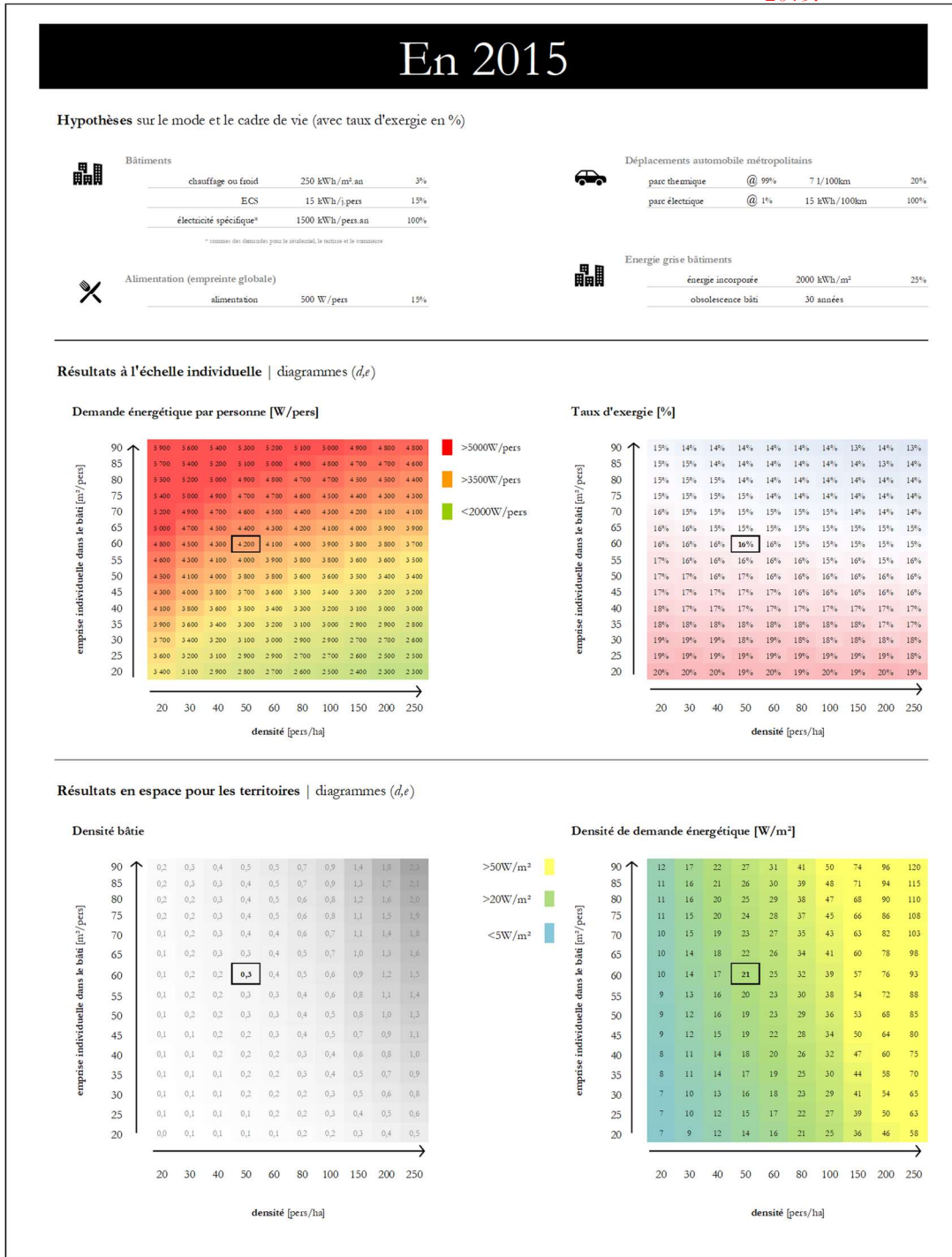
⁹ Soit 35 MWh par individu et par an, soit 3 tonnes équivalent pétrole.

¹⁰ Et cette valeur correspond d'ailleurs à celle rappelées comme point de départ des émissions pour un habitant de Paris dans le cadre de notre étude « Paris change d'ère » : de l'ordre d'une dizaine de tonnes.

¹¹ 120 watts par m² horizontal

¹² Nous noterons qu'en moyenne la qualité de la demande énergétique n'est pas très élevée et de l'ordre de 15% comme taux moyen d'exergie : sans doute du fait du poids de la demande de chauffage et d'un parc automobile essentiellement thermique. Mais pour les valeurs (densité, emprise) qui étaient celles du quartier en 2015, la densité de demande était alors de 20 watts par m². Sans toucher la demande, et pour rendre ce territoire autonome, il eut fallu lui offrir un

Fig. 490. Le diagramme (d,e) de la demande énergétique individuelle en 2015.



rendement de conversion moyen de près de 20% : impossible. Une ferme photovoltaïque tend péniblement vers 10% (il faut compter l'espace entre les bandes mais le taux d'exergie est bien meilleur) ; une série en bande de panneaux solaires thermiques peut tendre vers cette valeur mais le taux d'exergie serait alors trop faible.

Fig. 491. Le diagramme (d,e) de la demande énergétique individuelle en 2025

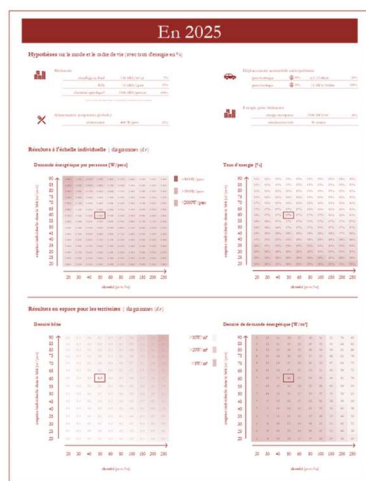


Fig. 492. L'ecorickshaw dans les rues de Lille en 2037. Dessin, Diane Berg.



Étape intermédiaire, les premiers résultats du projet en 2025 : 15W par m²

En 2025, l'effet de la Fabrique se fait sentir sur ses avoisinants. Grâce à la communauté de savoir et de pratique du quartier, la passion de la transformation a commencé à affecter positivement une partie non négligeable du tissu avoisinant. Les *doers*, résidents du quartier, aidés par les élèves et sous les conseils des étudiants-ingénieurs, transforment leur habitat : calfeutrement des fenêtres, doubles rideaux comportant des doudounes réemployées, isolation par l'extérieur avec de vieux livres. La demande moyenne pour le bâti dans le quartier est ainsi passée de 250 à 150 kWh par m² et par an¹. Le parc automobile a réduit sa consommation moyenne pour la flotte thermique ; la part des véhicules électriques a franchi les 20% sur la totalité des distances parcourues. Le covoiturage a fortement augmenté. Et puis on commence à voir apparaître quelques *ecorickshaw* dans le quartier (Fig. 492). En 2025, et en restant sur des paramètres d'usage analogue², la demande individuelle est dorénavant inférieure à 3000 watts par personne³. Avec un mix composé à 70% d'hydrocarbures, les émissions de gaz à effet de serre sont dorénavant d'environ 5 tonnes par an et par habitant. À l'échelle du quartier, la densité de demande énergétique reste élevée : près de 15 watts par m² (Fig. 491).

Le projet en 2050, un quartier à 2000W et une densité de 8 watts par m²

En 2050, alors que la densité d'emprise dans le bâti a diminué⁴, la densité urbaine a pourtant légèrement augmenté⁵. Le produit « d.e »⁶ a légèrement diminué : certains bâtiments ont été déconstruits et leurs composants ont permis d'augmenter l'efficacité et la qualité spatiale des existants. Une sorte de « don d'organes constructifs », la mise en œuvre concrète d'une économie circulaire locale. Ainsi la densité morphologique a décliné d'environ 10% : il y a davantage de vides, d'espaces interstitiels, permettant aussi de redonner sa place au vivant, à la biodiversité et au plaisir du jardinage. *In fine*, la densité de population reste la même⁷, nonobstant le « tassement qualitatif » des habitants au sein des existants transformés. La demande individuelle devient inférieure à 1500 watts, soit 8 watts par m², l'équivalent de 6% du gisement solaire lillois. Grâce à la Fabrique et à ses habitants, par la mise en place d'une boucle matériautique ingénieuse, la demande en énergie par habitant est à présent inférieure à une tonne-équivalent-pétrole : le tiers de la valeur de 2015, un facteur trois en moins de trente ans.

¹ En intégrant aussi maintenant la demande de froid pour les personnes âgées et soit au total environ 17 watts par m².

² Pas d'impact culturel encore sur l'emprise individuelle, d~50 et e~60

³ Environ 25MWh par personne et par an, soit environ 2 TEP annuel.

⁴ « e », la quantité de surface résidentielle par habitant est devenue plus faible qu'en 2025

⁵ Les taux de vacances se sont améliorés du fait de l'attractivité du quartier.

⁶ Qui correspond à la densité bâtie du quartier En effet le produit de hab/ha par des m² bâtis/hab, soit des m² bâtis par hectare urbain, autrement dit une valeur homogène à une densité bâtie.

⁷ On passe ainsi de (d ; e) qui valait (50pers/ha ; 60m²/pers) en 2025 à (60pers/ha ; 45m²/pers)

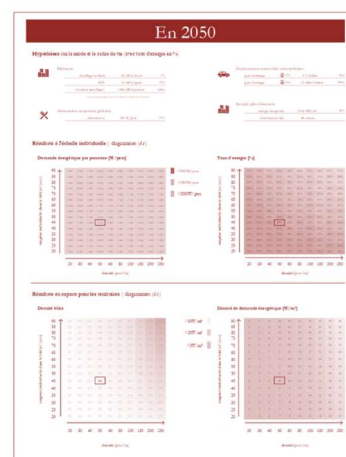
Une première évaluation de la convergence entre demande et production

En réduisant la demande de nos habitants¹, en conservant une même densité d'usage², la densité de consommation énergétique est dorénavant limitée à 8 watts par m²³. Sur la complexité de ce tissu urbain, sur la géométrie confuse des formes urbaines, parviendrons-nous à produire autant ? Maintenant aguerris aux plans de récolte énergétique, vu le gisement solaire de 120 watts⁴ par m², parviendrons-nous à un rendement renouvelable de près⁵ de 7% ? Si ce sol urbain comprenait la moitié de sa surface comme bâtie et que le tiers de ses toitures disposaient de panneaux solaires dont le rendement moyen serait de 30%, le rendement équivalent ne serait alors seulement⁶ que de⁷ 5%.

Le photovoltaïque conquiert les toitures des existants

En 2050, du fait de la très grande compétitivité du photovoltaïque, du fait d'une augmentation drastique des rendements de conversion⁸, tous les particuliers et les copropriétés ont massivement opté pour cette solution très économique. La culture des travaux, les joies de l'écobricolage régnant dans le quartier ont aussi largement favorisé cette colonisation des toitures et celle des baies exposées, autant de micro-territoires de récolte pour la production renouvelable. La production d'électricité solaire atteint ainsi rapidement 60 fois le niveau (certes minuscule) qu'elle avait en 2015 : de 0,05 W par m², elle passe à 3 W par m² : de quoi alimenter les besoins du quartier une bonne partie du temps et d'exporter de grandes quantités d'énergie vers le réseau public.

Fig. 493. Synthèse de la demande. En 2050, tout en conservant une densité de 50 personnes par hectare, le flux de demande énergétique primaire reste supérieur à 8W par m² alors que des efforts massifs ont été entrepris pour réduire la consommation dans le bâti, la mobilité et l'alimentation.



¹ A 1500 watts par individu

² 50 personnes à l'hectare

³ Ou bien donc 70kWh annuels d'énergie primaire par m² de sol ou encore 700MWh annuels par hectare

⁴ Et rappelons que cette valeur correspond au flux moyen annuel sur la totalité des journées (et donc jour et nuit).

⁵ ~8W/120W

⁶ Pas de leurre non plus : la promesse d'un quartier à énergie positive doit évacuer deux illusions. La première concerne le périmètre de comptage de la demande énergétique. Si l'on s'en tient au bâti, on s'allège fortement le fardeau. Dans le cadre de la Fabrique, cela permet d'intégrer une partie de la demande d'énergie associée à l'activité des ateliers de quartier : la consommation électrique de la fraiseuse numérique comme de la raboteuse représente une sous-partie de cette comptabilité. Forcément, avec un tel périmètre comptable, s'approchant de celui de la vie réelle, la densité de demande est bien plus importante que celle permettant de caractériser habituellement un BEPOS (bâtiment à énergie positive). Le second mirage concerne la capacité d'autonomie et la robustesse d'approvisionnement en énergie. Pour notre scénario, et par la mise en place de boucles citoyennes de partage et de stockage, nous tenons à développer des dispositifs simples permettant d'augmenter la résilience énergétique et l'adaptation au changement climatique.

⁷ 50%.(1/3).30% ~ 5%

⁸ Rappelons-nous la découverte sur les cellules à pérovskite par un laboratoire de l'École Polytechnique de Lausanne en 2024

Le Duc, une petite infrastructure solaire urbaine

Système solaire à basse exergie, le Duc concourt à augmenter significativement la production du quartier¹ en générant 2 watts de chaleur² par m² de sol de la totalité du quartier³. Près de la moitié de la demande énergétique thermique⁴ est désormais produite et stockée localement dans les citernes énergétiques et les ballons d'eau disséminés dans le quartier. Inspiré des structures légères des entrepôts, il constitue le cordon ombilical d'approvisionnement de l'ensemble du système urbain. À six mètres du sol, il assure le transfert de toutes les matières et de tous les objets, du port aux ateliers (Fig. 494). Il possède une fonction logistique et énergétique. Son tablier stocke dans des tubes remplis d'eau l'énergie solaire de la journée. La nuit, ou lorsque le ciel se couvre, des volets se rabattent, pour conserver la chaleur accumulée. Sa constitution est extrêmement simple, un clin d'œil à la contre-culture américaine des années 60-70 où une poignée de « pionniers-inventeurs-hippies » construisaient des prototypes *low tech*, l'autonomie énergétique en point de mire. Pour l'un de ses *zomes*, l'architecte Steve Baer a conçu sans doute le système solaire le plus efficace pour fabriquer de la basse chaleur à haut rendement. Le Duc reprend ce principe, en l'extrudant, en le linéarisant, pour le propager sur la plus grande partie de son déploiement viaire. C'est un *smart grid low tech* appropriable par tous : il apporte la preuve qu'il est aisé de « hacker » le soleil, de convertir de l'énergie pour devenir des « paysans urbains de l'énergie » (Fig. 495).

Fig. 494. *Quelques vus à proximité du Duc. Dessin, Diane Berg.*

*Une autonomie énergétique à l'échelle du bâti*

Au terme de cette transition⁵, une autonomie énergétique à horizon 2050 se dessine. L'autonomie s'apprécie ensuite selon deux périmètres distincts de la demande. Le premier, restreint, agrègeant la demande énergétique du bâti en exploitation. Dans ce cas de figure, les quinze hectares du quartier sont largement à énergie positive : la production dépasse de 35% la consommation. Le second périmètre adopte un point de vue global en comptabilisant aussi l'énergie nécessaire à la mobilité individuelle, l'alimentation et l'amortissement de l'énergie grise. Selon ce scope plus large, l'autonomie est dès lors réduite puisque la demande augmente tandis que l'offre reste la même. Elle atteint tout de même près de 60%, ce qui constitue une prouesse pour un quartier dense.

Fig. 495. *Sous le Duc, pendant la canicule. Une infrastructure urbaine légère qui protège des aléas du climat en générant une ombre et de la brumisation en sousface. Dessin, Diane Berg.*

¹ En sus des 3 watts électriques par m² urbain des panneaux photovoltaïques

² À basse température, en moyenne

³ En « étalant » sa production sur l'ensemble du site.

⁴ Chauffage, froid, eau chaude sanitaire

⁵ Agissant à la fois sur le duo « sobriété et efficacité » et de l'autre, sur la production locale renouvelable



L'égalité fondamentale de l'autonomie

Les densités énergétiques des utilités classiques

Cette prospective illustre la difficulté de l'autonomie lorsque la densité de demande est largement supérieure au watt par mètre-carré (Fig. 496). Or, « un watt » face à « un territoire », cela semble hors de proportion. Pour des infrastructures classiques, nous pensons usuellement à des capacités en dizaine de mégawatts pour un réseau de chaleur et jusqu'à plusieurs gigawatts d'électricité pour une centrale nucléaire ou un gros barrage hydraulique. Aussi ces infrastructures sont singulières à l'échelle territoriale, elles constituent des densités intenses de transformation de l'énergie. Dès que nous aplanissons, lorsque nous moyennons spatialement ces valeurs sur leur empreinte totale, elles deviennent bien plus faibles. Dans *Power Density* [2], Smil analyse une grande variété d'utilités : centrales thermiques à gaz ou à charbon, centrales nucléaires etc. Si l'on compare leur flux de production¹ à la quantité totale d'espace qu'elles réclament², le flux moyen équivalent est alors généralement d'une centaine de watts par m², des valeurs semblables à celle du feu solaire.

Densités des énergies renouvelables

Pour les énergies renouvelables, du fait des rendements de conversion, les densités sont généralement plus modestes. À Lille, la densité de production d'énergies renouvelables était de 5 watts par m². En appliquant la formule ci-dessous, et si nous souhaitions que l'autonomie atteignît 100%, il aurait été alors nécessaire de diminuer la densité de population. Cette

¹ Quoique nous devrions plutôt dire de transformation

² En comptabilisant les espaces dévolus au stock, aux déchets, au process intermédiaire, aux mines etc.

autonomie ne serait cependant pas totale : l'autosuffisance alimentaire nécessite *a minima* environ 1000 m² par individu¹ et ce, dans le cas d'un régime essentiellement végétarien. La contrainte alimentaire génère elle-même une densité critique (1000 personnes par km² au maximum²) à laquelle les toitures plantées de nos architectures contemporaines ne peuvent pas grand-chose...

Fig. 496. *La non-convergence entre demande et production locale en 2050 à Lille.*

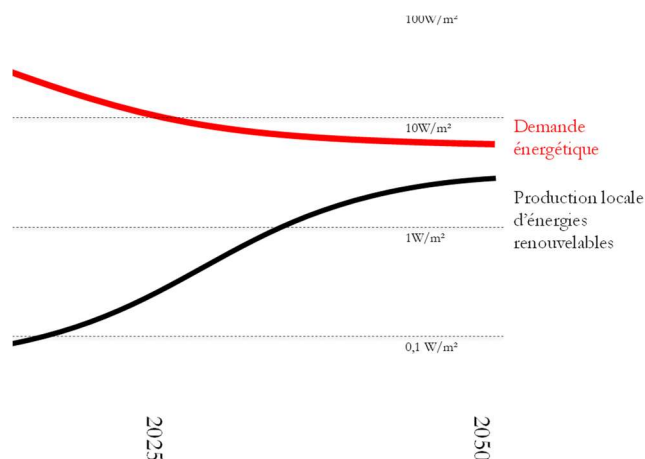


Fig. 497. *Égalité de l'autonomie énergétique*

$$\text{Autonomie } [\%] = \frac{\text{Gisement renouvelable } [\text{W}/\text{m}^2] \times \text{Rendement } [\%]}{\text{Demande individuelle } [\text{W}/\text{pers}] \times \text{Densité } [\text{pers}/\text{m}^2]}$$

¹ Un rapide calcul énergétique permet de retrouver cette valeur. Notre flux moyen de besoin alimentaire est de l'ordre de 100W par personne. Le rendement typique de la biomasse est d'environ 0,1W par m². Le rapport entre ces deux valeurs conduit donc à un ordre de grandeur de surface d'environ 1000m², soit un carré de 30 mètres de côté.

² Et une valeur bien plus faible avec nos régimes alimentaires contemporains.

Quelques trajectoires d'autonomie par densité

1 watt par mètre-carré, objectif de récolte à l'échelle territoriale

L'égalité précise les différents termes de la balance (Fig. 497). La densité mondiale de demande énergétique est d'environ 0,1 watt par m² de continents¹. Pourquoi réclamer un objectif de récolte dix fois plus important ? Au cours des prochaines décades, la population augmentera probablement² tandis que la demande moyenne évoluera sans doute aussi³. Il serait prudent d'anticiper un accroissement de la densité de demande. D'un point de vue spatial, une grande partie des territoires doivent rester des espaces naturels, à l'abri d'une ponction énergétique et dédiés à la séquestration du CO₂. Il serait logique de concentrer les récoltes à proximité des densités humaines importantes ainsi que dans les espaces déjà artificialisés. Ces espaces-ci doivent être plus fortement producteurs et la toise de flux d'un watt par mètre-carré est le bon ordre de grandeur. Les récoltes peuvent être aussi spatialement cumulables : l'agrivoltaïque est un exemple de symbiose entre la culture sous serre et photovoltaïque ; agriculture et éoliennes font aussi très bon ménage. Les paragraphes suivants illustrent alors la diversité des autonomies possibles selon la densité des territoires.

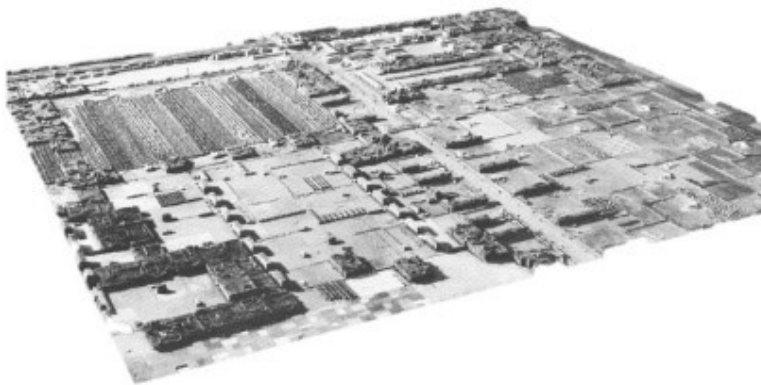


Fig. 498. *Broadacre City est un concept utopique d'urbanisation développé par l'architecte américain Frank Lloyd Wright à partir des années 1930. Une maquette de quatre miles de côté pour présenter le projet. Une acre par famille soit environ 1000m² par individu et à l'époque une demande individuelle sans doute de l'ordre de 2000W : Broadacre, prototype d'un territoire à 2 watts ?*

Trajectoire pour un territoire à 100 personnes par hectare

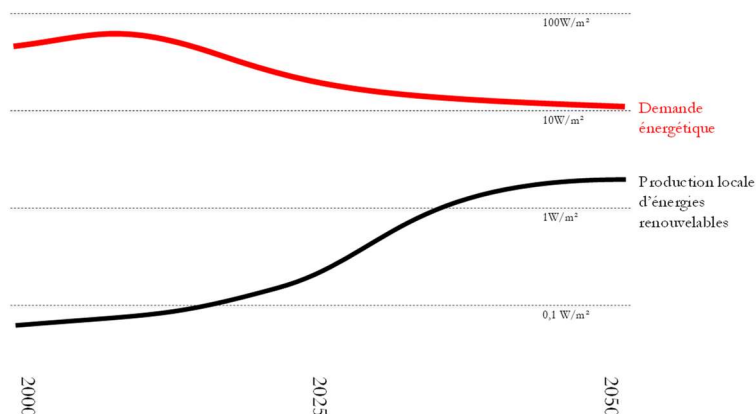
Selon ce premier scénario fictif, la demande individuelle a fortement chuté en passant de 6000 watts à 2000 watts. La densité spatiale de demande a décré de 60 à 20 watts par m². Parallèlement, la production d'énergies renouvelables a été largement développée : la densité de production atteint 5 watts par m² en 2050. *In fine*, la dépendance a été largement réduite, mais l'autosuffisance complète n'est pas possible (Fig. 499). Elle est de l'ordre de 25% et la convergence ne semble physiquement pas possible à cette intensité d'usage (10 000 personnes par km²).

¹ Mais n'oublions pas les territoires maritimes comme espaces potentiels de récolte énergétique

² Pour se stabiliser vers 9 milliards de terrien à horizon 2050 ?

³ Quoi qu'il s'agisse là d'un scénario tendanciel.

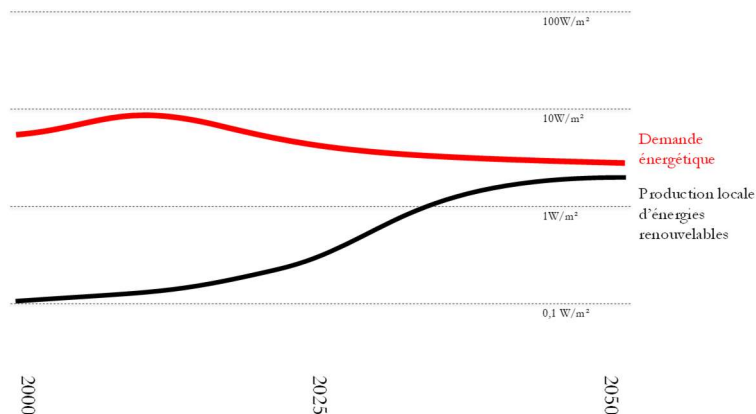
Fig. 499. *Trajectoire possible d'un territoire à densité élevée (100p/ba) : la convergence entre la demande énergétique et la production d'énergies renouvelables par le territoire semble hors de portée.*



Trajectoire pour un territoire à densité modérée (10 personnes par hectare)

Dans un territoire dix fois moins dense¹, en moins de quarante ans, la demande individuelle moyenne de 6000 watts² a diminué à 4000 watts³. La densité de demande s'est donc contractée de 6 à 4 watts par m². Parallèlement, l'aménagement énergétique de ce territoire a permis une augmentation sensible de la production locale d'énergies. En 2050, la densité de production atteint 3 watts par m². L'autonomie semble désormais accessible, elle serait de 75% (Fig. 500). Ce territoire, à densité modérée, peut ainsi viser à terme à une autonomie complète de ces besoins énergétiques (1 000 personnes par km²).

Fig. 500. *Trajectoire pour un territoire à densité modérée (10p/ba). Les trajectoires de demande énergétique de la production locale peuvent se rencontrer : le territoire peut tendre vers l'autonomie complète. Quelques cantons en Allemagne ont déjà atteint ces situations-là.*



Trajectoire pour un territoire à faible densité (1 personne par hectare)

¹ Et qui correspond à peu près à la densité moyenne de la région Ile-de-France.

² Ce qui rappelons-le, est l'ordre de grandeur des besoins énergétiques d'un Français moyen.

³ Ce qui pourrait constituer un palier intermédiaire d'une décroissance de la demande.

Sur ce territoire d'une densité bien plus faible que les précédents¹, ce scénario spéculé sur une augmentation de demande énergétique, du fait par exemple de l'augmentation du niveau de vie. Cet exemple pourrait être celui d'une région d'un pays émergent, et pour lequel la demande moyenne d'un citoyen passerait de 1000 à plus de 2500 watts. Dans cette situation, la densité de demande grimperait alors 0,1 à 0,3W par m². Toutefois, l'installation de capacité renouvelable a pu rattraper cette densité de demande (1W par m²) et le territoire est devenu producteur net d'énergie (+0,7W par m²). Ce territoire à faible densité est plus qu'autonome (300%), il peut exporter de l'énergie (Fig. 501).

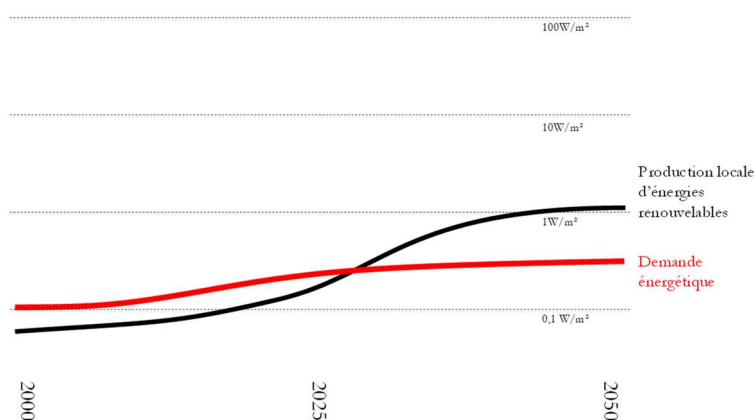


Fig. 501. Trajectoire possible pour un territoire à faible densité (1p/ha). Quoique la densité de demande augmente, elle reste en-deçà de la capacité du territoire à produire de l'énergie.

Les bassins versants énergie-carbone

Ce dernier scénario illustre la capacité de certains territoires à devenir exportateurs de productions renouvelables. Ils constitueraient l'extension des « bassins versants énergétiques » de territoires denses (Fig. 502). Ce concept, détournement du vocabulaire de l'hydrographie, est né en 2008 en marge de la consultation du « Grand Pari de l'Agglomération Parisienne ». L'enjeu énergétique était au cœur des préoccupations de la réponse de notre équipe² [10] :

« Réduire l'empreinte écologique du destin métropolitain. Quelle est l'empreinte écologique de la métropole ? Par son métabolisme, la métropole absorbe et phagocyte les ressources à une échelle au minimum régionale (aliments, déchets), sinon nationale (électricité, eau) voire continentale (énergies fossiles etc.). L'impact de son activité se lit aujourd'hui à l'échelle planétaire. Symptôme parmi d'autres de cet état de fait, l'aire du Grand Paris représente 2% du territoire national mais représente 10% des émissions de gaz à effet de serre. L'enjeu de la métropole du 21ème siècle consistera à réduire cette empreinte : rendre la

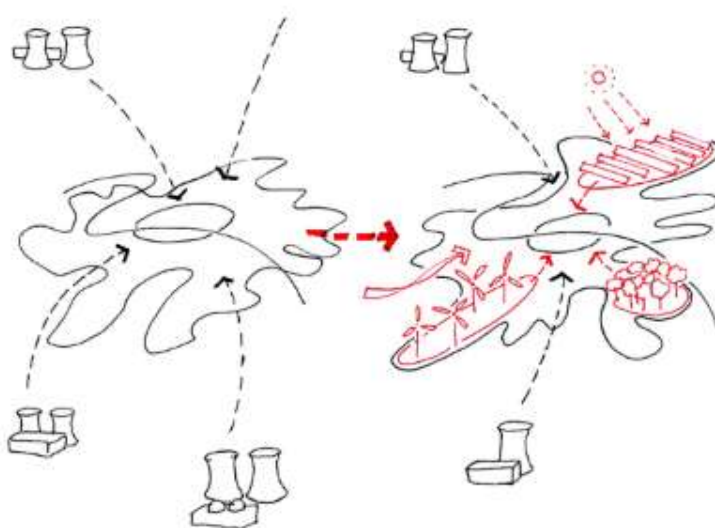
¹ Soit 100 personne par km², soit une densité comparable à celle de la France métropolitaine.

² Contributions d'Elitho à l'équipe AJN-AREP-MCD en 2008.

densité et les usages plus sobres, installer des stratégies d'autoproduction en situation métropolitaine, rendre plus soutenable le désir d'ubiquité sous-jacent à l'attrait métropolitain [...] »

Plus tard, en 2013, dans le cadre d'une conférence¹, ma conclusion était sans équivoque : avec une densité près de dix fois plus importante que la moyenne métropolitaine nationale, l'équité énergétique entre les régions réclamait d'agrandir le Grand Paris !

Fig. 502. *Le territoire du Grand Paris, avant-après. Comment réduire la dépendance énergétique des métropoles ? Comment rapprocher les bassins de captation énergétiques à proximité des métropoles ? Une illustration de l'ambition initiale du Grand Paris, métropole post-Kyoto.*



¹ *Quel Grand Paris ? Et avec quelles énergies ?* donnée à l'École Spéciale d'Architecture.

Densité et neutralité carbone

Densité d'émissions de CO₂

L'après COP21 et la neutralité carbone

Comme nous allons l'esquisser, la problématique du carbone amplifie davantage encore la pression sur les densités. En effet, pour respecter l'Accord de Paris sur le climat¹, et afin de préserver les chances d'un réchauffement global limité à 2°C en 2100², il serait nécessaire que l'humanité soit neutre en carbone vers les années 2050³. Les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine réclameraient d'être équilibrées par les stockages de carbone puis devenir ensuite « *net negative* », l'humanité stockerait plus de carbone qu'elle n'en émettrait dans la seconde moitié de notre siècle. L'urgence climatique convoque une réduction globale et extrêmement rapide des émissions actuelles, supérieures actuellement à 40 milliards de tonnes-équivalent CO₂. Ainsi se dessine cette première évaluation de la « densité critique du carbone », puisqu'un terrien émet en moyenne quelques 6 tonnes équivalent de CO₂ par an tandis qu'un hectare de forêt convenablement exploité pompe⁴ environ 3,6 tonnes de CO₂ par an. Il faudrait ainsi affecter une partie importante de nos petits deux hectares continentaux au dessein exclusif de la neutralité carbone, sur près de 1,6 hectares, une parcelle de 130 mètres de côté. Pour limiter la surface dévolue aux seules fins de séquestration, il est d'abord nécessaire de réduire massivement nos émissions de gaz à effet de serre et rendre ainsi tangible la neutralité (#18).

$$\text{Densité d'émissions [tCO}_2\text{eq/ha par an]} = \text{Emissions individuelles [tCO}_2\text{eq/pers par an]} \times \text{Densité [pers/ha]}$$

Fig. 503. Relation entre densité d'émissions et densité d'usage.

Densités d'émissions équivalentes

Pour illustrer cette pression, si l'on considère que les émissions annuelles d'un Parisien sont supérieures à 10 tonnes de CO₂, la densité d'émissions annuelles à l'échelle de Paris sont supérieures à 2000 tonnes de CO₂ par

¹ Ratifié moins d'un après la COP21 de décembre 2015

² Par rapport à l'ère préindustrielle avec date de référence, 1880.

³ Dans son rapport de 2014, le GIEC a développé des « budgets carbone », associés à des objectifs de limitation de la hausse de température moyenne : à compter de l'année 2011 et jusqu'en 2100, l'humanité pourrait ainsi encore émettre un maximum de 550 GtCO₂ (soit 550 milliards de tonnes de CO₂ équivalent) pour garantir un réchauffement limité à +1,5°C³, ou sinon un maximum de stock à émettre de 1000 GtCO₂ pour contenir une hausse moyenne contenue à +2°C. Au rythme actuel, avec environ 40 GtCO₂eq émises annuellement, et sans action rapide de décroissance de nos émissions, le premier budget sera dépassé aux alentours de 2025 (+1,5°C) et le second (+2°C) autour de 2035.

⁴ Et ce, par la grâce de la photosynthèse

Fig. 504. Ces diagrammes, couplés à des diagrammes densité-emprise, permettent d'évaluer le flux d'émissions par habitant mais également d'estimer la densité d'émissions d'un territoire selon les paramètres de densité de population (sur l'axe horizontal) et d'emprise dans le bâti (sur l'axe vertical). Selon une hypothèse de flux séquestré par la biomasse, nous voyons la traduction en surface servante nécessaire à la séquestration par personne (en bas et à gauche) et en « bassin versant de séquestration carbone » (en bas et à droite), la proportion nécessaire de territoire séquestrant par rapport au territoire important.

hectare (Fig. 503). À contrario, à l'échelle de la Mauritanie, avec une densité moyenne légèrement supérieure à 4 personnes par km² et des émissions individuelles très faibles¹, la densité d'émissions est de l'ordre de 0,03 tonnes de CO₂ par hectare et par an.

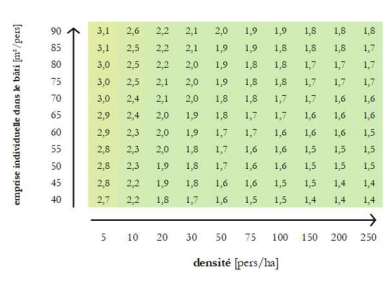
Hypothèses sur les modes et le cadre de vie

Bâtiments (tous type) et usages		
chauffage ou froid	50 kWh/m ² .an	+0 grCO ₂ /kWh
ECS	15 kWh/s.pers	30 grCO ₂ /kWh
électricité spécifique*	900 kWh/pers.an	+0 grCO ₂ /kWh
* sommes des demandes pour le résidentiel, le tertiaire et le commerce		
énergie incorporée	1200 kWh/m ²	200 grCO ₂ /kWh
obsolescence bâti	40 années	

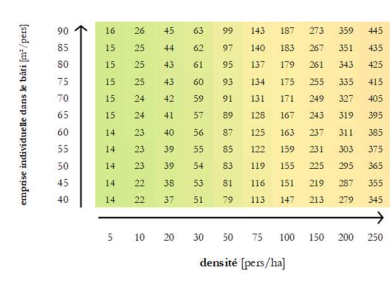
Déplacement automobile hors loisirs et voyages			
parc thermique	@ 30%	120 grCO ₂ /km	
parc électrique	@ 70%	15 kWh/100km	30 grCO ₂ /kWh

Type alimentation et contenu carbone typique	
alimentation	750 kgCO ₂ /pers.an

Emissions de CO₂ par personne [tCO₂ eq par pers et par an]

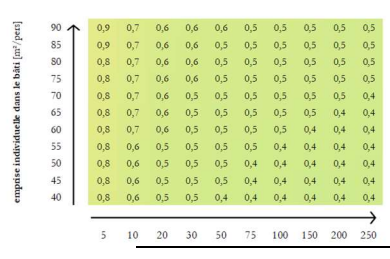


Emissions de CO₂ par hectare [tCO₂ eq. par ha et par an]

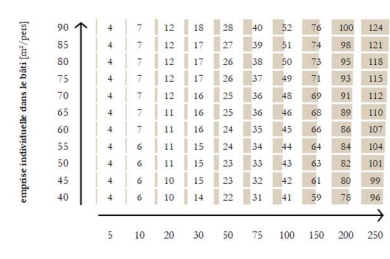


Hypothèse flux séquestré par une forêt convenablement exploitée 3,6 tCO₂ par ha et par an

Surface nécessaire de séquestration [hectare par pers]



"Bassin versant séquestration" nécessaire [s.t.]



¹ D'environ 0,7 tonnes annuelles par habitant

Densité de séquestration carbone

Trois tonnes de dioxyde de carbone par hectare et par an

La séquestration par boisement est assurément l'un des puits carbonés les plus efficaces¹. À l'échelle nationale², la forêt française métropolitaine occupe environ 30% du territoire, soit 16 millions d'hectares. L'Ademe rappelle que « *les forêts contribuent à l'atténuation du changement climatique à travers deux leviers : un effet séquestration et un effet de substitution.* ». Pour la séquestration, la forêt française constitue un « puits net » de carbone³ de 59Mt de CO₂ par an, soit environ 3,7 tonnes de CO₂ par hectare et par an. D'autres sources mentionnent un flux de séquestration de l'ordre de 5 tonnes de CO₂ par an⁴. L'objectif du boisement peut induire un changement d'usage de certains sols et si les modes alimentaires évoluaient vers une nourriture moins carnée, la conversion de certains champs céréaliers, destinés à la nourriture du bétail, en forêts pourrait avoir un impact carbone supérieur à l'unique séquestration générée par le boisement. Nous dessinerons sans doute dans le futur des plans de récolte de carbone atmosphérique (Fig. 511) !

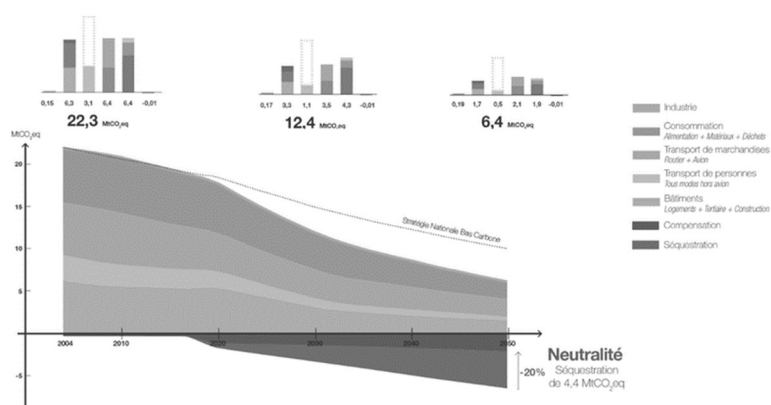


Fig. 505. La trajectoire des émissions de gaz à effet de serre de Paris selon le rapport « Paris change d'ère », Elioth mandataire, 2016 [11]. Rapport téléchargeable sur paris2050.eliotech.com

¹ *Stranded Carbon Assets and Negative Emissions Technologies* – February 2015, Ben Caldecott, Guy Lomax & Mark Workman, SSEE, University of Oxford, p. 15. <http://bit.ly/1ESZYzT> cité par <http://adrastia.org/technologies-emissions-negatives-racicot/>

² *Forêt et atténuation du changement climatique*, Ademe, juin 2015. https://www.ofme.org/documents/actualite/201507/avis_ademe_foret-attenuation-cght-clim_vdef.pdf

³ *Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto*, 2014, CITEPA, cité dans *Forêt et atténuation du changement climatique*

⁴ http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/land_use/index.php?idp=28
<http://www.treehugger.com/natural-sciences/how-much-carbon-do-different-forests-store-what-size-offsets-your-driving-for-a-year.html>

L'équation fondamentale de la neutralité carbone

Un premier exemple, premier ordre de grandeur

A Paris, en 2014, les émissions s'établissaient à 25,6 millions de tonnes de CO₂ équivalent sur un scope large. Dans l'hypothèse d'une compensation opérée par les forêts, la neutralité carbone de Paris aurait alors réclamé une aire boisée d'environ 50 000 km² uniquement affectés à la séquestration des émissions : 500 fois la surface de Paris. Dans l'étude réalisée par le groupement Elioth [11], le résultat de la stratégie de neutralité carbone de Paris pour 2050 suppose l'affectation de près de 9 000 km² de surfaces dédiées à la séquestration des émissions rémanentes : cent fois la surface cadastrale. À l'échelle du Grand Paris et ses sept millions d'habitants, et dans l'hypothèse qu'ils suivraient une trajectoire similaire d'atténuation, cette surface de séquestration devrait être en première approche de 30 000 km², un disque d'un diamètre d'environ 200 kilomètres, 5% de la France métropolitaine.

Géographies négatives en carbone

La place est donc comptée. Nul doute que la neutralité nationale réclamera forcément le concours des surfaces maritimes. Face à cette pression continentale et les nombreux dilemmes que la question du carbone convoque, il est certain que les territoires marins¹ seront de précieux alliés pour donner de plus de souplesse à la définition de nos bassins versants : récolte des courants éoliens et marins, technologies solaires flottantes, développement des cultures aquatiques de biomasse etc. Irons-nous à terme vers une polarisation manichéenne : la mer pour l'énergie et l'alimentation, la terre ferme pour la matière et le carbone ?

Fig. 506. *L'équation de la neutralité carbone*

$$\text{Neutralité } [\%] = \frac{\text{Séquestration surfacique } [\text{tCO}_2\text{eq/pers par an}] \times \text{Fraction sol } [\%]}{\text{Emissions individuelles } [\text{tCO}_2\text{eq/pers par an}] \times \text{Densité } [\text{pers/ha}]}$$

¹Avec l'inscription de quatre décrets au Journal officiel le 25 septembre dernier, la France a accru son emprise sur de nouveaux fonds sous-marins d'une superficie totale de 579 000 km² au large des Antilles, de la Nouvelle-Calédonie, de la Guyane et des îles Kerguelen, soit plus que celle de l'Hexagone. Une démarche qui installe encore plus notre pays comme nation maritime majeure. Paris contrôle déjà la deuxième plus grande zone économique exclusive du monde, avec un peu plus de 11 millions de kilomètres carrés, juste derrière les États-Unis et devant l'Australie. Un français dispose donc d'une cinquantaine d'hectares contre sept hectares par terrien !

Conclusion

La dualité énergétique ville-campagne

Dans une sorte de « servant-servi géographique » (Fig. 507), les bassins versants interrogent l'évolution des liens entre la ville et l'espace rural, au prisme de l'énergie et du carbone, mais également d'autres flux du métabolisme des territoires : les matières (les travaux de Sabine Barles), l'alimentation et les exutoires. John Mc Neill rappelle que le bois de chauffage utilisée à Delhi provient de lieux de production distants de 700 kilomètres de la capitale indienne [8] ; il souligne aussi que la surface de récolte nécessaire pour chauffer Vancouver est vingt fois supérieure à celle de la métropole. Pour comprendre cette intensité de la demande métabolique, les mégacités les plus denses en Asie qui hébergent près de 50 000 habitants par km² possède une masse humaine par unité de surface supérieure à deux kilos par m², soit une densité de trois ordres de grandeur supérieure à celle rencontrée par les grands attroupements saisonniers des herbivores dans les zones vertes africaines [2].

La ville, ogre énergétique

Il y a deux siècles, avant l'exploitation du *solaire ancien* (#12), la dualité ville-campagne était limpide : le rural était le territoire de la production agricole, de l'exploitation de la sylviculture, de l'élevage, de la chasse. La campagne était l'espace de conversion de l'énergie solaire, structurée par la production et la transformation de la biomasse. La campagne était l'offre. À contrario, le bourg¹ était le lieu de la concentration humaine et donc de la consommation de l'énergie. La demande était structurée par les besoins alimentaires et par la chaleur. Ça et là, quelques édifices, quelques architectures assuraient une fonction de production : les moulins à eau et les moulins à vent (#8). Eunhye Kim² citait une définition possible de la ville : « espace où les habitants ne produisent pas leur propre alimentation ». La ville reste le territoire de la demande³ et elle entretient de ce fait un lien singulier avec son hinterland. Aujourd'hui, la croissance de la demande énergétique individuelle (couplée à l'augmentation de la population dans la plupart des situations urbaines) a accentué la densité spatiale de demande énergétique⁴. La ville et *a fortiori* la métropole ont mué en espaces à demande énergétique très intense et densément émetteurs de gaz à effet de serre (Fig. 508). À l'inverse, la production rurale du début du 19^{ème} siècle n'a pu suivre les qualités⁵ et la facilité d'extraction de la plupart des hydrocarbures. Cette situation s'est aggravée avec l'exploitation des ressources fossiles au cours du 20^{ème} et du 21^{ème} siècle (#14). Le rural s'est transformé

Fig. 507. Le lien renoué entre le bassin versant rural et la densité entropique métropolitaine. Le rural, comme « pompe néguentropique », espace de ressources libres (énergie et matière) au service de la haute densité.

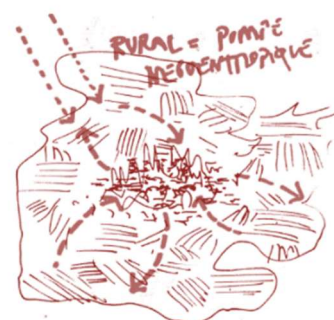


Fig. 508. La ville, « ogre à exergie », trou noir de consommation de néguentropie, pic de densité de demande d'énergie à très haute qualité. En contrepartie, la ville est un territoire d'une intense émission de chaleur fatale, pouvant atteindre plus de 100 watts par m² urbain.



¹ Ou le village ou la ville.

² Pour le séminaire commun au DSA et au DPEA en décembre 2016.

³ Nous verrons dans la troisième partie, les *Métamorphoses* comment cette caractérisation peut être réinterroger.

⁴ Exprimée en W/m².

⁵ Au sens du rapport exergie sur quantité totale d'énergie.

en territoire dédié principalement à la production de nos besoins alimentaires¹ et dont la productivité² a été boostée par des intrants fossiles : mécanisation thermo-industrielle de l'agriculture, emploi massif d'engrais, usages intensifs de produits phytosanitaires etc. Cette question du bassin versant convoque également son symétrique comme le rappelle Bonneuil et Fressoz [8] :

« Le 19^{ème} siècle est marqué par des inquiétudes très fortes quant à la rupture métabolique ente ville et campagne : l'urbanisation, c'est-à-dire la concentration des hommes et de leurs excréments, empêchait le retour à la terre des substances minérales indispensables à sa fertilité. »³

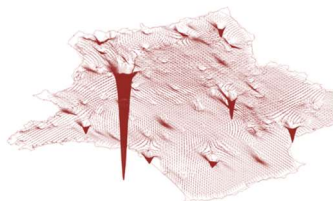
Mathématiques de la densité, relocaliser selon les bonnes proportions

Nous avons dépassé les limites soutenables de l'ère thermo-industrielle. Comment recomposer les bassins versants du futur, de l'énergie, du carbone, de l'alimentation et des matières (Fig. 509) ? Comment effectuer des partitions équitables à partir de la carte des densités humaines ? Comment dessiner des régions permettant de diviser de façon équitale une répartition hétérogène sur une carte⁴ ? Cette méthode pourrait s'appliquer de façon pertinente à la carte de densité de demande énergétique, de telle sorte à déterminer des îlots, des pavés territoriaux homogènes en demande. Le 8 avril 2014, Manuel Valls, à l'époque Premier Ministre, annonçait, après de nombreuses tractations politiques, un projet de redécoupage de l'Hexagone en réduisant le nombre de régions métropolitaines à douze. En parallèle, nous poursuivions les travaux de recherche de *Réforme* en étudiant le remembrement énergétique de la France, en analysant comment l'énergie pouvait être l'un des déterminants de ce redécoupage. À cette fin, l'équipe avait ainsi conçu un algorithme qui permettait de proposer plusieurs scénarios de morcellement avec l'objectif d'homogénéiser les densités de demande entre chaque partie (Fig. 510).

Les échelles en question

Pérenniser l'équilibre entre les territoires en les faisant converger vers des densités de demande semblables : l'effort à fournir pour constituer des bassins versants durables devrait être équivalents entre chacune des parties. L'autonomie énergétique de chaque région évoluerait alors de façon

Fig. 509. Une illustration des densités de demandes énergétiques à l'échelle du territoire français avec vecteurs des lignes de plus grande pente, analogon des lignes d'écoulements hydrographiques.



¹ Directes ou indirectes, notamment pour la production de biomasse dédiée à la nourriture du bétail.

² Voir *Pétrole Apocalypse*, Yves Cochet

³ p212, *L'évènement Anthropocène*

⁴ Dans les statistiques, la médiane est le couperet, la « membrane » qui sépare deux populations, selon deux parties égales en nombre. À l'échelle de la France métropolitaine, nous pourrions imaginer de tracer le vaste ensemble des courbes qui coupent le territoire selon deux populations identiques. En complexifiant le jeu, si l'on souhaite couper la population selon « N » parties, quelles sont alors les partitions possibles ? Prenons au hasard l'une de ces partitions. Quelle est sa robustesse à une légère modification de la population et de sa répartition ? Existe-t-il du coup dans l'ensemble des partitions ou] des pavages du territoires quelques « individus géométriques » plus résistants ? Si oui, ils peuvent alors être une trame intéressante pour l'architecture politique, et surtout, l'aménagement durable et savant de bassins versants énergétiques adaptés et contextuels.

homogène. Selon ce principe, la somme des parties, le pays tout en entier, serait davantage robuste et résilient. Dans *Une question de taille*, le philosophe et mathématicien Olivier Rey [12] nous rappelle à l'utilité de la bienveillance vis-à-vis de la petite échelle.

« [...] *Kobr garda toute sa vie la conviction que l'unité de distance pertinente pour organiser une société saine était de l'ordre de celle séparant son village natal de la capitale du Land, Salzbourg, située à vingt-deux kilomètres. Les petites sociétés sont-elles nécessairement fermées sur elles-mêmes, marquées par le provincialisme et l'esprit de clocher ? L'Athènes de l'Antiquité, ou la Florence de la Renaissance (qui comptait 40 000 habitants au début du 15^{ème} siècle, le temps de sa plus grande splendeur), pour ne prendre que ces deux exemples spectaculaires, prouvent le contraire. C'est l'unification politique de vastes territoires qui, en pompant toutes les énergies vers quelques centres énormes, a rendu stérile toute entité de moindre taille. À notre époque qui se targue de tant priser les différences, il serait temps de s'apercevoir qu'un monde organisé à petite échelle est un monde divers, un monde où il y a place pour plusieurs mondes : l'exotisme est plus grand et plus proche.* »¹

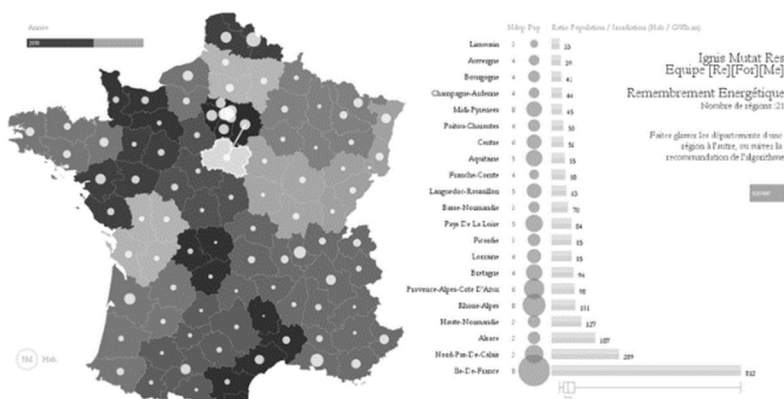


Fig. 510. Quelques hypothèses de remembrement des bassins versants énergétiques régionaux. Quelques images de l'algorithme de redécoupage territorial selon le crible de la densité énergétique conçu chez Elioth pour l'équipe Re-forme.

À la lumière des différents exemples de cet article, la toise du watt par unité de surface ou la nécessité d'espaces nécessaires à la neutralité carbone nous invite à réfléchir aux échelles et aux proportions de l'aménagement des territoires (et la mise à jour de la gouvernance politique et administrative en phase avec les impératifs écologiques). Nous avons vu que l'intensité métropolitaine réclamait une aire large pour statuer sur ses différentes trajectoires d'autonomie ou de neutralité [11]. Elle est sans doute à l'échelle de centaine de kilomètres et la grande région serait la bonne échelle.

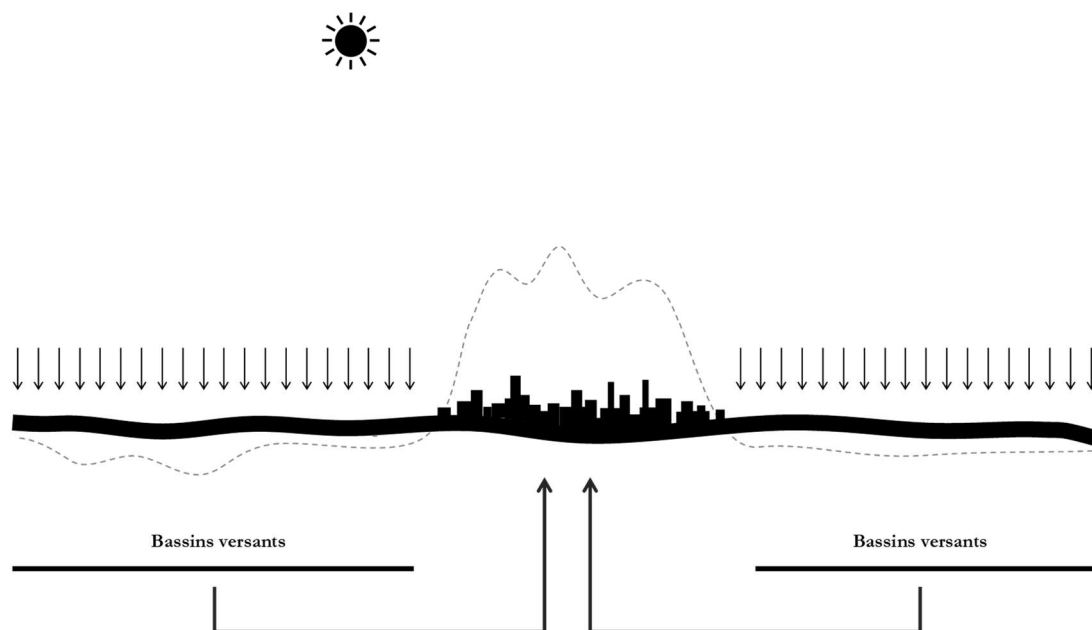
Hors de ces bassins métropolitains, l'échelle cantonale d'une dizaine de kilomètres serait davantage appropriée pour fédérer les énergies humaines et contextualiser les récoltes. Agrégats entre blocs métropolitains, ces petites échelles permettraient une fluidité et une réactivité importante d'adaptation. Et si l'organisation durable de nos territoires s'inspirait de

¹ Olivier Rey, p88

lois de cohésion des matériaux hétérogènes, et de leur savante imbrication de plusieurs échelles ?

À la lumière des différents exemples de cet article, la toise du watt par unité de surface ou la nécessité d'espaces nécessaires à la neutralité carbone nous invite à réfléchir aux échelles et aux proportions de l'aménagement des territoires (et la mise à jour de la gouvernance politique et administrative en phase avec les impératifs écologiques). Nous avons vu que l'intensité métropolitaine réclamait une aire large pour statuer sur ses différentes trajectoires d'autonomie ou de neutralité. Elle est sans doute à l'échelle de centaine de kilomètres et la grande région serait la bonne échelle. Hors de ces bassins métropolitains, l'échelle cantonale d'une dizaine de kilomètres serait davantage appropriée pour fédérer les énergies humaines et contextualiser les récoltes. Agrégats entre blocs métropolitains, ces petites échelles permettraient une fluidité et une réactivité importante d'adaptation.

Fig. 511. *L'équilibre entre densité d'émissions et densité de séquestration.*



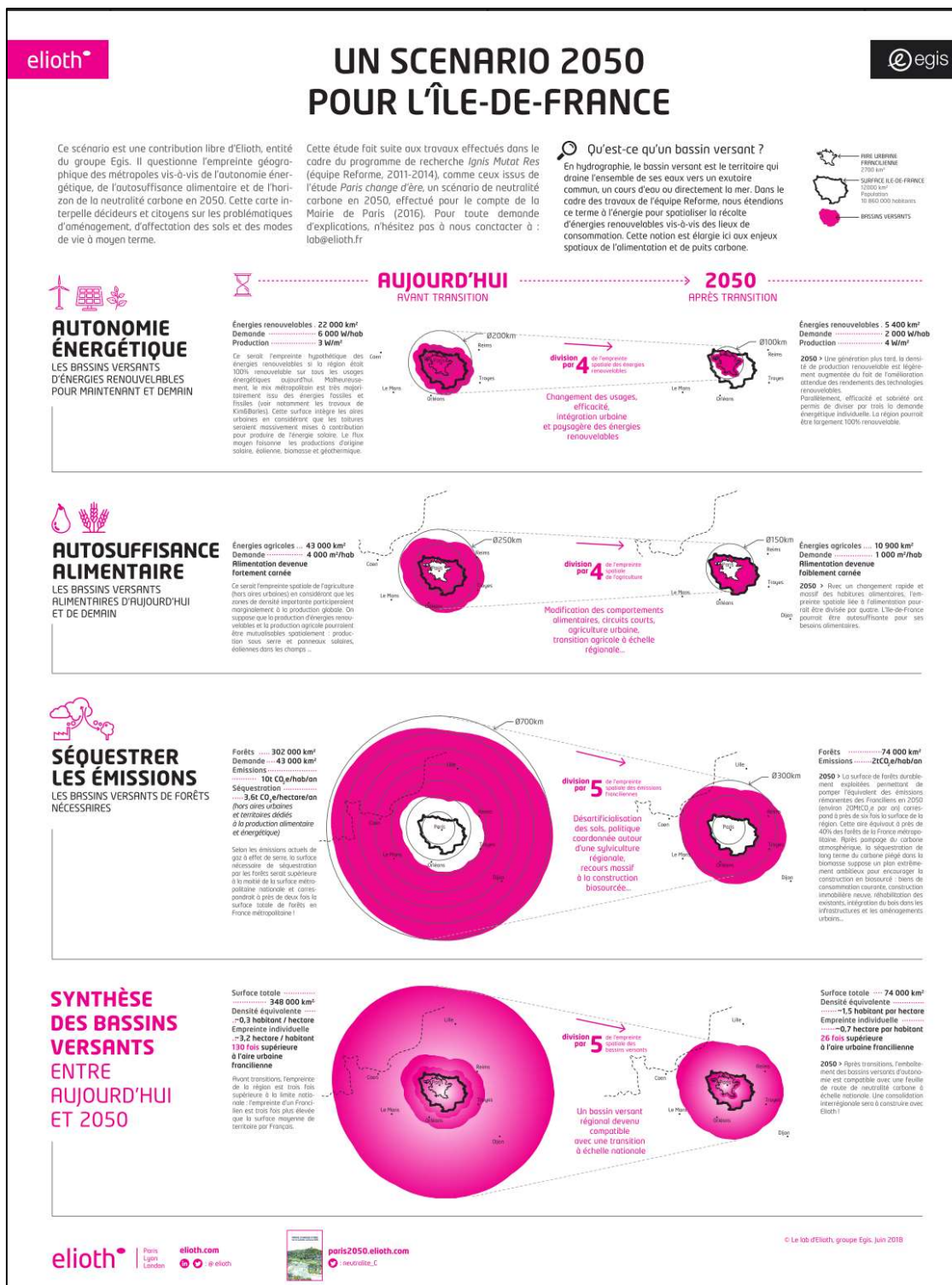
Bibliographie

1. MCKAY David JC. *Sustainable Energy - Without the hot air*. Cambridge, UIT Cambridge, 2009. 368 p.
2. SMIL Vaclav, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015
3. LOVINS Amory B., *Réinventer le feu*, traduction de Agnès El Kaïm, éditions de l'échiquier, 2013. Titre original *Reinventing Fire*, 2011
4. MENARD Raphaël, *Dense Cities in 2050 : The Energy Option ?*, Summer Study Proceedings, ECEEE, 2011
5. NEWMAN Peter, KENWORTHY Jeffrey. *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*. Washington DC, USA : Island Press, 1999. 450 p.
6. MENARD Raphaël, *La Renaissance des Fabriques. Un monde possible en 2050*. 40p. Octobre 2015
7. MENARD Raphaël et al., *Reforme*. Rapport final de recherche. Programme Ignis Mutat Res, 2014. 292 p.
8. MCNEILL John R., *Du nouveau sous le soleil*. Paris, France, Éditions Champ Vallon, L'environnement à une histoire, 2010 (2000). 517 p.
9. BONNEUIL Christophe, FRESSOZ Jean-Baptiste, *L'Événement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Seuil, 2013
10. MENARD Raphaël, « Introduction au développement durable » (p134 à 139) et contributions dans le reste de l'ouvrage, *Naissances et renaissances de mille et un bonheur parisien*, J. Nouvel, JM Duthilleul et M Cantal-Dupart, Les éditions du Mont Boron, avril 2009, 638 pages.
11. DOSSIER Julien, MENARD Raphaël et al., *Paris, change d'ère. Stratégie de neutralité carbone de Paris en 2050*. Elioth, 2016
12. REY Olivier, *Une question de taille*, Stock, 2014

Fig. 512. *Cauchemar urbain perse : Maskan Mebr, 37 000 logements construits au milieu de rien à 40km de Téhéran*



Fig. 513. Scénario pour l'Ile-de-France



Partie 3. Projets illustrés

Quelques projets personnels, classés par ordre chronologique. Des interrogations rétrospectives sur les dimensions optimales de chaque projet et une synthèse des problématiques énergie-matière-climat. La tentative de repositionner chacun de ces projets selon les différents temps (IV, V, VI ou VII).

Fig. 514. Synthèse des projets depuis 15 ans et tentative de classement selon les temps IV, V, VI et VII.

Nom du projet	Listé	Bureau	Lieu	Rôle		Phase		Type				Date Début
				Archi	Ingé	Etude	Travaux	IV.3	V	VI	VII	
Un acier héliotrope	•	Pers.	Parc de St Cloud	•	•	*					•	1999
Lentille Cour de Rome		RFR	Paris		•	*	•					1999
Illuminaires		RFR	Paris		•	*	*					2000
Passerelle en verre	•	RFR	Luxembourg	•	•	*					•	2000
Passerelle Simone de Beauvoir	•	RFR	Paris		•	*		•		•		2001
Verrière Chambre des Députés	•	RFR	Luxembourg	•	•	*			•	•		2001
Verrière Gare de Strasbourg		RFR	Strasbourg		•	*	*	•		•		2003
Gloriette de pare-brises		Pers.	-		•	•	*				•	2004
Réemploi Centre Pompidou		169	Paris		•	•	*				•	2017
Patinoire		RFR	Châlons-en-Champagne		•	*		•				2004
Verrière Artem		Eloth	Nancy		•	*	*	•	•			2006
Démonstrateur Montagne Solaire	•	Eloth	Marolles-en-Brie	•	•	*	*				•	2006
Wind-it	•	Eloth	Vitré, Revel, Madagascar	•	•	*	*				•	2007
Verrière Bibliothèque de Rennes		Eloth	Rennes	~	•	*	*				•	2013
Expérimentation sol à albédo variable	•	Eloth	Lyon	•	•	*	*				•	2013
Table Climatique	•	Pers. (avec ZEF)	Paris	•	•	*	*				•	2014
Edicule Place Marguerite de Navarre	•	169	Paris	•	•	*	*				•	2016
Maisonnette Flagy	•	Pers. (avec Avril)	Flagy	•		*	*			•	•	2016
Réemploi Centre Pompidou		169	Paris	•	•	*					•	2017

Fig. 515. Synthèse énergie-matière des projets

Nom du projet	Listé	Q	Volume m ³	Energies	Matières	Composition					Masse unitaire	Masse totale
						Acier kg	Verre kg	Bois kg	Béton kg	Autres kg	kg	kg
Un acier héliotrope	•	-	-	Solaire thermodynamique	Acier, béton, verre, bois	-	-	-	-	-	-	-
Lentille Cour de Rome		1	6E+02	-	Acier inox, verre	3E+04	1E+04	-	-	-	4,0E+04	4,0E+04
Illuminaires		1	-	-	Acier, panneaux plastiques	1E+02	-	-	-	2E+02	1,0E+02	1,0E+02
Passerelle en verre	•	1	3E+01	-	Acier, verre, aluminium	4E+03	5E+03	-	-	1E+03	8,8E+03	8,8E+03
Passerelle Simone de Beauvoir	•	1	1E+03	-	Acier, béton, bois	2E+06	-	3E+05	2E+06	-	3,6E+06	3,6E+06
Verrière Chambre des Députés	•	1	-	Panneaux photovoltaïques	Acier, verre, panneaux photovoltaïques	9E+03	8E+03	-	-	-	1,7E+04	1,7E+04
Verrière Gare de Strasbourg		1	3E+04	-	Acier, verre, béton	3E+05	2E+06	-	-	-	1,9E+06	1,9E+06
Gloriette de pare-brises		-	-	-	Verre, acier	5E+02	4E+02	-	-	-	8,5E+02	-
Réemploi Centre Pompidou		1	-	-	Verre	-	3E+04	-	-	-	3,4E+04	3,4E+04
Patinoire		1	4E+04	-	Acier, divers	9E+05	2E+04	-	3E+06	-	3,5E+06	3,5E+06
Verrière Artem		1	6E+04	Puits canadien	Acier, verre	2E+06	4E+05	-	1E+05	-	2,0E+06	2,0E+06
Démonstrateur Montagne Solaire	•	1	3E+01	Solaire thermodynamique	Tissus divers, éléments plastiques	-	-	-	-	5E+01	5,0E+01	5,0E+01
Wind-it	•	3	5E+03	Eolien et photovoltaïque	Acier, matériaux composites, PV	1E+04	-	-	-	1E+03	1,3E+04	3,9E+04
Verrière Bibliothèque de Rennes		1	2E+03	-	Acier, verre	6E+04	4E+04	-	-	6E+02	9,3E+04	9,3E+04
Expérimentation sol à albédo variable	•	1	5E+00	Solaire thermique	Béton, différents revêtements	-	-	1E+02	6E+02	2E+02	9,0E+02	9,0E+02
Table Climatique	•	1	2E+00	-	Aluminium, bois, MCP	-	-	1E+01	-	1E+01	1,0E+01	1,0E+01
Edicule Place Marguerite de Navarre	•	1	1E+03	-	Bois, acier, verre	6E+03	6E+03	2E+04	-	3E+02	3,6E+04	3,6E+04
Maisonnette Flagy	•	1	1E+02	Solaire passif	Bois, verre	-	7E+02	2E+03	-	-	2,7E+03	2,7E+03
Réemploi Centre Pompidou		1	-	-	Verre	-	3E+04	-	-	-	3,4E+04	3,4E+04
Composition moyenne						39%	19%	3%	39%	0,03%	Total 11 274 tonnes sur 18 ans	
											Moyenne 626 tonnes par an	

#23 Une passerelle en verre et une verrière photovoltaïque

Des projets « high-tech » réalisés au Luxembourg conçus en tant qu'architecte et ingénieur au début des années 2000 chez RFR. Première prise de conscience des questions de confort climatique. Une expérience initiative d'intégration du photovoltaïque dans l'architecture.

Description

Contexte

Ce chapitre relate deux projets dans lesquels je me suis beaucoup investi lorsque j'étais jeune ingénieur (et pas encore architecte diplômé) chez RFR au début des années 2000. Sous la houlette patiente et pédagogue de Jean-François Blassel, à l'époque directeur chez RFR, j'ai appris avec ces deux objets luxueux la quintessence de mises en œuvre sophistiquées (#17). Pour le compte de l'administration publique du Grand-Duché, RFR avait été missionné pour concevoir le franchissement sur quelques mètres de la rue de l'Eau, dans le centre historique de la ville de Luxembourg, par un ouvrage fermé, reliant la Chambre des Députés au bâtiment hébergeant les bureaux des parlementaires (Fig. 517). Je rejoignais l'équipe du projet au stade de l'avant-projet sommaire au début de l'année 2000. Avec Jean-François Blassel, et Mitsu Edwards au début, je développai ensuite la conception jusqu'au début du dossier de consultation avant de quitter RFR pour fonder Elioth à la charnière entre 2003 et 2004.

La passerelle en verre

L'ouvrage était en une passerelle de huit mètres de portée, soutenu par des poutres en acier inoxydable, des profils reconstitués soudés qui de mémoire devaient avoisiner les deux cents kilos au mètre linéique (Fig. 516). Le franchissement devait offrir un parfait contrôle climatique et éviter toute condensation. La prouesse que nous voulions réaliser consistait à utiliser la sousface de verre comme poutre au vent pour ne pas déroger à la réputation de RFR, caïds du verre structural, *mavericks* de la matière. Pour garantir le confort hygrothermique, nous développions un plancher climatique en profil extrudé d'aluminium. Au-delà des questions structurales, cette passerelle était une « serre chaude » : avec ses parois en verre isolant¹, le moindre rayon de soleil risquait de faire surchauffer le climat intérieur.

¹ Des vitrages extra-blancs, isolants, feuilletés et trempés. De mémoire, leur composition devait être du type 12/16/8.8, soit des vitrages dont le poids surfacique devait être supérieur à 70kg par m². Chaque module de vitrage dont les dimensions avoisinaient les 3m de haut par 2m de large, le poids de chaque volume verrier était de plus de 400 kilos.

Fig. 516. Fiche d'identité de la passerelle en verre

Passerelle en verre		
Listé	•	
Bureau	RFR	
Lieu	Luxembourg	
Rôle	Arché	•
	Ingé	•
Phase	Etudes	•
	Travaux	
Type	IV.3	
	V	
	VI	•
	VII	
Temps	Début	2000
	Fin	2004
	Livraison	2003
Q	1	
Volume	m ³	30
Energies	-	
Matières	Acier, verre, aluminium	
	Composition	
	Acier kg	4E+03
	Verre kg	5E+03
	Bois kg	-
	Béton kg	-
	Autres kg	1E+03
	Masse unitaire kg	8,8E+03

Fig. 517. La maquette d'étude



Je me résolus donc à réaliser mes premiers héliodons sous Autocad, ce qui était plutôt une première à l'époque. J'appris également sur le tas la thermique et me frottais pour la première fois à modéliser sous Matlab le comportement climatique de l'ouvrage¹.

Verrière de l'îlot Printz

La verrière de l'îlot Printz fut une commande postérieure à la passerelle en verre. L'ouvrage consistait à couvrir une faille entre deux bâtiments historiques pour la Chambre des Députés. Dans la continuité du vocabulaire constructif *high tech* de la passerelle, nous développions en 2002 une mise en œuvre sophistiquée de verre et d'acier inoxydable (Fig. 518). Le point d'intérêt était la recherche d'une trame à croissance géométrique qui permettait de coller au mieux aux invariants de l'existant et générait des distorsions de perspective. Je réalise a posteriori cette récurrence d'intérêt sur ces tours de passe-passe optiques comme l'anamorphose de l'édicule de la Place Marguerite de Navarre, réalisée quinze ans plus tard. Cette verrière supposait aussi un contrôle précis des apports solaires. La largesse de la commande et l'écoute de la part du maître d'ouvrage pour les propositions innovantes, nous proposons d'intégrer des cellules solaires sur des brise-soleils orientables en protection de la verrière (Fig. 519).

Energie et matière

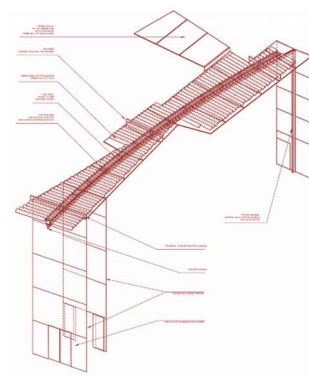
Retour d'expérience

A posteriori, analysés avec quinze ans de recul, ces deux projets révèlent une débauche de matières incroyable, un luxe et une précision inouïe dans leur mise en œuvre. Après une enquête dédiée, il serait intéressant de reconstituer la dette constructive en matière, en énergie et en émissions de gaz à effet de serre, des coûts écologiques sans doute inavouables pour ces deux petits projets très luxueux, inscrits dans un contexte à la fois patrimonial et institutionnel (#14. À leur décharge, ces projets permirent aussi de requalifier les existants, de leur adjoindre des fonctionnalités nouvelles. On peut supposer qu'ils ont ainsi évité ou retardé la destruction des bâtiments existants (tout au moins pour les bureaux des députés) (Fig. 520).

Fig. 518. Fiche d'identité de la verrière

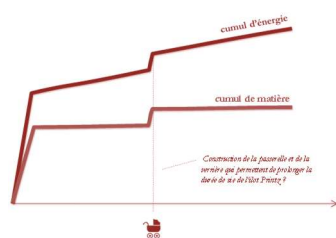
Verrière Chambre des Députés	
Listé	*
Bureau	RFR
Lieu	Lucembourg
Rôle	Archi *
	Ingé *
Phase	Etudes *
	Travaux
Type	IV.3
	V *
	VI *
	VII
Temps	Début 2001
	Fin 2004
	Livraison 2003
Q	1
Volume	m3 -
Energies	Panneaux photovoltaïques
Matières	Acier, verre, panneaux photovoltaïques
Composition	Acier kg SE+03
	Verre kg SE+03
	Bois kg -
	Béton kg -
	Autres kg -
Masse unitaire kg	1,7E+04

Fig. 519. La verrière de l'îlot Printz



¹ Avec la coquetterie de modéliser le comportement d'absorption énergétique d'un ouvrage bi-transparent, en interprétant les « rebonds » successifs de l'énergie solaire à l'intérieur de l'ouvrage, somme d'une suite géométrique.

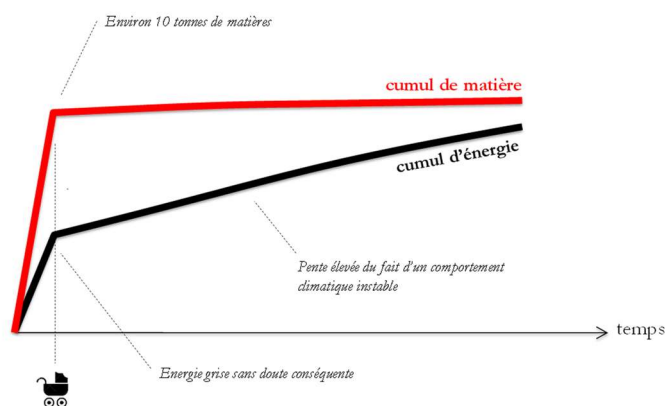
Fig. 520. *Chronogramme estimée de la passerelle en verre : elle appartient davantage au temps IV qu'au temps VII. Mais la somme des deux interventions permet de remettre à jour les usages de l'ilot Printz et ainsi prolonge sa durée de vie (hypothèse consolatoire).*



À quel temps appartiennent ces projets ?

Quintessence du high-tech, ces projets pourraient être classer à mi-distance entre le temps IV.3 (#14) et le temps V, notamment pour la verrière avec ses panneaux photovoltaïques (#16) et le soin général apporté aux qualités des enveloppes. Pour cette dernière, en considérant que la surface productive correspond à la moitié de la surface de verre d'enveloppe, le temps de retour carbone uniquement pour la partie en verre serait d'environ¹ deux ans et demi, sachant l'intensité carbone du Luxembourg est l'une des plus élevées d'Europe.

Chronogramme de la passerelle en verre



*

¹ En 2003, la production d'un kWh électriques émettait en moyenne l'équivalent

de 1080gr de CO₂. En considérant que l'amortissement sur 20 ans du carbone gris de la cellule photovoltaïque correspond à moins de 100gr de CO₂ par kWh produit, que la production annuelle est de l'ordre de 100kWh par m² et par an (hypothèse avec les rendements de 2003), le productible évite environ 100kg de CO₂ par an et par m². Dans le cas de la verrière, les vitrages isolants étaient particulièrement épais : des épaisseurs totales de vitrage sans doute de l'ordre de 40mm soit près 100kg gris par m². En retenant un taux d'émissions de carbone gris de 1,22kg de CO₂ par kg de verre, ce sont donc près de 120kg de CO₂ par m². Au bout de deux ans et demi, les émissions liées à la mise en œuvre du verre pouvaient être ainsi compensées.

Fig. 521. *Une photo de la passerelle en verre en 2018*



Fig. 522. *Entrée de la verrière de l'annexe de la Chambre des Députés, avec ses brise-soleils photovoltaïques orientables sur l'îlot Printz.*



#24 La passerelle Simone de Beauvoir

Œuvre conjointe de Feichtinger et de RFR. Un franchissement exceptionnel dans Paris. Beaucoup d'énergie grise pour peu de matière. L'archétype de la prouesse structurelle. Le point de départ de réflexions autour des franchissements à très bas carbone.

Description

Le projet en quelques mots

Une nouvelle passerelle piétonne dans Paris, un projet-phare chez RFR au début des années 2000, après le concours remporté en 1998 avec l'architecte Dietmar Feichtinger¹. Ce sera un ouvrage métallique de grande portée de près de 200 mètres sur la travée principale pour ce 37^{ème} pont sur la Seine (Fig. 523). Situé entre les ponts de Bercy et de Tolbiac, son nom provisoire sera la passerelle Bercy-Tolbiac avant d'être inaugurée « Simone de Beauvoir » en juillet 2006. Cette élégante passerelle à deux niveaux franchit le fleuve, ses berges et les voies qui la bordent, d'une seule traite, sans pile intermédiaire. D'une portée libre de 190 mètres, elle est constituée de deux éléments, un arc très élancé et une suspensoire caténaire, reliés par les « obélisques », l'ensemble de la structure étant en acier. Sa partie supérieure offre une vue intéressante sur Paris. Sa partie inférieure constitue une place longue de 65 mètres et large de 12 mètres.

Début d'intervention

Ma participation au projet débute par la petite porte. François Consigny, à l'époque directeur de projet chez RFR, a besoin de renfort pour analyser les instabilités de l'ouvrage, et plus particulièrement la caractérisation des coefficients d'éloignement du flambement de l'arc, la partie comprimée de l'ouvrage. L'histoire s'accélère ensuite puisqu'à la remise de l'avant-projet, la passerelle Millennium à Londres conçue par Foster et Arup est fermée le lendemain de son inauguration, suite à un comportement vibratoire inexpliqué et fortement inconfortable (chapitre #17). Peu de temps après, en 2001 et 2002, je me retrouverai en charge et responsable de l'étude dynamique (Fig. 535), commande complémentaire de la part de la Ville de Paris afin de préciser la conception de l'ouvrage, trouver des mesures de design palliatives assurant un bon comportement vibratoire de la passerelle vis-à-vis des charges dynamiques des piétons [1].

Fig. 523. *Vue de la passerelle Simon de Beauvoir*



Fig. 524. *Fiche d'identité*

Passerelle Simone de Beauvoir		
Listé	•	
Bureau	RFR	
Lieu	Paris	
Rôle	Arch	•
	Ingé	•
Phase	Etudes	•
	Travaux	
Type	IV.3	•
	V	
	VII	•
Temps	Début	2001
	Fin	2003
	Livraison	2006
Q	1	
Volume	m ³	1200
Energies	-	
Matieres	Acier, béton, bois	
Composition	Acier kg	2E+06
	Vitre kg	-
	Bon kg	3E+05
	Béton kg	2E+06
	Autres kg	-
Masse unitaire kg	3,6E+06	

¹ Œuvre conjointe d'ailleurs de Henry Bardsley et de Dieter Feichtinger. La filiation RFRienne est d'ailleurs évidente, cette poutre pectinée chère à Henry, reprise aussi de la poutre à câbles célèbre développée pour les serres de la Villette par Peter Rice.

Matières et vibrations

Ces investigations étaient absolument passionnantes pour inventer et éviter la petite catastrophe architecturale de systèmes disgracieux d'amortissement¹ qui auraient été à intégrer trop tardivement dans le projet ; passionnantes aussi dans les explorations mathématiques que sous-tendaient cette quête, comme formaliser les valeurs d'un amortissement optimum². Il y eut aussi un *euréka*, celui plus tard de l'idée d'un « petit big bang » du changement de schéma statique en fin d'APD³, la proposition au départ farfelue d'utiliser les passerelles de liaison, de les liasonner statiquement à l'ouvrage principal telles des leviers, comme des sortes de « gerberettes »⁴ horizontales afin d'installer les amortisseurs sur les extrémités de l'ouvrage, les dissimuler dans les berges⁵ (Fig. 526). L'ouvrage a été construit de la sorte et plus de dix ans après son ouverture au public, son comportement vibratoire semble donner satisfaction jusqu'à ce jour.

Les externalités de Simone

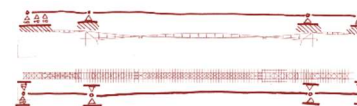
Le carbone généralisé : le poids carbone du franchissement

L'identité, le génome culturel de RFR était le mouvement high-tech. Les riches heures des années 80 étaient assurées par le brevet déposé autour du verre attaché par point⁶, parfois nommé de façon un peu usurpé le verre structural. Dans la droite lignée de la plupart des projets sur lesquels je suis intervenu de près ou de loin chez RFR, la quasi-totalité avait en commun ces mises en œuvre audacieuses de la matière, en puisant largement dans des banques de matériaux sophistiqués : acier inoxydable de qualité marine, acier à haute limite élastique, vitrages de grand format et/ou de grande épaisseur... Rétrospectivement, je m'interroge sur l'utilité de ces différentes dettes constructives, de leur *utilitas* mise en relation avec leur *venustas*, comme dans le cas de verrière de la Gare de Strasbourg ou les projets luxembourgeois décrits dans le chapitre précédent. À quoi cette débauche de matières a-t-elle bien servi ? Aussi, en clin d'œil à la notion

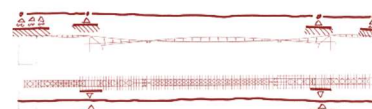
Fig. 525. Déformée amplifiée du premier mode propre horizontal de l'ouvrage



Fig. 526. Les évolutions du schéma statique de l'ouvrage en fin d'avant-projet



La modification du schéma statique en plan, en plaçant les ouvrages de liaison en console



¹ L'exemple de la passerelle de Londres

² Avec un peu de calcul variationnel et une transformée de Fourier triviale, mais je me souviens encore de l'excitation lorsque je débusquai la formule, rappelée d'ailleurs dans l'article rédigé pour *Footbridge 2002*

³ Et le coup de fil à François Consigny qui venait de quitter RFR.

⁴ Partie célèbre du squelette du Centre Pompidou conçu notamment par Peter Rice et Henry Bardsley.

⁵ Validé ensuite par des simulations numériques par pas de temps. Il y eut aussi les multiples recherches pour faire en sorte d'augmenter la fréquence des ouvrages de liaison à 3Hz.

⁶ Le VEA, le verre agrafé par points, avec ses rotules d'inox aux angles d'un panneau de verre, esthétique-phare de la fin du 20^{ème} siècle d'une modernité sophistiquée. Hugh Dutton, ex-RFR, et co-auteur avec Peter Rice de l'ouvrage *Le verre structural*, notera que le décor de l'émission-culte de Canal+ des années 90 utilisait en arrière-fond une réplique de verre agrafé par point.

de « vitesse généralisée »¹ chère à Ivan Illich², je décidais d'abord de transposer ce schéma d'analyse à un ouvrage tel que la passerelle Simone de Beauvoir.

Portée et externalités

C'est un fait mathématique : plus la portée est importante, plus une structure réclame de la matière. La quantité de matériaux croît plus vite que la distance à franchir (ce point sera détaillé dans la suite de l'article). D'Arcy Thomson l'a merveilleusement illustré en comparant les os de squelette de différents animaux : le fémur d'un éléphant est par exemple bien moins élancé que celui d'un mammifère de petite taille [2]. Pour une passerelle de 300 mètres de portée, il en est de même : elle réclame bien plus que le triple de la matière d'un franchissement de cent mètres. Et donc, quel que soit les matériaux constitutifs, l'empreinte carbone constructive, la dette de carbone gris liée à son édification sera à la mesure de la prouesse de sa portée.

Le dimensionnement écologique des structures

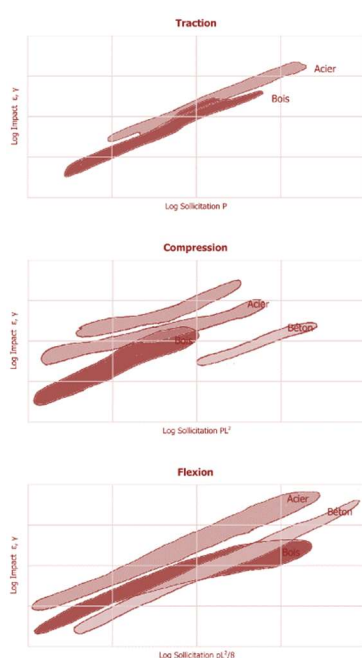
Le travail de Koliann Mam, stagiaire chez Elioth entre 2016 et 2017, permit d'évaluer les analyses de cycle de vie de plusieurs ouvrages, dont la passerelle Simone de Beauvoir [4]. Dans la lignée d'un stage précédent effectué en 2008 par Francesco Armas, j'incitais de jeunes ingénieurs chez Elioth à se pencher sur le dimensionnement écologique des structures [3]. Une histoire qui débute avec les montagnes solaires, premier projet d'une forme de « refus » de la matière, d'une recherche de matières minimales et d'un coût économique extrêmement compétitif (chapitre #25). En 2008, ce premier mémoire de fin d'études rédigé par Francesco Armas tentait de montrer la relation entre externalités environnementales et la sollicitation de la matière en tension, en compression ou en flexion [3].

Le bon matériau au bon endroit

En tension, en compression ou encore en flexion, qui de l'acier, du béton ou du bois est le plus performant écologiquement ? Évidemment, les conclusions n'étaient pas univoques. Dans certaines situations, tel matériau pouvait être plus avantageux qu'un autre.

« Matériaux, structures : trouver le bon mix. La clé, finalement, est celle du bon « mix », pensé projet par projet, entre des matériaux et des techniques de construction. « Nous menons à ce titre un programme de réflexion en interne », observe Raphaël Ménard du bureau d'études Elioth. « Notre objectif est de croiser l'impact écologique des matériaux, et leurs capacités structurelles – traction, compression, flexion, rigidité, résistance -, afin de déterminer précisément le moment à partir duquel le bois devient le matériau le plus intéressant sur un projet donné. Prenons l'exemple d'une passerelle sur un treillis de 50 mètres :

Fig. 527. Un diagramme CO₂ vs. sollicitation mécanique, extrait du mémoire de 2008. [3]



¹ Dans son ouvrage *Energie et Équité* (1975), Ivan Illich a défini le concept de vitesse généralisée : le rapport de la distance parcourue au temps que l'on met à la parcourir y compris le temps que l'on passe à se donner les moyens du déplacement. Avec un calcul pour l'automobile, Illich conclut à une vitesse moyenne de l'ordre de 7km/h.

² Et Jean-Pierre Dupuy, rôle rappelé par Olivier Rey.

vaut-il mieux travailler des membrures intégralement en acier, ou intégrer du bois dans la structure ? ». Cette réflexion peut d'ailleurs être étendue au-delà du triptyque béton/acier/bois, et s'appliquer à tous les matériaux – en particulier toute la gamme des matériaux biosourcés et géosourcés, du bambou à la terre en passant par le roseau, la pierre ou le typha. Autant de pistes qui trouveront tout leur intérêt dans les territoires ne disposant pas d'une importante ressource forestière, mais désireux de s'inscrire dans une démarche d'emploi de matériaux locaux et renouvelables. »¹

La base de comparaison entre bois, acier et béton révélait des hiérarchies mouvantes selon le type et l'importance de la sollicitation (Fig. 527). Nous verrons comment cette première conclusion fut déterminante sur le travail en cours autour des franchissements bas carbone (et plus généralement des infrastructures solaires urbaines) afin de positionner dans une structure le bon matériau au bon endroit dans un contexte géographique-époque déterminé. Les diagrammes d'Ashby sont aussi de précieux outils.

Impact carbone de Simone de Beauvoir

En 2017, Koliann Mam tachait donc de reconstruire la composition matérielle de Simone de Beauvoir, une détermination sur le tard des ingrédients composant ce « plat infrastructurel » [4] (Fig. 528). En se basant sur les plans et les documents disponibles, la passerelle sur la balance indiquait plus de 4500 tonnes. Traduits en émissions de CO₂, c'était près de 3560 tonnes. L'ouvrage avait coûté plus de 21 millions d'euros, elle valait plus de 5 euros au kilo et chaque euro investi dans la construction avait émis près de 170kg de CO₂. Sur la base des facteurs d'émissions monétaires typiques de la construction, ses émissions seraient deux fois plus élevées. Nous pouvons donc considérer la valeur de 3560 tonnes de CO₂ comme une valeur basse.

Impact énergie de Simone de Beauvoir

En énergie grise, la dette énergétique de l'ouvrage s'établissait à plus de 66 millions de mégajoules, soit plus de 18 millions de kWh nécessaires à sa construction. Amortis sur cent ans de vie, cela correspond à un flux moyen équivalent de 20kW, l'équivalent de deux-cents mètres-carrés d'emprise énergétique (avec un flux moyen parisien d'environ 120 watts par m²). Mais si l'on se figure un procédé de collecte courant de production renouvelable, disposant d'un rendement nominal de 5%, il faudrait alors une centrale de 3500 m², active pendant les cent mêmes années pour rembourser énergétiquement l'édification de la passerelle Simone de Beauvoir. Par coïncidence, cela correspond à peu près l'emprise en plan masse de l'ouvrage actuel. Pour que Simone de Beauvoir mute en PePos, passerelle à énergie positive, une option pourrait consister à la couvrir de panneaux solaires !

À quelle époque appartient le projet ?

À ce stade, si nous devons statuer sur l'ouvrage, la passerelle Simone de Beauvoir se situe dans une position duale. Architecture iconique d'un

Fig. 528. Extrémité de la passerelle Simone de Beauvoir



Fig. 529. Extrait du mémoire de Koliann Mam

Passerelle		Longueur	Portée principale	Masse Totale (t)	Part massique de la superstructure
Fournier	F	114 m	57 m	392,4	18%
ZAC Claude Bernard	CB	98 m	60 m	570,5	32%
Simone de Beauvoir	Si	304 m	194 m	4535,2	42%
Soissons	Soi	67 m	43	918,9	34%
St Brieuc	SB	92 m	55 m	1189,0	34%
Juvisy Mairie	JM	71 m	30 m	472,4	26%
Marignier	Ma	57 m	50 m	167,0	39%
Solférino	Sol	140 m	106 m	19020,0	5%
Millenium	Mi	333 m	144 m	15003,3	5%

¹ Extrait d'interview dans le cadre de Woodrise, 2017.

mandat de maire, mise en œuvre spectaculaire de géométrie et de matière, elle semble d'abord appartenir au temps IV. Elle souhaiterait appartenir au temps VII, en prétendant qu'elle favorise les modes doux et offrir ainsi une alternative désirable aux mobilités fossiles, mais nous verrons juste après que cette assertion est douteuse. Enfin, sa filiation high tech, la recherche de son élancement la fait appartenir au temps VI¹.

Un franchissement vraiment doux ?

Avec 270 mètres de portée, Koliann Mam a donc estimé rétrospectivement que le bilan carbone de sa construction a généré plus de 3000 tonnes de CO₂, en amont de sa mise en service [4]. Imaginons que cet ouvrage permette le franchissement doux de 3000 personnes par jour, soit environ 300 personnes par heure en journée. Une enquête plus fine mériterait d'être entreprise, mais le calcul qui suit mérite de fixer les ordres de grandeur. Le cumul annuel parcouru est donc d'environ 300 000 kilomètres, et sur cent ans, ce sont donc environ 30 millions de kilomètres, avec a priori aucune émission de gaz à effet de serre par les piétons et cyclistes empruntant l'ouvrage. Toutefois, si l'on considère l'amortissement de la construction en le rapportant à cet usage, les émissions de chacun promeneur est donc d'environ 100 grammes CO₂ par kilomètre, soit presque autant qu'une voiture thermique conventionnelle ! Ce calcul fait réfléchir, comme le calcul de la vitesse généralisée par Ivan Ilitch dans le cas de la vitesse moyenne en automobile.

Des structures vraiment légères ?

En délaissant le critère climatique, nous pourrions aussi nous interroger sur l'enjeu « matière ». De fait, quel est le chargement moyen d'une passerelle ? Pour Simone de Beauvoir, quelles masses supportent-elles généralement grâce aux 4500 tonnes la composant ? Selon les hypothèses de l'analyse précédente, 300 personnes par heure, cela fait cinq individus par minutes, qui franchiront cette passerelle en général en quatre minutes ; il y aura donc en moyenne vingt personnes simultanément sur la passerelle, et ainsi l'équivalent de 1,5 tonnes portées par les 4500 tonnes de l'ouvrage. D'un à trois cents : le rapport est gigantesque, hors de proportion. Les plus d'une tonne d'une automobile pour mouvoir un corps de 70 kilos semblent presque vertueux à côté : le facteur 20 remplace le ratio 300.

¹ Je garde en tête cependant l'entêtement de Feichtinger à opter pour des obélisques en rond plein plutôt qu'un tube d'un diamètre légèrement supérieur au prix d'un sur-masse considérable de ce composant de l'ouvrage.

Interrogations pour les franchissements du temps VII

Cette analyse pose question, et au-delà des qualités urbaines et esthétiques de ces infrastructures légères, des usages qu'elles engendrent, les enjeux écologiques (CO₂, matière et énergie) questionnent la réalité de la vertu de ces connections « dites douces ». Le piéton ou le cycliste empruntant la passerelle Simone de Beauvoir s'imagine-t-il émettre « implicitement » autant qu'un véhicule thermique (et il en est de même pour ceux utilisant la passerelle Solferino) ? À cette aune, il convient donc de proportionner l'investissement en carbone gris au regard de la réalité de l'usage et de sa pérennité dans le temps. Dans notre situation, il convient de tableer sur des « temps de retour carbone » extrêmement courts (et plus généralement écologiques) (chapitre #20).

Vers le facteur 4 des infrastructures

Faut-il renoncer à des services pour être compatible avec l'atterrissage climatique ? À quoi ressemblerait une passerelle Simon de Beauvoir dont le bilan énergie-matière-carbone serait sur chacun des champs divisés par quatre ou par cinq ? Cette quête sera développée dans la suite de ce chapitre. Il est possible que l'objectif de frugalité à une portée donnée soit intenable... Dans ce cas de figure, les alternatives pourraient tout autre : des navettes autonomes qui transporteraient les piétons d'une rive à une autre en empruntant un pont déjà existant ? Un *traghetto* parisien (Fig. 530), une noria de petites embarcations qui assureraient un flux de franchissement identique ? Des transports par câble au-dessus du fleuve ? La contrainte environnementale peut être source de créativité, d'alternatives ludiques et désirables !

Fig. 530. *Traghetto à Venise*



Energie et matière

Futures passerelles

La passerelle Simone de Beauvoir a ouvert la brèche pour une recherche au long cours. Le mémoire de Mam décrivait aussi une grammaire de géométrie et de mix matériauïque concourant à générer de nouvelles formes architecturales du franchissement et proposer ainsi des solutions constructives à l'horizon du bas carbone, y compris pour les infrastructures [4]. De fait, beaucoup de concepteurs ont exploré la question du franchissement léger¹, il semble aujourd'hui utile et nécessaire de refonder un paradigme de la légèreté écologique, parfois antithétique de la légèreté structurelle² comme nous venons de le voir. Le temps VII doit investiguer aussi les objets infrastructurels dont l'impact écologique questionne d'abord le projet de structure. Les infrastructures proposent un cadre de recherche plus

¹ Mélange d'architectes, architectes-ingénieurs ou ingénieurs : Conzett, Feichtinger, Mimram, Wilkinson Eyre, Samyn, Ney, Foster et ARUP, SBP, RFR, DVVD, Jean-Marc Weill etc.

² Sous-entendu volumique.

évident, avec moins d'enjeux physiques que le bâtiment classique, dont l'empreinte en usage complexifie la question.

Optimum de proportions

Dans mes carnets du quotidien, j'ai régulièrement effectué depuis une vingtaine d'années des petits calculs relatifs à la recherche d'optimum pour un projet de structure : quelles sont les proportions idéales entre une trame de structure primaire et secondaire par exemple ? Quelle est le rythme optimal d'un viaduc¹ ? Ces élucubrations exploitaient les corrélations pouvant être établies entre l'aire d'une section d'un matériau donné, et ses caractéristiques mécaniques, comme le module élastique de la section et son inertie mécanique.

Effet d'échelle

La particularité des structures est que plus la portée est importante, plus la quantité relative de matière augmente : la matière croît plus vite que la distance à franchir. Galilée avait déjà constaté le phénomène [10].

« Galilée affirme que le monde ne saurait être invariant par changement d'échelle. Le monde est « non linéaire », ce qui veut dire qu'en général les différentes grandeurs ne varient pas proportionnellement les unes par rapport aux autres. [...] Pensons, pour prendre un exemple très simple, aux géants qui apparaissent dans certains contes, dix fois plus grands qu'un homme ordinaire. Si toutes leurs dimensions sont décuplées, leur volume et leur poids sont multipliés par mille (un homme de 2 mètres et de 100 kilos devient un géant de 20 mètres et de 100 000 kilos). Il en résulte que les efforts qui s'exercent par unité de surface de la section d'un os comme le fémur, lorsque le géant est debout, sont multipliés par dix, et qu'au premier pas celui-ci se casse la jambe. »²

Plus tard, en 1917, dans *Forme et croissance*, d'Arcy Thomson s'attarde³ sur la stratégie de réduction de matière pour une poutre [2]. L'ingénieur cherche à économiser la matière, à alléger sa structure en enlevant la matière autour de la fibre neutre d'une poutre en flexion. Il justifie ainsi l'émergence des sections en I avec la concentration de la matière vers les semelles, les extrémités hautes et basses de la section. Annonceur du biomimétisme, d'Arcy Thomson rapproche la géométrie de l'ingénieur Warren de celle de l'os d'une aile de vautour⁴. Je décrirais plus longuement en annexe de ce mémoire les différentes corrélations mais nous pouvant au moins écrire que S , le stock construit croît au moins aussi vite que le carré de l'échelle de l'architecture considérée. Pour comprendre cet effet d'échelle, nous allons l'appliquer à une poutre simple en appui simple et soumise à des efforts de flexion. Nous considérerons que seule la résistance est dimensionnante pour cette première analyse.

L'hypothèse d'une relation entre section et module élastique

¹ Compétition entre la quantité de matière de la pile dimensionnée par le flambement et celle de la poutre en flexion entre les appuis successifs des piles.

² Olivier Rey, p159.

³ Dans le chapitre « Forme et résistance », p230.

⁴ p238

Nous prenons l'hypothèse d'une proportionnalité sous forme de loi puissance entre l'aire A de la section d'un élément de structure et W , son module élastique en flexion.

$$\text{Eq 26. } A \propto W^\alpha$$

Dans le cas du bois, on peut montrer que pour une section rectangulaire de hauteur b et de largeur d , et avec une proportion communément comprise entre 1 et 7, on a lors :

$$\text{Eq 27. } \alpha = 2/3$$

Dans le cas de l'acier, en effectuant une régression sur les catalogues de profilés courants, en particulier pour les IPE (Fig. 531), IPN et HEA, on obtient alors :

$$\text{Eq 28. } 0,55 < \alpha < 0,65$$

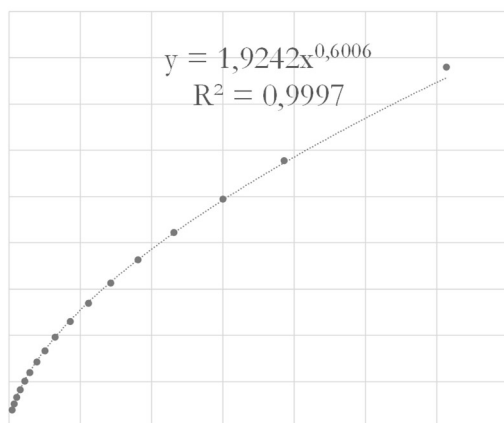


Fig. 531. *Corrélations entre aire d'une section et son module élastique de flexion pour des profils IPE compris entre 80 à 360.*

Relation pour appui ponctuel

Le module élastique de la section est directement associé au moment fléchissant d'une poutre selon la relation :

$$\text{Eq 29. } W \propto M \propto FL$$

$$\text{Eq 30. } W \propto \frac{1}{\sigma} FL$$

À partir de Eq 26, on en déduit que la quantité de matière S est dans le cadre d'une sollicitation ponctuelle soumise à la loi d'échelle suivante, pour une charge F indépendante de l'échelle :

$$\text{Eq 31. } S \propto F^\alpha L^{\alpha+1}$$

Relation pour charge continue

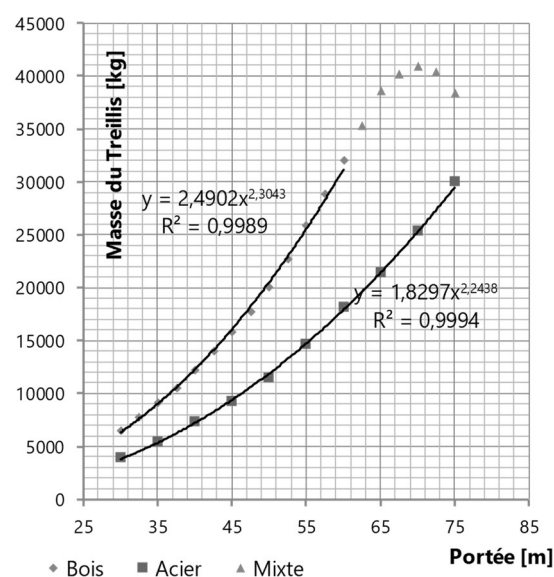
Dans le cas d'une charge continue, on déduit que la quantité de matière S croît de la façon suivante :

$$\text{Eq 32. } S \propto p^\alpha L^{2\alpha+1}$$

Pour les valeurs d'alpha vues précédemment, on comprend que la quantité de matière croît plus rapidement que le carré de la portée caractéristique L . En première approximation, on considérera que le stock construit croît *a minima* selon le carré des dimensions de l'objet (Fig. 532).

$$\text{Eq 33. } S \propto L^2$$

Fig. 532. Extrait de l'étude de Mam et étude de cas du poids d'un treillis Warren en fonction de la portée et pour plusieurs matériaux. Des masses qui évoluent plus rapidement que le carré de la portée.



Cette relation interroge comme nous l'avons vu la bonne échelle des infrastructures, voire leur légitimité environnementale, vu le coût écologique de la grande taille. Il y a évidemment un champ à réexplorer quant à la redécouverte des matières biosourcées pour les ouvrages d'art [11].

Les tentatives de mariage entre passerelles et production énergétique

Comme suggéré précédemment avec l'emprise spatiale nécessaire au remboursement énergétique » de la dette constructive de Simone de Beauvoir, la perspective de rendre les infrastructures « positives » s'est révélée dans plusieurs de mes projets, dont évidemment Wind-it (chapitre #26). À l'échelle du franchissement et dans le cadre d'une consultation en 2008 à Venlo, aux Pays-Bas, nous proposons une passerelle en symbiose avec son site. Notre analyse de site révélait un vent perpendiculaire au franchissement. Pour protéger les passants des vents dominants, neuf éoliennes sont installées en aval pour ralentir le flux d'air. Elles devraient autoriser une puissance nominale d'une dizaine de kilowatts, sans doute de quoi alimenter l'éclairage à proximité du site ou éclairer le quartier (Fig. 533). De façon plus générale, figurons-nous un franchissement qui intégrerait des énergies renouvelables sur sa longueur : des éoliennes comme dans l'exemple de Venlo (Elioth, 2008), ou par exemple des panneaux solaires couvrant le franchissement¹. En reprenant l'équation de bilan sur la durée de vie :

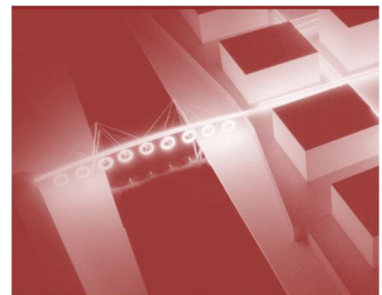
$$\text{Eq 34.} \quad B = f \cdot T + S$$

Elle se déclinerait alors de la façon suivante en reprenant le terme précédent (Eq 33). Ainsi donc, au-delà d'une certaine portée, il semblerait difficile que le franchissement puisse rembourser sa construction, l'équation ci-dessous possédant un minimum à une certaine dimension.

$$\text{Eq 35.} \quad B \propto -\alpha L + L^2$$

*

Fig. 533. *Passerelle à Venlo*



¹ Exemple du pont de Blackfriars à Londres

Bibliographie

1. BARDSLEY H., MENARD R., CONSIGNY F., VAUDEVILLE B., *The Bercy-Tolbiac Footbridge in Paris*, Footbridge 2002, Paris
2. THOMPSON D'Arcy, *On Growth and Form* (en français *Forme et Croissance*), 1917
3. ARMAS Fernandez Armas Marcos, *Dimensionnement environnemental des structures, mémoire de projet de fin d'études*, École National des Ponts et Chaussées, 2008
4. MAM Koliann, *Franchissement « Bas-Carbone », Dimensionnement Environnemental des passerelles*, mémoire de projet de fin d'études chez Elioth, École des Ponts ParisTech, 2017
5. THOMPSON D'Arcy, *On Growth and Form* (en français *Forme et Croissance*), 1917
6. SAMYN Philippe, *Étude de la morphologie des structures, à l'aide des indicateurs de volume et de déplacement*, Académie royale de Belgique, 2004
7. SCHLAICH Jörg, BERGERMANN Rudolf, *Leicht WeIt, light structures*, Prestel Verlag, 2005
8. MUTTONI Aurelio, *L'art des structures*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2004
9. ASHBY Michael F., *Materials Selection in Mechanical Design*, third edition, Butterworth-Heinemann, 2005 (première édition 1992)
10. REY Olivier, *Une question de taille*, Stock, 2014
11. LE ROY Robert, « Quelles améliorations environnementales pour le bois? », *Revue Malaquais n°5*, Actes Sud, septembre 2017

Fig. 534. Chronogramme de la passerelle Simone de Beauvoir

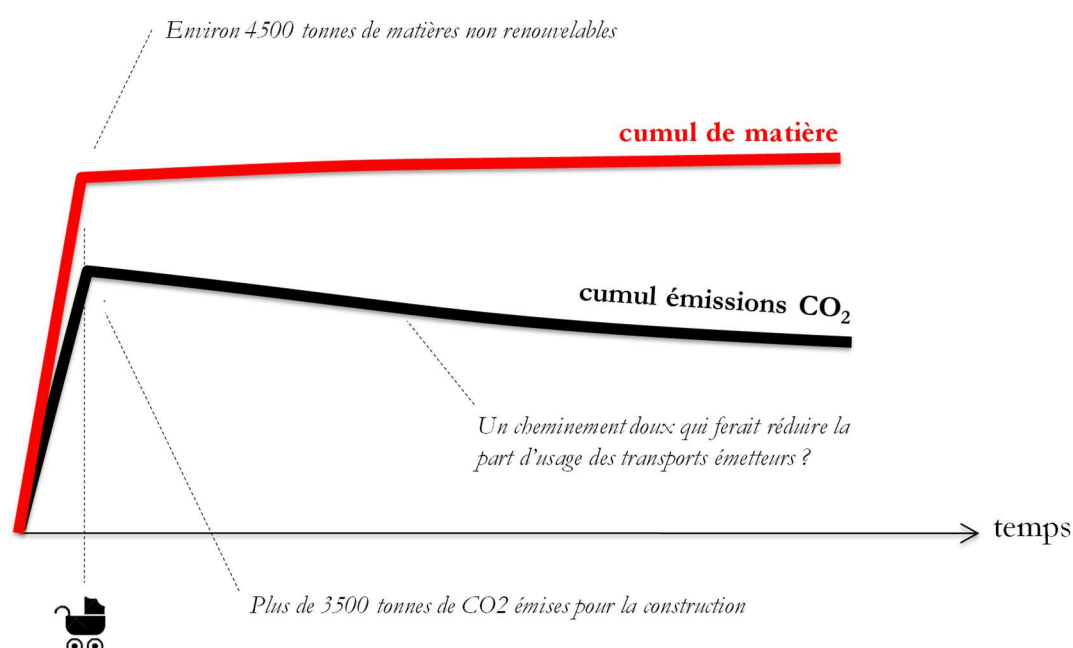
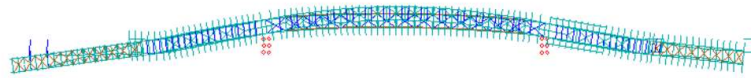


Fig. 535. *Extrait d'analyses dynamiques, RFR*

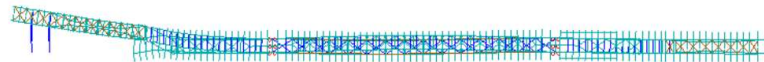
Scale: 1:1247.
Deformation magnification: 12.50
Case: A1
A1, mode 1, Frequency: 0.4205 Hz



Scale: 1:1247.
Deformation magnification: 12.50
Case: A2
A2, mode 2, Frequency: 0.6798 Hz



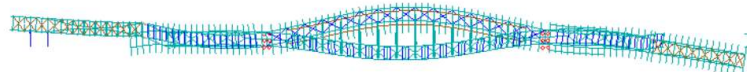
Scale: 1:1247.
Deformation magnification: 12.50
Case: A3
A3, mode 3, Frequency: 0.8098 Hz



Scale: 1:1247.
Deformation magnification: 12.50
Case: A4
A4, mode 4, Frequency: 1.029 Hz



Scale: 1:1247.
Deformation magnification: 25.00
Case: A5
A5, mode 5, Frequency: 1.097 Hz



Scale: 1:1247.
Deformation magnification: 12.50
Case: A6
A6, mode 6, Frequency: 1.345 Hz

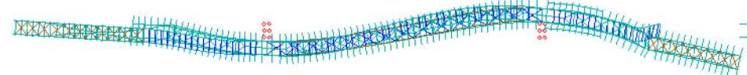
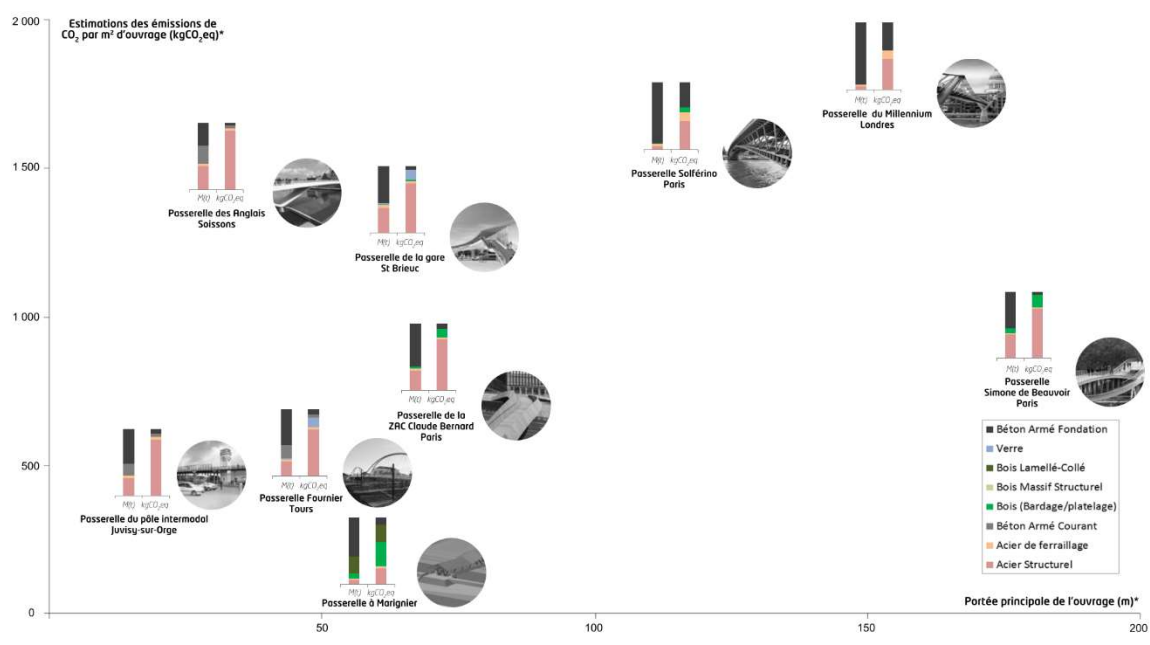


Fig. 536. Estimation et corrélation des émissions induites par la construction de quelques références de passerelles. Étude de Mam, mise en forme 169/Elioth.



#25 Les Montagnes Solaires

Première invention développée chez Elioth en 2005. Un principe simple. Une serre de grande échelle située en pied de montagne réchauffe de grandes quantités d'air qui monte dans une haute cheminée en s'appuyant sur la pente de la montagne. Le débit d'air accéléré est assez rapide pour actionner des turbines et produire de l'électricité. Les montagnes solaires peuvent être utilisées pour différents usages : agriculture, production photovoltaïque...

Le récit d'un échec

En quelques mots

Lancées aux débuts d'Elioth en 2005, les montagnes solaires ont initié et caractérisé l'appétence du bureau à l'invention. Premier projet prospectif démarré avec l'intuition que la recherche pouvait être un outil puissant de cohésion d'une équipe, les montagnes solaires démarraient un cycle d'explorations, à la frontière entre énergies renouvelables et architecture, matières et paysages. L'inspiration originelle venait de la qualité des projets de SBP et des travaux parallèles, chers à Jörg Schlaich, sur l'énergie solaire [1] et plus particulièrement ses recherches autour des cheminées solaires : une géométrie simple, une mise en œuvre savante de la matière permettant la production d'électricité [2]. Rétrospectivement, cette fascination était sans doute celle de l'évidence du lien entre énergie et matière que cette architecture énergétique révélait. La physique à l'œuvre supposait que les cheminées solaires étaient d'autant plus efficaces qu'elles étaient hautes. Il fallait réaliser cet exploit avec le minimum de matière pour ne pas grever le coût d'investissement et donc le coût de production de l'électricité ainsi produite¹. Sans le savoir, l'intention des montagnes solaires (Fig. 538) consistait à faire migrer les cheminées solaires, architecture du temps V (chapitre #16) vers des structures du temps VII (#18), les montagnes solaires !

Fig. 537. *Croquis initial*

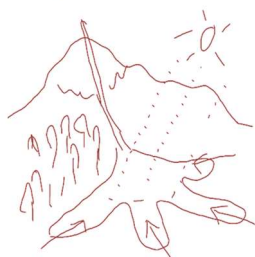


Fig. 538. *Un prototype de montagne solaire au Chili*

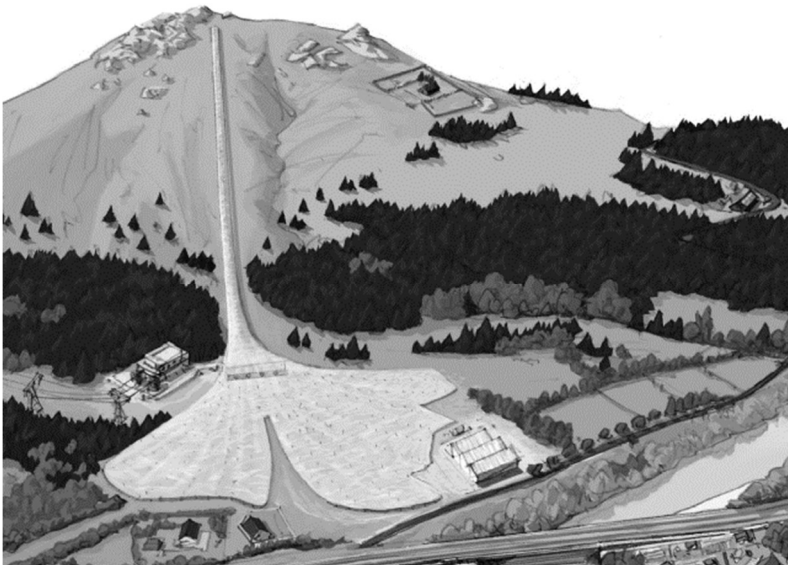


¹ Le LEC des cheminées solaires compare la performance énergétique à une quantité de matière et cela fixe en quelque sorte un programme d'architecture, un « coût d'objectif » de design très simple : beaucoup de surface pour pas cher, un grand tube très économique. Se reporter au chapitre « L'approche globale » pour une définition du LEC.

Le contexte en 2005

Relocaliser la production d'énergie dans les zones montagneuses

Il y a presque quinze ans, ces technologies jumelles partaient du postulat que les défis énergétiques ne pouvaient être surmontés par la généralisation de solutions standards (chapitre #8). La prise en considération des spécificités de chaque site pouvait révéler des ressources potentielles tandis que le coût écologique et économique de la centralisation de la production électrique et de son transport¹ étaient de moins en moins soutenables (Fig. 540). L'idée consistait donc à relocaliser l'énergie, afin d'éviter des coûts de distribution et permettre aussi d'associer les sources d'énergie propres au développement des communautés locales. Cette logique reste plus que jamais d'actualité, nous le verrons aussi dans le cadre du projet Wind-it et des enjeux de l'électrification rurale (chapitre #26). Les zones montagneuses sont les frontières où le développement économique se heurte fréquemment au coût de l'énergie et où les problématiques d'électrification sont prégnantes (Fig. 539). En 2005, peu de temps avant l'envolée des cours du brut au début des années 2000, cette situation ne pouvait qu'empirer.



Présentation de l'idée en interne

C'était selon ce « pitch » introductif que l'équipe d'Elioth fut embarquée en 2005. Les patrons de l'époque² étaient séduits aussi. Cette initiative se nomma d'ailleurs au départ le « projet Elioth » avec l'idée de confondre l'innovation avec un projet de micro-entreprise, afin aussi de créer une

¹ Prémices d'inspiration pour la première fonction de Wind-it.

² Elioth était à ce moment une entité du groupe OTH qui plus tard deviendra Iosis, avant de rejoindre le giron du groupe Egis.

Fig. 539. *Le croquis effectué au Havre à proximité du volcan de Niemeyer.*

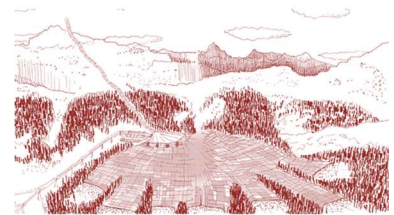


Fig. 540. *La technologie des Montagnes Solaires est propre, accessible et fiable. Elle peut également être combinée avec des activités complémentaires telles que l'agriculture ou la production photovoltaïque (Elioth)*

identité particulière. En 2006, je montais un dossier d'avance remboursable auprès d'Oséo qui fut accepté. Elioth pouvait alors investir en R&D, comme entamer des démarches de prospects potentiels.

Le développement du concept

Ce soutien institutionnel permit en particulier de faire un petit film et assez vite les montagnes solaires, le « projet Elioth » eut quelques articles dans la presse : *Le Moniteur*, *Sciences & Vie*, *Le Monde*... Je garde un mauvais souvenir concernant cette dernière coupure de presse, la journaliste ayant joyeusement emmêlé puissance et énergie, coquille parfois fatale pour décrédibiliser une énergie renouvelable innovante ! L'aide permit évidemment de développer quantités d'études tant techniques que financières au cours de ces années. En 2008, nous décidions aussi de concevoir et de faire fabriquer un démonstrateur¹ de 100 m² (Fig. 542).

Quelques rencontres et une grosse surprise

Le monde de la propriété intellectuelle

Les montagnes solaires furent aussi le premier brevet déposé [5] (Fig. 541) avant quelques autres pour *Wind-it* (chapitre #26). Ce fut la découverte du monde de la propriété intellectuelle, avec sa langue et son impressionnante logique administrative. Je constatais que le temps consacré à des fins de défense de l'idée pouvait être impressionnant. Le futur révélera la faible utilité de cet investissement pour la montagne solaire érigée au Chili à notre insu, ce dernier pays ne faisant pas partie des pays signataires d'un accord global sur la propriété intellectuelle.

« Équipement pour produire de l'énergie électrique ou mécanique. L'invention concerne le domaine de la production d'énergie électrique ou mécanique. L'invention concerne plus particulièrement un équipement destiné à produire de l'énergie électrique ou mécanique à partir du flux solaire et dont le fonctionnement repose sur celui des tours solaires. Les tours solaires exploitent deux phénomènes naturels, l'objectif étant de créer un vent solaire : l'effet de serre d'une part, et la convection naturelle d'autre part. Pour ce faire, elles comprennent un collecteur équipé d'une cheminée verticale destinée à l'évacuation de l'air collecté par ledit collecteur. [...] » [5]

Tenter de faire décoller l'idée

Les sollicitations générées par les montagnes solaires entre 2006 et jusqu'au début des années 2010 furent impressionnantes. De façon non exhaustive, la liste ci-dessous synthétise la diversité des prises de contact : déplacement sur l'île de la Réunion pour présentation de l'innovation à la région ; rencontre avec des énergéticiens péruviens ; participation à Rome 2007 ; participation aux grands prix de l'Ingénierie² ; rencontre avec la

¹ Jean-Sébastien Lagrange pour la fabrication du démonstrateur dans les ateliers de l'ENSCI.

² Dont admissibilité en 2008

Fig. 541. 2006, Brevet pour les Montagnes solaires. Titre du brevet : « Équipement pour produire de l'énergie électrique ou mécanique. ». Inventeur : Ménard R.

R&D de *Abengoa* à Séville en octobre 2008¹ ; relation avec entreprise franco-turque *Euroequipments* ; échanges avec *Campo 3*, entreprise espagnole participant au projet de tour solaire à Fuente-el-Fresno (deux rencontres) ; « tests sur l'offre » par les missions économiques (Pérou, Chili, Maroc, Espagne et Turquie) avec *Ubifrance* ; mise en place d'un partenariat avec *Novnum*, industriel allemand de l'ETFE avec déplacement en Allemagne ; rencontre avec entreprises marocaines pour démonstrateurs dans l'Atlas ; contacts en Argentine pour transmission auprès des énergéticiens ; rencontre avec *Ashok Venture* pour développement dans le nord de l'Inde etc.

« [...] Vous représentez une institution locale ou nationale ? Une Montagne Solaire vous ouvrirait la possibilité de donner un élan considérable à une communauté, en même temps qu'elle marquerait la réputation de votre territoire à l'échelle internationale. Vous représentez une ONG ou une fondation privée centrée sur le développement énergétique local, localisée dans une région favorable ? Une Montagne Solaire vous permettrait de marquer votre différence pour disposer d'aides d'organisations locales, nationales et internationales. Votre compagnie est innovante, prête à prendre part à un projet environnemental au service du développement durable ? [...] Cette carte du monde superpose les niveaux d'ensoleillement et le relief des principales chaînes de montagnes pour localiser les régions pour lesquelles les Montagnes Solaires représentent la meilleure opportunité. Les Andes, l'Afrique du Nord et de l'Ouest, le Moyen-Orient sont à ce titre des régions au potentiel élevé. [...]»²



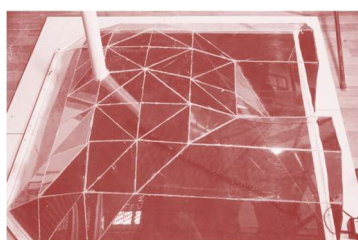
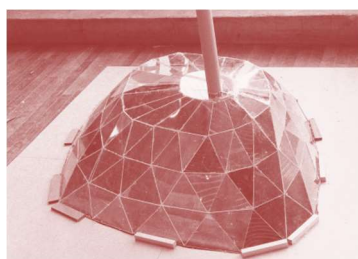
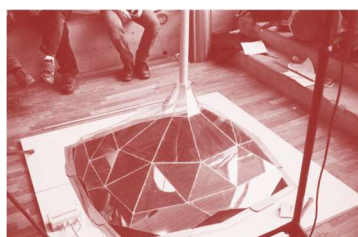
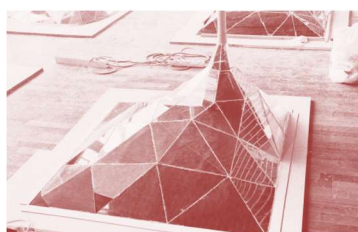
Fig. 542. Les images du démonstrateur de 100m² et son montage avec l'équipe d'Elioth à Marolles-en-Brie en 2008. Abaque de dimensionnement. Fiche d'identité du démonstrateur

Démonstrateur Montagne Solaire	
Listé	*
Bureau	Elioth
Lieu	Marolles-en-Brie
Rôle	Archi *
	Ingg *
Phase	Etudes *
	Travaux *
Type	IV.3
	V
	VI
	VII *
Temps	Début 2006
	Fin
	Livraison 2006
Q	1
Volume	m ³ 30
Energies	Solaire thermodynamique
Matières	Tissus divers, éléments plastiques
Composition	Acier kg -
	Verre kg -
	Bois kg -
	Béton kg -
	Autres kg 5E+01
	Masse unitaire kg 5.0E+01

¹ Moment de cette visite marquante de PS10, tour solaire d'un champ à concentration.

² Extrait d'une plaquette de présentation des montagnes solaires.

Fig. 543. *Des tours solaires aux ateliers design. Quelques maquettes fonctionnelles par les étudiants, comprenant la mesure du tirage thermique.*



L'implémentation pédagogique

En parallèle du temps consacré à tenter de faire décoller l'initiative, je déclinais les apprentissages potentiels de ces architectures comme exercice pédagogique. Avec mon acolyte Maurizio Brocato¹, nous proposâmes deux années consécutives de faire travailler les élèves sur les cheminées solaires au cours des semaines intensives d'atelier design entre les étudiants architectes, ingénieurs et designers (Fig. 543). En 2007, je pris l'initiative de tenter une invitation auprès de de Jörg Schlaich :

« Date: 2007/1/27 | Subject: Workshop on solar chimneys in Paris | Dear Pr Schlaich, Maurizio Brocato and I are leading a workshop between the ENPC (www.enpc.fr), French engineering school you should know, and the school of architecture of Marne la Vallée (<http://www.marnela-vallee.archi.fr/>). The topic of this one-week workshop concerns solar chimney + structural design of a glassroof. As engineer and architect, I'm personally involved into solar chimney concept and I'm leading in my firm an adaptation of the concept consisting of solar mountain². This seminar will occur in beginning of march 2007. This seminar aims to learn teamworking especially between engineer & architecture students. The idea consists in approaching new theoretical concepts & manufacturing a model for the end of the seminar week. [...] It could be very interesting if you could come during this week particularly if you could make a lecture on solar chimney for the 40 students. [...]. Best regards, Raphael Menard »

Une dizaine de jours plus tard, la réponse était malheureusement négative.

« Envoyé : vendredi 9 février 2007 17:27 | Objet : Workshop on solar chimneys in Paris | Dear Raphael Menard, Thank you for your mail and invitation to your workshop beginning of March 2007. I was very happy to receive it and to learn about your interest in the Solar Chimney and spontaneously thought I should accept your invitation, but I am very sorry to tell you and I ask for your understanding that when checking my schedule, I had to come to the result that I am simply unable to accommodate it. I very much hope for your understanding and wish you a fruitful workshop. In case there should finally be something in writing I would be happy to receive it. Best regards, Yours Joerg Schlaich »

2009, découverte d'un prototype au Chili

Cet échange de 2007 est intéressant car nous verrons comment il resurgit deux ans plus tard. Le plaisir avec les projets prospectifs, tels que les montagnes solaires, Wind-it (chapitre #26), la table climatique (chapitre #28) ou d'autres, est que ces projets sont de magnifiques prétextes à rencontres. Certaines prises de contact sont des *spams* d'inventeurs, d'autres de déve-

¹ Professeur à l'école des Ponts Paristech et directeur du laboratoire Géométrie Structure et Architecture à l'École de Paris Malaquais. Compagnon de route pendant près de dix ans dans le cadre des ateliers design. Participe également à Reforme, programme de recherche *Ignis Mutat Res*.

² www.elioth.com & video on <http://www.youtube.com/watch?v=F863B5fNB-k>

loppeurs en tout genre venant picorer de l'information auprès de l'hameçon de votre innovation, des courriels d'étudiants désireux d'effectuer le projet de fin d'études sur votre projet etc. C'est ainsi que nous recevions en 2009 un long courriel, rédigé en espagnol, dont une partie du contenu pointait vers un blog chilien. En ouvrant le lien, nous découvrîmes les photos d'un prototype de montagne solaire au Chili déjà réalisé par le Fondev (équivalent de l'Ademe au Chili) et dont les ingénieurs n'étaient autres que SBP et Jörg Schlaich¹ (Fig. 544) ! Nous tentâmes -avec délicatesse- de faire reconnaître notre droit mais cela fut sans succès, y compris après l'envoi d'un courrier à Stuttgart chez SBP. À partir de cette date, telle la statue de Lénine déboulonnée dans le *Regard d'Ulysse*, ma statuette mentale dédiée à Jörg fut poussée vers le recyclage.

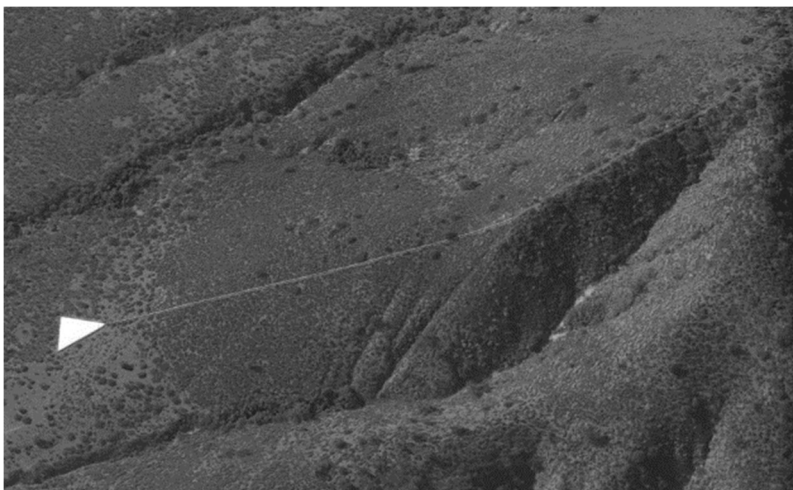


Fig. 544. *Le prototype au Chili*

Un constat d'échec

2011, formalisation de l'échec commercial

En 2011, après près de cinq ans de recherches, nous ne pouvions que constater l'échec du développement du projet. Les montagnes solaires n'avaient donné lieu à aucune commande et à aucune activité pour Elioth. Les raisons étaient multiples et la difficulté de montage du projet était liée notamment à la pluralité des enjeux :

- L'emprise foncière : les montagnes solaires réclament une surface importante de territoire et le projet suppose donc une adhésion par les pouvoirs politiques.
- Aux industriels et fabricants : la logique de réalisation des montagnes solaires insiste sur la participation du tissu local des entrepreneurs et fabricants (dimension sociale) et réclame pour chaque site une analyse au cas par cas.
- L'absence de politique de garantie de rachat sur ce type technologique²

¹ Vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=MHBI21A1bx0>

² Cheminée solaire et/ou montagne solaire

- Un prototype qui réclame surface importante.
- Des projets de tours solaires qui avaient le vent en poupe au moment du dépôt du projet¹ mais qui ont ensuite disparu.
- Un rapport prix/performances en perte de compétitivité du fait de la chute rapide des autres capacités renouvelables comme le photovoltaïque et l'éolien (en particulier en comparaison des LEC – voir chapitre #20 - des autres énergies renouvelables, Fig. 545).

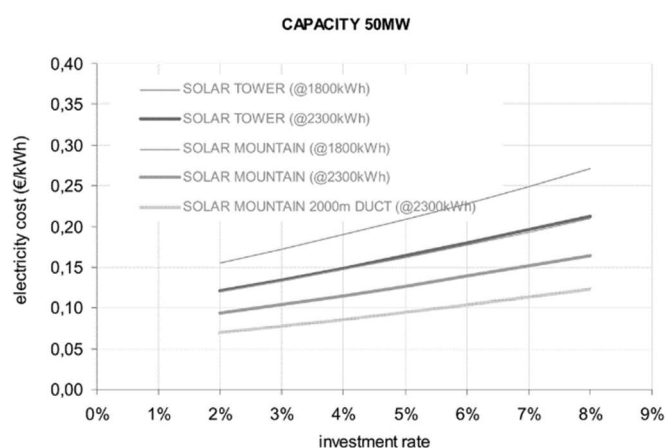
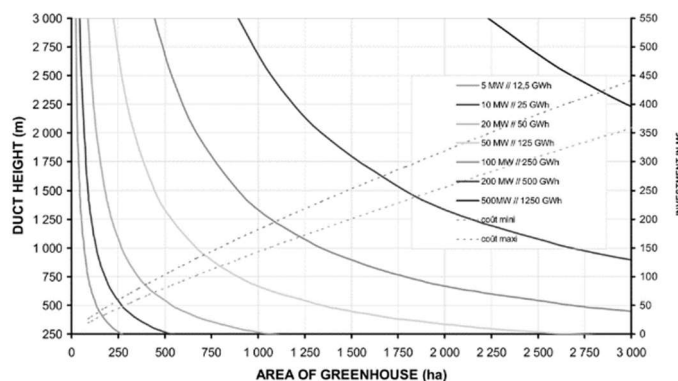


Fig. 545. *Abaques dimensionnels des montagnes solaires et comparaison avec les tours solaires.*



Mais quelques enseignements néanmoins

Le début de l'interdisciplinarité

Ce projet intéressant fut évidemment passionnant par sa capacité à forger un ADN interdisciplinaire chez Elioth, d'offrir l'espace aux capacités inventives et de développer une vraie culture des énergies renouvelables et comprendre les écueils à éviter pour percoler un marché. L'essor de Wind-it (chapitre #26) a tiré quelques enseignements de cet échec, en comprenant à temps la nécessité de changer de destination en 2013-2014. Les montagnes solaires ont permis aussi de tirer tous les enseignements de

¹ Tour de 200MW en Australie et tour de 40MW en Espagne

la convection solaire forcée pour savoir mieux l'appliquer à échelle plus modeste pour le bâtiment comme dans le cas des études d'avant-projet pour le tirage thermique forcé des bureaux N20 à Bordeaux avec ANMA.

La question foncière et la place des énergies de flux

Le rendement surfacique très faible des cheminées et montagnes solaires caricaturent la question territoriale sous-jacente aux énergies renouvelables et posent la problématique de la dilution spatiale et du mode d'occupation des sols. L'irruption inattendue de la très grande compétitivité du photovoltaïque montre aussi l'instabilité intrinsèque de ce type d'innovation, très sensible à l'environnement et à la compétition des espèces énergétiques qui a court. Nous n'avions pas vu que les courbes se croiseraient si tôt bien que les montagnes solaires proposaient aussi de mutualiser leurs productions.

Synthèse énergie-matière

Energie

Principe physique

Cette partie investigate les questions relatives à l'échelle de ces gigantesques installations que sont les cheminées et les montagnes solaires. Elles sont toutes deux une espèce particulière dans la grande famille des énergies solaires. Son principe est simple : une serre de grande dimension est située au pied d'une montagne réchauffée de grandes quantités d'air. Cet air chaud monte ensuite dans une haute cheminée appuyée sur la pente de la montagne. Le débit d'air est accéléré dans la cheminée, suffisamment pour actionner des turbines et produire de l'électricité. Les montagnes solaires s'appuient sur les connaissances recueillies sur les tours solaires (Fig. 546). Cette technologie utilise le même principe physique : une grande serre permet de chauffer de grandes quantités d'air, l'air chaud est aspiré par tirage thermique dans une tour creuse et déclenche un flux d'air continu ce qui met en mouvement une turbine située à la base de la tour.

Fig. 546. *La tour solaire à Manzanares, Espagne (construite en 1982, SBP)*



Fig. 547. La surface de la serre peut être progressivement étendue pour faire face à de nouveaux besoins. La forme de la serre est liée à la fois à la topographie du lieu et aux contraintes du site (Elioth)

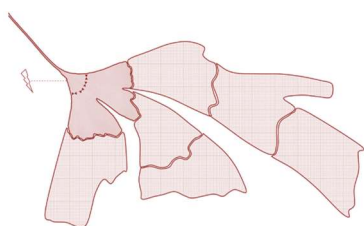
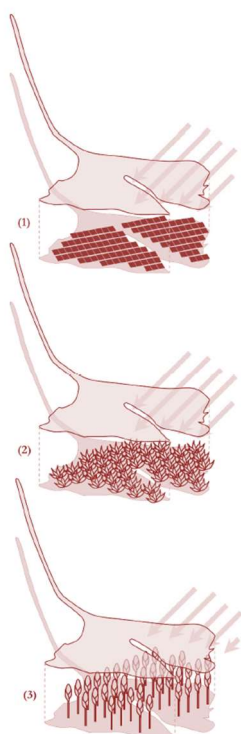


Fig. 548. Combinaison possible des productions



La course à la hauteur

Le concept de tours solaires a été proposé en 1903 par l'espagnol Isidoro Coronel Cabanyes et les premières représentations de cette technologie ont été faites par Hans Günther en 1931. Le bureau d'études SBP a conçu en 1982 un prototype de 200 mètres de hauteur à Manzanares (Fig. 546), en Andalousie, dont la puissance nominale était de 50 kW_e avec une serre de 46 000 m² au sol [1]. Cette usine a été exploitée environ huit années avant d'être démantelée en 1989. Elle a permis de déterminer que la rentabilité énergétique de ce type de projet est atteinte pour une tour de 1 km de haut¹. La construction d'une telle tour reste coûteuse et consommatrice de temps pour le montage de la cheminée et ne convient guère aux zones sismiques ou les lieux où de telles capacités de construction ne sont pas disponibles.

Amortissement de la production

Contrairement à beaucoup d'autres, les montagnes solaires sont peu sensibles au cycle jour-nuit. En effet, l'utilisation de tampons thermiques², qui participent à la structure elle-même, permet de capturer la chaleur pendant le jour et de la restituer la nuit pour lisser la production et de profiter de la disponibilité des ressources en continu. De cette façon, les montagnes solaires sont des générateurs d'électricité solaire dont les batteries naturelles font proprement partie et participent à fiabiliser la production énergétique.

Autoriser les combinaisons d'usages

Grâce à des tampons thermiques, les montagnes solaires sont une source d'énergie fiable. De plus, le champ sous la verrière du collecteur est praticable et la couverture ne filtre qu'une partie des rayons du soleil, autorisant les stratégies de cogénération. Pour augmenter la production électrique, des champs photovoltaïques supplémentaires peuvent être posés sous la serre pour augmenter la production quotidienne (1). Des plantes à croissance rapide peuvent être cultivées dans cet espace pour une production de biomasse (2). La montagne solaire est aussi utilisable pour l'agriculture, dans la limite des ressources en eau disponibles³ (3) (Fig. 548).

Des barrages, à l'envers

Cheminées solaires et montagnes solaires sont des barrages : elles fonctionnent de la même manière que leurs cousins hydrauliques, mais à l'envers et avec de l'air. Le volume d'air compris sous la serre en partie basse s'échauffe, l'air est alors plus léger et la cheminée génère le tirage thermique. De façon semblable à un grand barrage, le productible annuel est gouvernée par le produit $\varphi.A.H$ où φ est l'irradiation solaire horizontale

¹ Un projet à l'étude prévoyait une centrale de 200 MW en Australie avec une tour de 900m à 1000m de hauteur. D'autres études de faisabilité étaient en cours en Espagne et en Namibie au début des années 2000.

² Sacs de roches, réservoirs d'eau ou du sable

³ La surface de la serre peut aussi servir comme collecteur d'eau de pluie et de condensation

annuelle¹, A , la surface de la serre ou du collecteur solaire² et H , la hauteur de « chute » de l'air plus léger ! Les tours ou montagnes solaires réalisent ainsi une concentration locale de la convection naturelle, bien connue le long de nos reliefs avec les ascendances thermiques³.

$$\text{Eq 36. } f \propto -\phi HS$$

Notons que la valeur de rendement typique est en général très faible, fonction du dénivelé, et inférieur à 1% même pour une hauteur de chute de 1000 mètres.

Matières

Le principe des montagnes solaires : économiser la matière

Le point d'entrée original des montagnes solaires consiste à économiser la matière. Comme nous l'avons vu, le rendement énergétique est directement corrélé à la hauteur. Cette nécessité a un coût et des contraintes de mise en œuvre⁴ associées. Pourquoi dépenser de larges efforts pour construire une tour de grande hauteur alors que les montagnes fournissent un support surélevé ? Le concept est pensé selon cette opportunité naturelle. Le collecteur à effet de serre est situé en aval et favorablement exposé sur le versant sud du massif. La cheminée vient s'appuyer sur le flanc de la montagne pour accéder facilement aux plus grands dénivelés. Cette nouvelle approche permet à la cheminée d'atteindre une altitude plus élevée avec moins d'efforts. Les montagnes solaires apparaissent donc comme évolution efficace et moins coûteuse que la tour solaire.

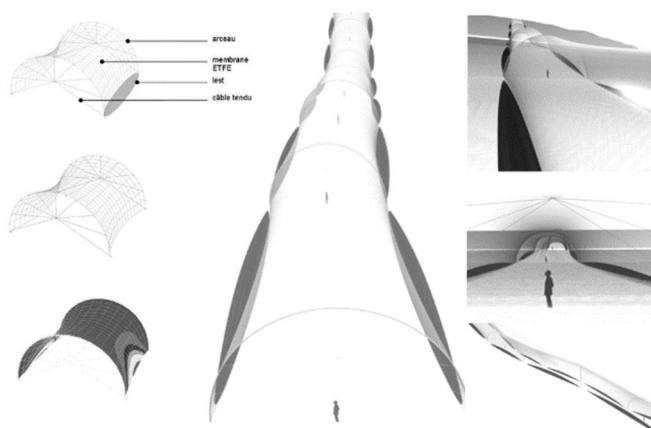


Fig. 549. *Modélisation de l'apport annuel en l'énergie solaire (Elioth) : comparaison entre une tour solaire à tirage thermique (à gauche) et une montagne solaire (à droite). Vue 3D du conduit.*

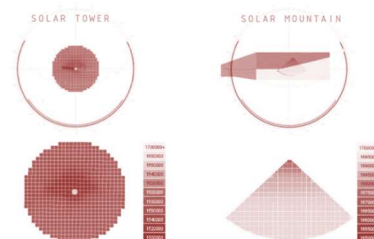


Fig. 550. *Étude constructive pour la cheminée de la montagne solaire*

¹ L'équivalent de la pluviométrie pour le barrage hydraulique

² L'équivalent du bassin versant hydraulique

³ La démonstration de cette loi de proportionnalité au premier ordre n'est pas très compliquée à établir en mixant la loi des gaz parfait avec une égalité énergétique.

⁴ Délai de construction, difficulté technologique de mise au point, comportement aux séismes et tempêtes etc.

Fig. 551. *Étude CFD sur la forme de la jonction entre serre et conduit. Le stockage thermique sert de tampon pour la production d'électricité*

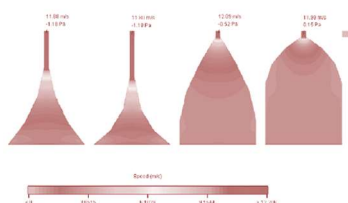
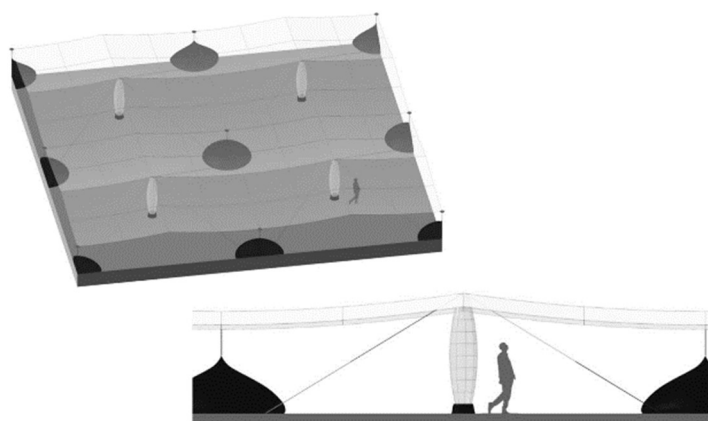


Fig. 552. *Schéma statique pour une section de serre. Modèle structurel pour porter une simple feuille en ETFE*



Une architecture qui anticipe sa déconstruction

Le projet des montagnes solaires initiait aussi une réflexion sur la durée de vie et l'obsolescence de l'infrastructure énergétique. Les documents commerciaux énonçaient : « *Le projet est également novateur par sa modestie : quand l'humanité découvrira une source d'énergie propre et efficace, les Montagnes Solaires seront démontées facilement, ne laisseront pas de cicatrice sur les paysages et seront facilement recyclées du fait de leur méthode de construction.* »

Le collecteur

Emprise physique la plus importante, la serre-collecteur réclamait une réflexion dédiée. La structure du collecteur des montagnes solaires pouvait être appuyée sur des fondations légères. Le principe était que l'installation ou le démantèlement d'une montagne solaire ne nécessitait ni camions ni routes : les éléments pouvaient être transportés dans des sacs à dos. L'ambition était de dessiner la « serre minimale » avec à la clé des recherches importantes sur les matériaux transparents : coût, entretien, transmission énergétique, ... Le choix s'oriente préférentiellement vers l'ETFE (Fig. 552).

La cheminée

La cheminée de la tour solaire peut s'élever verticalement dans le paysage, jusqu'à 1000m. Cette position nécessite de grands efforts structuraux afin de faire face aux forces des vents ou en cas de séismes. À l'inverse, les montagnes solaires s'appuient sur le flanc des montagnes. De ce fait elles subissent peu les forces du vent ou les séismes. D'un point de vue purement structurel, ce n'est ni plus ni moins qu'un tube rigide fixé au sol (Fig. 550).

Stock construit d'une cheminée solaire

Dans le cas d'une cheminée solaire, on peut considérer que la dette constructive, autrement dit que les externalités écologiques induites par l'édification¹ sont en première approche gouvernées par une relation du

¹ Énergie grise, carbone gris etc.

type équivalente à celle d'une poutre encastrée en pied (en extrapolant le résultat vu au chapitre #24 et Eq 33) :

$$\text{Eq 37. } S_{\text{cheminée solaire}} \propto H^2 + \alpha S$$

Stock pour une montagne solaire

Dans le cas d'une montagne solaire, la cheminée est posée le long de la montagne. La contribution de cette dernière à la dette constructive croît désormais linéairement.

$$\text{Eq 38. } S_{\text{montagne solaire}} \propto H + \alpha S$$

Temps de retour

Pour les cheminées solaires

Dans le cas des cheminées solaires, le temps de retour¹ s'exprime de la façon suivante (en reprenant les éléments mentionnés au chapitre #20) :

$$\text{Eq 39. } \mathcal{T}_r = \frac{S}{-f} = -\frac{\text{stock}}{\text{flux}} \sim EROI_{\text{cheminée solaire}}$$

$$\text{Eq 40. } \mathcal{T}_r \propto \frac{H^2 + \alpha}{\phi HS} \propto \frac{1}{\phi} \left(\frac{H}{S} + \frac{\alpha}{H} \right)$$

Si l'on trace l'allure du temps de retour en fonction de la hauteur H de la cheminée, on constate qu'il existe un minimum. Il existe a priori une hauteur optimale, une proportion optimale entre rayon de la serre et cheminée selon les choix constructifs. On en déduit donc une loi de proportion entre la hauteur de la cheminée et la longueur caractéristique de la serre, conduisant à un temps retour énergétique optimal pour les cheminées solaires :

$$\text{Eq 41. } H^{\text{opt}} = \sqrt{\alpha S}$$

L'existence d'une proportion optimale entre la dimension caractéristique de la serre et celle de la cheminée. Cette valeur de rapport sera sans doute différente selon que l'on optimise les coûts financiers ou différents impacts écologiques.

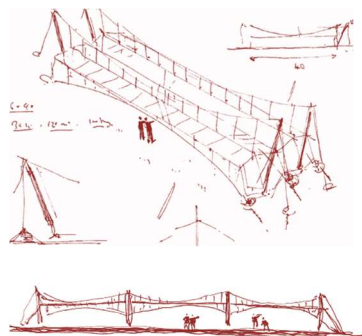
Pour les montagnes solaires

En suivant les expressions précédentes de stock et de flux, le temps de retour pour une montagne solaire s'exprime de la sorte :

$$\text{Eq 42. } \mathcal{T}_r = \frac{S}{-f} = -\frac{\text{stock}}{\text{flux}} \sim EROI_{\text{montagne solaire}}$$

¹ Qui correspond à la durée nécessaire au remboursement de l'investissement initial

Fig. 553. *Recherches sur l'évolution de la trame typique du collecteur afin de réduire le coût de la transparence. L'hypothèse d'un prototype selon le dessin de ce principe structurel. Des recherches importantes sur la fabrication d'une transparence à moindre coût.*



$$\text{Eq 43. } \mathcal{T}_r \propto \frac{H+\alpha S}{\phi HS} \equiv \mathcal{O}\left(\frac{1}{H}\right) + \mathcal{O}\left(\frac{1}{S}\right)$$

À la différence des cheminées solaires, les montagnes solaires possèdent un temps de retour qui décroît avec la taille de la serre et la taille de cheminée. Autrement dit, construire grand !

Bilan

Pour une cheminée solaire

Avec hypothèse d'une durée de vie d'une utilité classique¹

$$\text{Eq 44. } \mathcal{B} = f \cdot \mathcal{T}_{vie} + S$$

Selon les expressions précédentes, on peut écrire que le bilan total sur la durée de vie (en énergie mais il serait également traduisible en CO₂) est proportionnel et dépend des variables H (la hauteur de la cheminée) et S (la surface totale de la serre) de la façon suivante :

$$\text{Eq 45. } \mathcal{B} \propto -\phi HS \cdot \mathcal{T}_{vie} + \beta(H^2 + \alpha S)$$

En simplifiant l'équation du bilan, nous pouvons écrire :

$$\text{Eq 46. } \mathcal{B} \propto -HS \cdot \mathcal{T} + aS + bH^2$$

Les extrema du bilan doivent alors être associés aux égalités suivantes :

$$\text{Eq 47. } \frac{\partial \mathcal{B}}{\partial H} \propto -S \cdot \mathcal{T} + 2bH \equiv 0$$

$$\text{Eq 48. } \frac{\partial \mathcal{B}}{\partial S} \propto -H \cdot \mathcal{T} + aS \equiv 0$$

Les cheminées solaires obéissent à un critère de proportion optimale entre la hauteur et la surface du collecteur, mais il est probable que le rapport d'échelle entre la hauteur de la cheminée et la surface de la serre ne permettent d'assurer la nullité des deux expressions ci-dessous. Nous pourrions aussi analyser le bilan de vie, en calant la proportion entre hauteur et surface de serre selon le rapport optimisant le temps de retour. Nous chercherions alors deux objectifs conjoints : un rapport de proportion optimal (déterminé par le temps de retour) et une échelle optimale (indiquée par le bilan de vie). En reprenant l'égalité précédente :

$$\text{Eq 49. } H^{opt} = \sqrt{\alpha S}$$

En exprimant l'équation de bilan en fonction de la hauteur H , nous aurions alors :

¹ Quoi que la centrale de Manzanares fût détruite par une tornade [à vérifier]

$$\text{Eq 50.} \quad \mathcal{B} \propto -H^3 \cdot \mathcal{T} + \gamma H^2$$

Nous constatons alors que le bilan possède un maximum et qu'il existe une *valeur minimale* de la hauteur assurant un bilan nul en fin de vie. Autrement dit, et en conclusion, les cheminées solaires possèdent des proportions optimales et une échelle critique.

Pour une montagne solaire

Selon les expressions précédentes, on peut écrire que le bilan total sur la durée de vie (en énergie mais il serait également traduisible en CO₂) est proportionnel et dépend des variables H (la hauteur de la cheminée) et S (la surface totale de la serre) de la façon suivante :

$$\text{Eq 51.} \quad \mathcal{B} \propto -\phi HS \cdot \mathcal{T}_{vie} + \beta(H + \alpha S)$$

En simplifiant l'équation du bilan, nous pouvons écrire :

$$\text{Eq 52.} \quad \mathcal{B} \propto -HS \cdot \mathcal{T} + aS + bH$$

Les extrema du bilan doivent alors être associés aux égalités suivantes :

$$\text{Eq 53.} \quad \frac{\partial \mathcal{B}}{\partial H} \propto -S \cdot \mathcal{T} + 2b \equiv 0$$

$$\text{Eq 54.} \quad \frac{\partial \mathcal{B}}{\partial S} \propto -H \cdot \mathcal{T} + a \equiv 0$$

Les montagnes solaires obéissent donc à des critères de dimensions optimales vis-à-vis de l'optimisation de leur bilan énergétique sur la durée de vie (et en supposant que la durée de vie soit invariante), alors que le temps de retour était lui décroissant avec les échelles respectives du dénivelé du conduit H et de la dimension de la serre S .

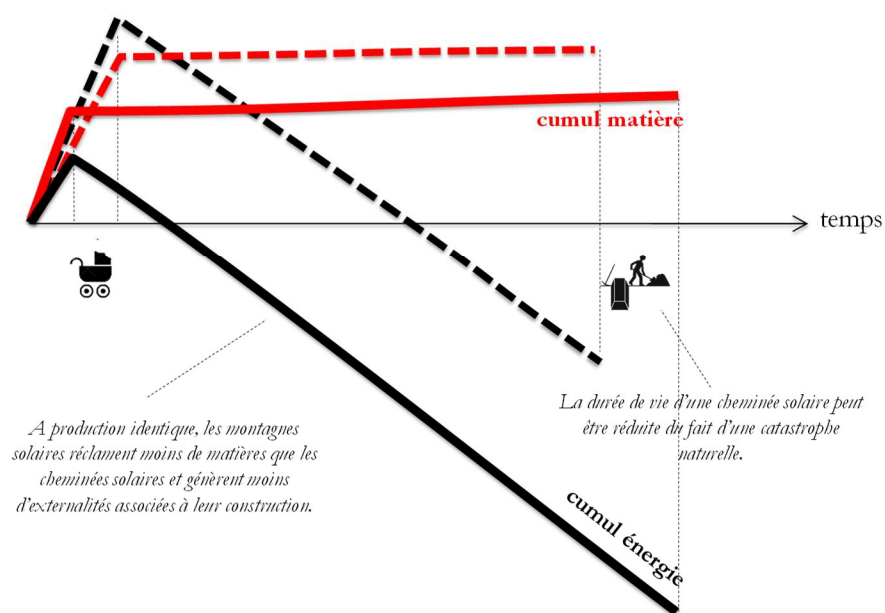
*

Bibliographie

1. SCHLAICH Jörg, BERGERMANN Rudolf, *Leicht WeIt, light structures*, Prestel Verlag, 2005
2. SCHLAICH Jörg, SCHIEL Wolfgang, *Solar Chimneys*, Encyclopedia of Physical Science and Technology. Third Edition, 2000
3. SCHLAICH Jörg, *The Solar Tower- Electricity from the Sun and Supplement*, September 1995 (the 'Yellow Book')
4. MENARD R., FAYETTE E., AZZOPARDI P., *The Solar Mountains*, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013
5. MENARD Raphaël, (WO2007051932) *équipement pour produire de l'énergie électrique ou mécanique*, 2007

Fig. 554. *Chronogrammes comparées d'une montagne solaire et d'une cheminée solaire*

Chronogrammes de la montagne solaire (trait plein) et de la cheminée solaire (trait pointillé)



#26 Wind-it

Fin 2006, l'invention d'une nouvelle architecture prometteuse pour l'éolien à axe vertical. En 2007, Wind-it propose de superposer un réseau d'éoliennes au réseau d'électricité. En 2009, Wind-it est lauréat du concours *Next Generation*. En 2014, une start-up est créée pour accélérer le développement du produit et le concentrer sur les tours de téléphonie mobile et un prototype de 50 mètres voit le jour dans l'ouest de la France. Fin 2017, deux pilotes opérationnels démontrent la fiabilité de production entre l'éolien et le solaire au sol. Wind-it, « derrick » énergétique de demain, future architecture générique de l'électrification rurale ?

Histoire

En résumé

Prendre le temps

Dans la foulée de l'invention des montagnes solaires (#25, Wind-it s'inscrit dans cette quête inventive impulsée chez Elioth dans les premières années d'existence du bureau (Fig. 555). À la différence notable des montagnes solaires, Wind-it a débouché sur plusieurs concrétisations. Il reste un projet actif avec l'espoir de nombreux développements grâce à la preuve de sa pertinence technique et économique. Entre fin 2006 et début 2018, onze années se sont révolues. Wind-it est un projet vieux de cent mille heures. Est-ce la durée nécessaire, incompressible, pour passer de l'étincelle originelle au déploiement à grande échelle, à la proposition industrielle globale, à un *business plan* prêt à se révéler ?

Un potentiel archétype

Vision optimiste (et subjective), Wind-it a les capacités de l'archétype architectural, un génome géométrique et constructif apte à lui offrir la destinée d'une infrastructure générique de micro-grids se diffusant à très large échelle. Wind-it est un projet qui a fait l'objet de nombreuses innovations et de plusieurs brevets [1][2][3] qui rendent cette tour innovante vis-à-vis des tours classiques, des typologies éoliennes comme vis-à-vis des solutions de gestion des ressources renouvelables locales. Ses avancées portent à la fois sur l'architecture technique et structurelle de la tour, sur la configuration des éoliennes et la régulation de leur production d'énergie.

Fig. 555. Fiche d'identité de Wind-it

Wind-it		
Listé	•	
Bureau	Elioth	
Lieu	Vitré, Revel, Madagascar	
Rôle	Archi	•
	Ingé	•
Phase	Etudes	•
	Travaux	•
Type	IV.3	
	V	
	VI	
	VII	•
Temps	Début	2007
	Fin	-
	Livraison	2015
Q	3	
Volume	m ³	4500
Energies	Eolien et photovoltaïque	
Matières	Acier, matériaux composites, PV	
Composition	Acier kg	1E+04
	Verre kg	-
	Bois kg	-
	Béton kg	-
	Autres kg	1E+03
Masse unitaire kg	1,3E+04	

Éloge de la patience

Pour les inventions, j'ai appris la patience et souvent les rêves rincés ou envolés par la crudité du réel. Il faut de fait beaucoup de temps pour convaincre, de la disponibilité pour évacuer les fausses pistes, de la bienveillance et de l'écoute pour trouver les bons partenaires. Wind-it m'a indéniablement appris cette lenteur. Mais lorsque l'idée se concrétise, il ne faut surtout pas perdre de temps sous peine de rater son marché, sa « destinée énergie-matière-architecture ».

2006, une nouvelle architecture

Dans l'archéologie de mes carnets, les premiers croquis¹ datent de fin septembre 2006. Je me souviens être dans un TGV, de retour de Lille vers Paris, observant par la fenêtre les pylônes de transport d'électricité (Fig. 556). Depuis ma place, je griffonne une perspective, une enfilade de pylônes dotés d'éoliennes à axe vertical, dans une structure à la géométrie spécifique. Sous le croquis, je note « 4 Darrius empilées², hauteur 50m, diamètre 6m, surface balayée 300m² » et j'évalue une puissance nominale potentielle de 50kW³.

L'effet d'échelle

Dans la suite du carnet, je m'interroge aussi sur le nombre total de pylônes haute tension en France. Sans doute après une rapide recherche sur internet, je note 250 000 unités et j'évalue ensuite la capacité totale si ce parc d'infrastructures était intégralement transformé selon l'esquisse de cette structure de 50kW. Voici l'ordre de grandeur, plus de 12GW de capacité totale, l'équivalent en production de cinq tranches nucléaires, pas loin de 200 watts par Français, un flux moyen de 40 watts en considérant un facteur de charge de 20%. L'effet d'échelle potentiel est pertinent, l'idée mérite d'être creusée.

Antécédents

Cette idée ne naît pas de nulle part. Je me souviens de cette période d'excitation intérieure, à explorer les territoires potentiels pour implanter quantité d'énergies renouvelables. Au lit en cherchant le sommeil, je parlais à la cueillette des idées, et plus particulièrement de celles captant les flux renouvelables verticaux. Avant Wind-it, j'avais réalisé quelques photomontages pour intégrer des éoliennes presque partout : en particulier sur viaduc de Millau (sans comprendre à l'époque la nécessité d'orientation des éoliennes à axe horizontal selon la direction du vent) (Fig. 557). Ce sera une idée reprise plus tard avec la proposition de la passerelle à Venlo (Elioth, 2008). Comme pour certains sous-disciplines en sciences, j'avais le sentiment que la branche des inventions autour des énergies renouvelables était insuffisamment explorée. J'avais aussi la certitude qu'il fallait

Fig. 556. Croquis original de Wind-it, 20 septembre 2006 dans le train entre Lille et Paris.



Fig. 557. Photomontage de mai 2006 : des éoliennes à axe horizontal sur le viaduc de Millau.



¹ De ce qui ne s'appelle par encore Wind-it.

² Mais selon une géométrie de troposkine, ce qui n'était pas le plus efficace pour maximiser la surface balayée.

³ Ce qui a posteriori était très optimiste. Une Wind-it actuelle de 50 mètres et qui serait équipées de quatre turbines disposerait d'environ 20kW de puissance nominale.

Fig. 558. Les plug Wind-it et le catalogue So Watt

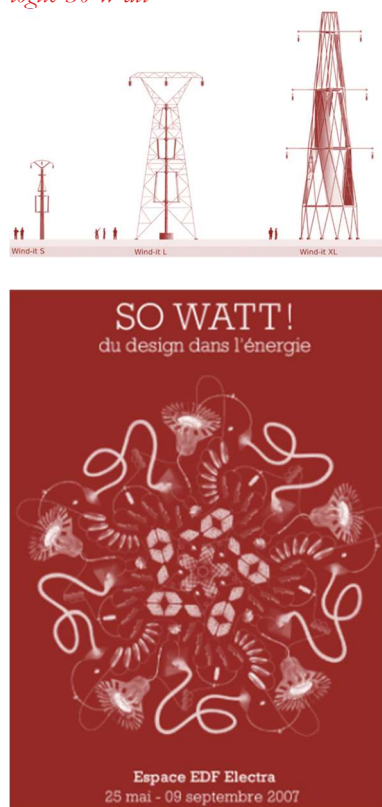
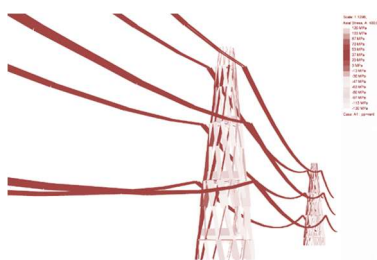


Fig. 559. Structure des pylônes XL



agir vite pour quitter le plus tôt possible les énergies fossiles, et que l'enjeu spatial était majeur, afin de capter un maximum de flux surfaciques (#10).

2007 à 2009, mutualiser les réseaux, les infrastructures positives

Fin 2006, après l'invitation offerte par mes amis d'Encore Heureux lors de la Biennale de Venise¹, je leur présentais les ébauches de Wind-it et leur proposais de développer conjointement la suite du développement entre Elioth et Encore Heureux. Julien et Nicola furent immédiatement enthousiastes. Il y avait une opportunité intéressante de visibilité de l'idée, une échéance pour accélérer l'esquisse du concept. Le designer Stéphane Villard, qui travaillait à l'époque à la R&D d'EDF, était commissaire de l'exposition qui devait voir le jour mi-2007 et dont le titre était « So Watt, du design de l'énergie ». Stéphane nous proposa d'intégrer notre projet à l'exposition. Cet objectif accéléra un premier récit de l'idée et nous verrons plus loin comme il sera aliénant, une sorte d'ornière dans la narration du projet. Avec Encore Heureux, le concept Wind-it proposait en effet de superposer un réseau d'éoliennes au réseau de transport et de distribution de l'électricité, soit en venant greffer un plug éolien aux pylônes électriques existants (Fig. 558), soit en implantant de nouveaux pylônes électriques qui intègrent une unité de production éolienne. Ce récit parlait à tous, Wind-it était un principe général qui allait plus loin que la proposition originale d'une nouvelle géométrie de pylône.

La place dévolue à la récolte

Wind-it soulevait le débat de l'implantation des énergies renouvelables (chapitre #8) et rappelait les polémiques autour du « nimby effect² » des parcs éoliens. La relation ambiguë des éoliennes au paysage est la conséquence de cette nécessité d'offrir un maximum de surface dans des zones bien exposées au vent. Aussi l'énergie du vent est intermittente et l'éolienne ne remplit sa fonction de collecte d'énergie que pendant une fraction du temps. Wind-it proposait ainsi une mutualisation de l'emprise spatiale et de son investissement constructif³. Les pylônes électriques étaient parallèlement valorisés et devenaient producteurs d'énergie renouvelable (Fig. 559). Wind-it révélait ainsi le potentiel d'une infrastructure existante. En reprenant les premières valeurs esquissées en septembre 2006, nous statuions au moment du catalogue⁴ de « So Watt » que l'équipement d'un tiers des pylônes sur le territoire français permettrait de générer l'équivalent en production électrique de deux tranches nucléaires soit environ 15 térawatt-heure ou 15 milliards de kWh⁵. Wind-it est ensuite présenté au

¹ Workshop d'une semaine intitulé Collections.

² Pour « Not In My BackYard » ne soit « pas dans mon jardin ».

³ Et donc la dette en matière, en énergie grise et carbone gris qui va avec.

⁴ Wind-it a été présenté à l'exposition So Watt de l'espace EDF Electra à Paris du 25 mai au 9 septembre 2007.

⁵ Estimation faite à l'époque et revoyant à la baisse la précédente valeur.

salon *Eco Building Performance* à Paris en septembre 2007 et vient ensuite une revue de presse intéressante¹.

2009 à 2013, les hypothèses exotiques

Au cours des mois suivants, entre les activités courantes chez Elioth, nous nous employions à poursuivre le développement technique : modélisations structurelles, analyses des flux aérauliques par simulation numérique pour jauger de l'incidence de l'exostructure sur la performance d'une éolienne située à l'intérieur etc. (Fig. 560). Avec Encore Heureux, nous entamions une recherche de partenaires industriels tant sur la charpente métallique que pour la partie mécanique de l'éolienne. Noyé dans le galop du quotidien et des affaires courantes, je m'employais aussi à réfléchir et à répondre aux sollicitations extérieures ayant repérées Wind-it. Comme pour les montagnes solaires (#25, beaucoup d'innovateurs en tout genre nous contacte : les demandes sont parfois farfelues et dans certains cas, la prise de contact est plus sérieuse. Aussi, au détour d'un échange, Nicola Delon apprend l'existence du concours annuel lancé par le magazine américain *Metropolis*² et nous sommes incités à y répondre. En mai 2009, Wind-it est lauréat du concours *Next Generation* organisé par le magazine américain (Fig. 561). Nous partons Nicola et moi émettre nos trois tonnes de CO₂ d'un trajet aérien transatlantique pour récupérer fièrement notre prix à New York (chapitre #20). Il faut dire, Barack Obama vient d'être investi à Washington, l'espoir est au changement et notamment dans le développement des renouvelables comme dans une meilleure connexion des réseaux électriques entre la côte est et la côte ouest. Nous en profitons pour rencontrer des partenaires potentiels en « américanisant » le récit de Wind-it.

Wind-it au Bhoutan

Suite à ce prix prestigieux, la revue de presse se fait plus importante encore. Wind-it fait même l'objet d'un reportage dans la matinale de la chaîne de télévision ABC en mai 2009. Les contacts pleuvent mais avec le recul, aucun ne donnera l'once d'une commande ou d'une étude de faisabilité. Notre projet éveille cependant la curiosité du gourou de la *Blue Economy*, Gunter Pauli [4]. Après plusieurs rencontres, Pauli nous invite à nous rendre au Bhoutan, royaume du « bonheur national brut », pour envisager

Fig. 560. Extrait de simulations

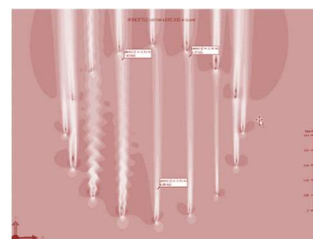


Fig. 561. Couverture de *Metropolis*



¹ Raphael Ménard et Nicola Delon invités à l'émission *La beauté du geste* de France Inter, 12 août 2007. Interview de Julien Choppin dans l'émission *Impatience* de la Radio Suisse Romande, 4 septembre 2007. Wind-it dans la revue *Domus* d'octobre 2007, dans *Techniques & Architectures* de juin-juillet 2007, dans *Le Moniteur* de la semaine du 1^{er} juin 2007, dans *Archi Créa* de mai-juin 2007, dans *Industrie et Technologies* de septembre 2007

² Nous recevions en 2009 à New York le premier prix de la revue Américaine *Metropolis* dans le cadre du *Metropolis Next Generation Design Competition*. La revue *Metropolis* est leader dans les nombreux domaines qui touchent au design, de l'architecture au paysage, du graphisme à l'aménagement intérieur. Destinée à des professionnels elle est diffusée sur tout le territoire Américain à plus de 60 000 exemplaires. Le thème de cette année était « *Fix our energy addictions* ». En sept ans d'existence, c'est la première fois que le premier prix est attribué à une équipe non américaine. Le projet prospectif Wind-it a été choisi parmi plus de 200 propositions.

d'implanter Wind-it là-bas. En 2010, Nicola et moi émettons encore quelques tonnes de dioxyde de carbone pour nous rendre dans les contreforts de l'Himalaya, tout en espérant que cet investissement sera rapidement remboursé par la vertu écologique de Wind-it (émissions à intégrer en toute rigueur au calcul dans le chapitre #20). Au cours de ces trois jours, après avoir sillonné les impressionnantes routes de montagne de ce magnifique pays, après des discussions passionnantes avec les opérateurs du réseau local, ce voyage ne débouchera sur rien, nos interlocuteurs restants accrochés à l'idée que Wind-it était d'abord une solution de *retrofit* de structures existantes et non d'abord la proposition de pylônes de nouvelle génération.

Fig. 562. *Wind-it et les réseaux*

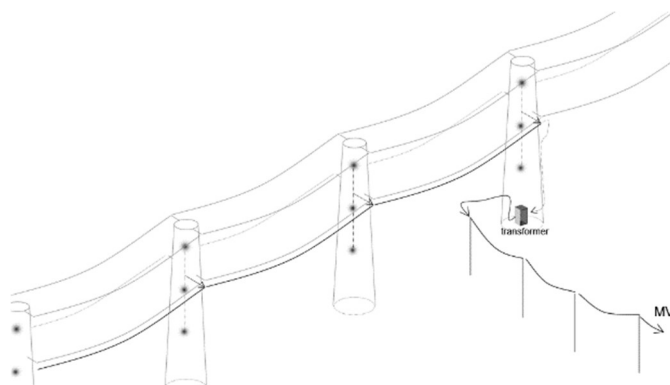
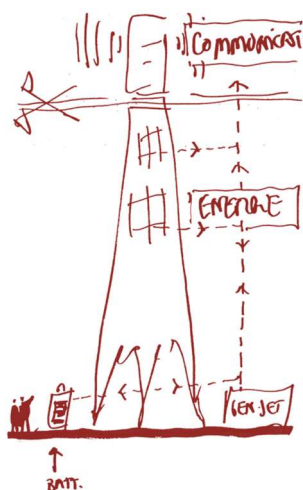


Fig. 563. *La mise à jour : une tour de télécommunication et l'abandon de la mutualisation avec le réseau électrique*



Enseignement essentiel de l'histoire de Wind-it : le premier récit de l'innovation grave le sillon primordial, il devient très difficile d'expliquer l'intention d'une invention une seconde fois. Après ce dernier épisode, Nicola exprimera l'incapacité à suivre un projet devenu chronophage sur sa durée et principalement technique. Je lui propose qu'Elioth continue alors seul et qu'évidemment en cas de succès, le temps consacré par les Encore Heureux sera récompensé.

2012, la rencontre

Heureusement, dans ce bruit de la communication, quelques yeux et des oreilles expertes savent détecter des potentiels. Laurent Grimaud, consultant en énergie, avait repéré Wind-it depuis cette époque, et par l'intermédiaire d'Egis, nous nous rencontrons une première fois fin 2012. Pour Laurent, l'opportunité de marché pour Wind-it est évidente : les relais télécoms dans les zones éloignées de toute desserte d'électricité (Fig. 564). Le marché futur est gigantesque. Dans un poster dessiné par Elioth, nous avons esquissé cette piste mais sans aller plus loin. Grâce au dynamisme de Laurent Grimaud, à la complémentarité parfaite de ses talents et de son expérience, le projet s'ébroue et Egis supporte cette reprise d'initiative. Par Laurent, nous faisons la rencontre de l'entreprise DFI qui connaît une partie des donneurs d'ordre potentiels.

2013, le business case

En 2013, la filiale d'Orange au Qatar manifeste de l'intérêt pour une « Wind-it télécom ». Nous sautons dans un avion avec Laurent pour Doha. Dans le Boeing, j'effectue alors une esquisse de simulation énergétique dynamique. En me basant sur un gisement éolien typique au pas horaire, j'en déduis la part d'économie de carburant qu'une tour Wind-it permettrait par rapport à une tour classique utilisant un groupe électrogène. Après quelques vérifications, je n'en crois pourtant pas mes yeux (et Laurent aussi), la solution éolienne de Wind-it permet une réduction importante des « opex » énergétiques. Au bout de quelques années, environ trois ans, ces simulations montrent que Wind-it rembourserait très tôt le léger surcoût de l'investissement initial. Wind-it serait décidément *bankable* avec un temps de retour aussi bref.

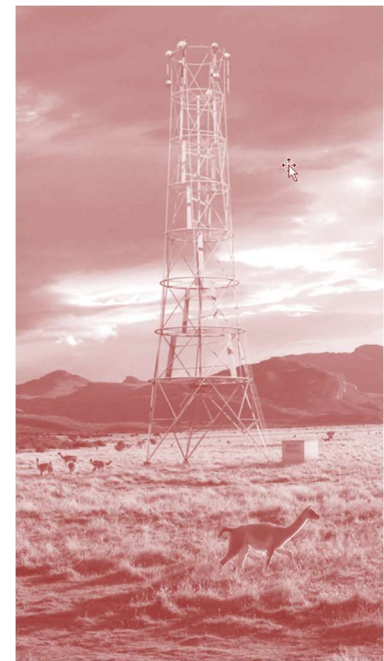
2014, la start-up

Sur ces résultats plus qu'encourageants, Laurent Grimaud et moi présentons le projet à Rik Joosten, patron d'Egis Projects, filiale d'Egis spécialisée dans le montage de projets d'infrastructure et de service. Rik, fervent promoteur des renouvelables, est très rapidement convaincu de l'opportunité et décide d'apporter son soutien au projet. Cet engagement sera déterminant pour la suite du projet. En 2014, à quatre partenaires¹, la société Wind-it SAS est créée et cette association vise à mettre en commun compétences et ressources dans le but de développer et de mettre sur le marché cette technologie innovante.

2015, le prototype de Vitré

Les fondements de la jeune start-up consistent à proposer une nouvelle tour pour les télécommunications permettant des économies d'énergie importantes tout en préfigurant de nouvelles solutions d'électrification rurale 100% renouvelable. Courant 2014, une maquette en soufflerie à échelle réduite d'un étage de la tour était réalisée pour s'assurer du bon fonctionnement et du rendement de l'éolienne. Les résultats du modèle réduit (échelle 10/33^{ème}) ont montré la performance de la géométrie (perte maximale due à l'exosquelette de moins de 15%). Fin 2014, l'exostructure d'une tour de près de 50 mètres était finalisée dans l'ouest de la France, à Vitré, à la lisière de la Bretagne (Fig. 565). Les trois étages supérieurs seront équipés d'éoliennes à axe vertical en début 2015. Les essais sont concluants et en octobre 2015, le Grand Prix National de l'Ingénierie récompense le projet Wind-it.

Fig. 564. *Wind-it et la tour télécom : une première illustration parmi d'autres.*



¹ Egis Project (représentée par Rik Joosten et Xavier Odolant, Ergos Energy Partners (Conseil, spécialisés dans le secteur de l'énergie et l'accompagnement de projets d'énergies renouvelables représentée par Laurent Grimaud) et DFI / WLM (Ingénierie, spécialisés dans les pylônes et les structures portantes pour les relais de téléphonie mobile représentée par Alain Bour) et Elioth (représenté par moi).

Fig. 565. *Prototype de Vitré*Fig. 566. *Photos du pilote de Madagascar pour TOM, site de Anjazafofotsy, juin 2017*

2016, les pilotes

En parallèle, et grâce à l'avance de liquidité par Egis, le projet se structure. Trois personnes à temps plein rejoignent l'équipe. Eric d'Aboville pour le développement et le commerce, Frédéric Verrez, comme directeur technique et Stéphane Rué pour le suivi des opérations. Grâce aux talents de développeurs d'Éric et de Laurent, Wind-it enregistre ses premières commandes. À Madagascar pour *Tower of Madagascar* (Fig. 566) et pour *Orange* au Luxembourg, grâce aussi aux contacts d'Alain Bour. La mise au point de ces pilotes sera l'occasion de simplifier encore l'architecture structurelle de la tour (notamment des diaphragmes) mais aussi de mettre au point une éolienne intégralement conçue chez Wind-it par Frédéric. L'autre enjeu concernera la gestion de l'énergie et la conception chez Wind-it du MMS gouvernant le contrôle-commande de la production éolienne, photovoltaïque et le stockage électrique.

2017, retour d'expériences

Dans le cadre du pilote à Madagascar, l'attente du client était une tour 100% autonome. Doté d'une éolienne d'environ 5kW de puissance nominale à 12m/s, de 42m² de panneaux solaires (photovoltaïque monocristallin) offrant une puissance-crête de 6kW et d'une batterie électrique suffisante, ce pilote a offert depuis presque un an une disponibilité totale (Fig. 567). Les deux éoliennes installées à Revel et à Madagascar sont opérationnelles depuis plus d'un et elles ont fonctionné sans aucun incident depuis leur installation. Le 12 novembre 2017, avec un vent moyen d'environ 7,6m/s, la production journalière à Revel a dépassé 34 kWh, la puissance maximale a été supérieure à 7 kW, établissant le record à ce jour, et laissant à penser que cette machine peut encore être optimisée pour développer davantage d'énergie.

Performances

Cette excellente performance crédibilise la solution technique¹, Wind-it a démontré la robustesse de son architecture éolienne. Elle laisse présager d'autres développements pour des développements possibles à d'autres échelles de puissance. À Madagascar, les rapports de fonctionnement de l'éolienne et du solaire ont démontré la complémentarité entre ces deux énergies telles qu'elles avaient été anticipées. Grâce à ce tandem de production, la disponibilité en énergies renouvelables a été totale pendant ces mois d'opération.

¹ Pour le coefficient de performance de l'éolienne, le C_p , tutoyant dans le cas de Wind-it la valeur de 0,3

Complémentarité des ressources renouvelables

Wind-it offre une démonstration concrète des vertus de la complémentarité solaire et éolienne et propose une solution générique d'approvisionnement en renouvelable. Par rapport à une solution solaire, l'éolien assure une parfaite complémentarité, une sécurité d'approvisionnement et permet de réduire comme prévu le dimensionnement du parc de batterie et sa longévité. Le système de supervision et de contrôle à distance a également prouvé son efficacité et sa robustesse. Le MMS, conçu par les équipes Wind-it, fonctionne parfaitement. Outre les informations opérationnelles en temps réelles consultables à distance depuis n'importe quelle interface web, celui-ci permet également de se connecter à distance sur les différents composants du système pour leur paramétrage, pour un diagnostic spécifique, pour un arrêt ou un démarrage. Ces informations sont également remontées via le cloud Wind-it sur des serveurs en ligne, et constituent une base de connaissance primordiale pour le dimensionnement futur des nouveaux sites. Le MMS a également séduit quant à sa simplicité d'usage et sa capacité à s'interfacer facilement à de nouveaux composants du système tels qu'un groupe électrogène, un mini-réseau d'électrification rurale, etc.

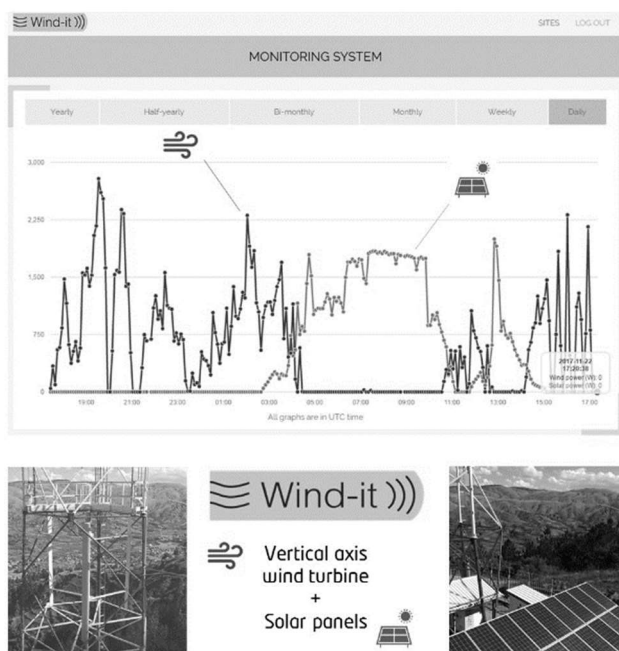


Fig. 567. Graphique illustrant les productions sur une semaine

Le futur

Que sera l'avenir de Wind-it ? À l'heure où j'écris ces lignes, tous les partenaires sont conscients que l'année 2018 sera cruciale pour constater le succès ou l'échec commercial de notre architecture. L'innovation, couplant éoliennes et mini-installation solaire, permet de réduire dans des proportions considérables, voire d'éviter, le recours à la solution traditionnelle coûteuse de groupes électrogènes alimentés au fuel. Wind-it peut par ailleurs être dimensionnée de sorte à produire des excédents d'énergie et contribuer ainsi à l'électrification locale en proposant un mix robuste d'approvisionnement par les énergies renouvelables. Au cours des nombreuses d'années, nous avons aussi songé à de multiples variantes et évolutions possibles autour du génome fondamental de cette invention :

Fig. 568. Le prototype de Vitré en cours de construction, 2015 et avant le montage des 3 rotors.



① Des versions de plus grande échelle, pour aller au-delà de quelques kilowatts, chasser la récolte dans la cours des grands, viser quelques milliers de m² balayés avec une structure qui dépasserait la centaine de mètres de haut. Ces versions pourraient aussi avoir leur déclinaison *offshore*.

② Des versions plus modestes, plus *low tech*, troquant éventuellement des éoliennes rapides pour de lentes et robustes Savonius. Ces déclinaisons pourraient aussi recourir au biosourcé pour tout ou partie du treillis structure. Des Wind-it en bambou ou des Wind-it dont la partie basse serait en bois par exemple.

③ Des versions de Wind-it hébergeant d'autres fonctions, comme des abris, des micro-commerces, des stockages d'énergie. Cette stratégie recouvre les ambitions de *169-architecture* autour des châteaux d'énergie et les variantes formelles autour de petites infrastructures énergétiques à vocation urbaine (comme le Duc) ou rural (comme le Démon de Maxwell).

④ Enfin, j'ai aussi dessiné une version encore plus apurée d'un point de vue géométrique de la version précédente des pilotes. Sans doute qu'elle permettrait d'aller encore chasser quelques kilos de moins pour produire encore davantage d'énergie. Voilà sans doute la quête ultime de Wind-it, une mise à jour de l'adage de Le Ricolais : « récolte infinie, poids nul » !

Architecture

Géométries

Longueur et poids des parties

Pour mieux comprendre cette exploration, ces parties précisent les enjeux techniques propres à Wind-it. L'optimisation géométrique de l'exosquelette a pour but de maximiser d'une part la surface balayée, et d'autre part les performances structurelles pour des coûts et des poids de matière maîtrisés. Cette recherche est aussi encadrée par des contraintes dimensionnelles associées à la facilité d'acheminement de Wind-it dans des containers adaptés. L'acheminement à dos d'hommes des éléments de Wind-it pour le pilote de Madagascar illustre cette nécessité. Cet arbitrage entre efficacité structurelle et optimisation du productible électrique suppose dès lors des modèles sophistiqués, élaborés par Elioth.

L'hexagone et la surface de récolte

La brique géométrique de Wind-it est un cône à base hexagonale : ce code géométrique est le cœur du deuxième brevet déposé pour Wind-it. Cette définition géométrique a démontré sa conception optimale pour maximiser la surface balayée (cône à facette hexagonale englobant le cylindre balayé par les pales) tout en optimisant poids de matière et simplicité des assemblages. À titre d'illustration, par rapport à une tour triangulaire traditionnelle, le surpoids de Wind-it est de l'ordre de 10 à 20%. A contrario, et à même diamètre extérieur, le cercle inscrit dans l'hexagone possède un cercle inscrit de près de 80% plus grand que pour un triangle. Dès lors, « l'effet de levier de surface balayée » de cette géométrie est considérable. Passer à une géométrie octogonale n'apporterait que 5 à 10% de surface balayée complémentaire mais les membrures principales de la tour passeraient de 3 à 4 et le nombre d'éléments serait augmenté : sans doute pas très intéressant d'un point de vue économique. En géométrie simplifiée, la tour de section carré réduirait la surface balayée et nous retrouverions encore 4 membrures ainsi que 4 points d'ancrage : cette disposition géométrique est sans doute aussi moins performante. En conclusion, l'exostructure de Wind-it correspond à un optimum géométrique entre surface balayée maximale vis-à-vis de la légèreté et de la simplicité structurelle.

Textures et géométries locales

Afin de réduire les interférences aérodynamiques, un soin très particulier est dévolu aux parties de l'exostructure situées à des altitudes semblables que les éoliennes. Depuis dix ans, l'étude du sillage en aval a été étudié par l'équipe et les prototypes de Vitré avaient permis de valider le bon fonctionnement. Or, début 2017, les nouveaux pilotes faisaient apparaître une pathologie et les examens menés par Frédéric Verrez, avec l'appui des Arts et Métiers, montrèrent qu'ils étaient nécessaires de texturer les membrures, à l'instar du traitement de surface des balles de golf. La résolution de ce point fut l'objet du quatrième et dernier brevet de Wind-it.

Fig. 569. *Les derricks d'énergie, croquis selon des architectures différentes de Wind-it*



Dynamique

Technologie Darrieus

À l'échelle de l'étage éolien, l'architecture Wind-it optimise et résout les limitations inhérentes à la technologie Darrieus en développement un design permettant une surface balayée importante¹ tout en optimisant longueurs et portées caractéristiques des pales². Cette solution globale présente aussi des capacités de développement dans d'autres situations y compris à grande échelle et pour des gammes de puissance importante³. Le caractère modulaire de l'encapsulage structurelle de la partie tournante montre aussi sa très grande capacité d'adaptation pour une multitude d'usage et pour une multitude de gamme géométrique.

Balourds

L'exostructure permet évidemment de trouver des inerties structurelles importantes et de contrôler ainsi le spectre de la structure. De fait, les éoliennes à axe vertical et particulièrement les Darrieus, génèrent des balourds aérodynamiques conséquents et ce point a été beaucoup suivi au cours du développement de Wind-it.

Fig. 570. *L'idée de résumer les composants-type d'une architecture, comme la description des composants alimentaires sur un produit alimentaire donné ?*

Composition matière-énergie	
Par unité de structure (1 pylone de 50m)	
Poids total	12 tonnes
Volume total	1500 m ³
Emprise au sol	100 m ²
Densité volumique	8 kg/m ³
Densité surfacique	120 kg/m ²
Matières fossiles	
Métaux	
Matières biologiques	
Bois	
Autres	
Durée de vie	40 ans
Flux d'offre moyen *	20 kW
Taux d'énergie	100 %
Flux d'énergie par unité de poids	1,7 W/kg
Flux d'énergie par unité d'emprise	200 W/m ²
Flux d'énergie par unité de volume	13 W/m ³

* Avec 3 modules éoliens installés dans un site dont le flux moyen à 50m est de 1000W/m²

Synthèse énergie-matière

Introduction

Pour conclure cette étude de cas autour de Wind-it, nous allons tenter d'exprimer la relation de proportionnalité entre la quantité de matière nécessaire à l'édification de l'architecture productive et sa production énergétique potentielle (Fig. 570), comme nous avons pu l'apprécier au cours du chapitre #8. Nous comparerons une éolienne traditionnelle à axe horizontale (HAWT⁴) à Wind-it, éolienne à axe vertical (Wi). Nous exprimerons ces quantités par l'intermédiaire de la valeur H , distance entre le pied de l'éolienne et l'axe de rotation du rotor, ainsi que par R , rayon du rotor⁵ ou D , le diamètre. Dans le cadre de Wind-it, D correspondra au diamètre de l'exostructure dans la partie où est située l'éolienne à axe vertical.

Energie

Loi de production des éoliennes

En premier lieu, comme nous l'avons vu dans le chapitre consacré aux « Courants d'air » (#8), le flux d'énergie est fonction de la vitesse du vent. Cette dernière varie en fonction de la hauteur et le flux de puissance moyenne disponible à une altitude H par rapport au sol plat peut être exprimé selon la proportionnalité suivante :

¹ Et donc une puissance nominale importante pour une turbine à axe vertical.

² Coût optimisé, facilité montage et maintenance...

³ Grand éolien et puissance nominale supérieure à 1MW

⁴ Acronyme courant pour *Horizontal Axis Wind Turbine*

⁵ Nous verrons ensuite que ces deux variables sont relativement liées.

$$\text{Eq 55. } \phi \propto (\ln(H))^3$$

Les valeurs de proportionnalité dépendent à la fois du gisement caractéristique (la vitesse de vent équivalente), de la densité moyenne de l'air et de la rugosité du site. Nous retenons cependant que plus l'architecture ou l'objet dédié à la récolte d'énergie est haut par rapport au sol naturel, plus le gisement potentiel est important (Fig. 571). De prime abord, cela devrait plaider en faveur de l'efficacité d'architectures de grande échelle.

Pour des éoliennes classiques à axe horizontal (HAWT)

Pour une éolienne classique (à axe horizontal ou HAWT), H est le point haut du fût, l'altimétrie de la nacelle où se situe la génératrice et D est le diamètre du rotor. La hauteur maximale de la pale est alors $H+D/2$. La production énergétique potentielle est alors gouvernée par la surface balayée ainsi que par la hauteur moyenne du rotor¹. Selon ces notations, nous pouvons établir la loi de proportionnalité pour le flux potentiel de récolte énergétique :

$$\text{Eq 56. } f_{HAWT} \propto -\phi \cdot D^2$$

Nous en déduisons alors le comportement suivant :

$$\text{Eq 57. } f_{HAWT} = \mathcal{O}(D^2 (\ln H)^3)$$

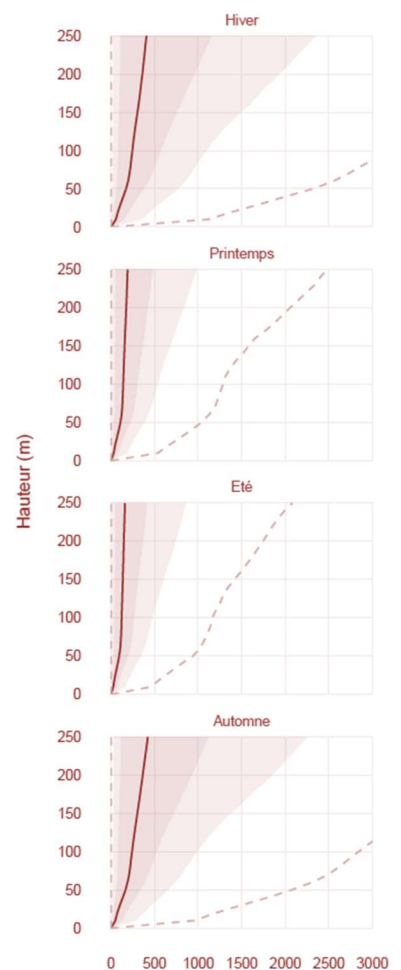
La densité de flux surfacique, vu les prospects aérauliques que doivent respecter les éoliennes (#8 sera croissante selon la valeur du logarithme de la hauteur au cube.

Pour Wind-it, éolienne à axe vertical (Wi)

Pour une éolienne à axe vertical comme Wind-it, si H est la hauteur totale maximale et D , le diamètre moyen de l'exostructure, alors le flux d'énergie captable par Wind-it croît selon la fraction de la surface balayée par la totalité de la structure, DH (Eq 58).

$$\text{Eq 58. } f_{Wi} = \mathcal{O}(DH (\ln H)^3)$$

Fig. 571. Densité de puissance estimée (W/m^2) en fonction de la hauteur, étude dans le cadre du concours pour la tour Montparnasse (Elioth, 2017)



¹ En tenant compte du profil de vent logarithmique selon la hauteur

Matière

Pour des éoliennes classiques à axe horizontal (HAWT)

Une éolienne à axe horizontal contemporaine est principalement et généralement composée : du rotor, comportant en général trois pales¹ ; d'une nacelle en partie haute comportant la génératrice² et assurant aussi la rotation du rotor dans une direction perpendiculaire au vent ; du fut, un tube métallique encastré et à inertie variable ; et enfin d'un massif de fondation, très généralement en béton armé. Pour évaluer la matière des différents composants³, nous considérerons que l'effort dimensionnant principal⁴, F , est généré par la prise au vent du rotor, et que la pression caractéristique varie comme le carré du logarithme de la hauteur. Nous en déduisons :

$$\text{Eq 59.} \quad F \propto D^2 \cdot (\ln H)^2$$

Pour le fut, nous considérons que ce dernier est constitué d'un fût de diamètre d de section constante (mais dont l'élanement est proportionnel à H) et à épaisseur variable. À l'altitude z en-dessous de la nacelle, le moment fléchissant est :

$$\text{Eq 60.} \quad \mathcal{M}_z = F \cdot z = W_z \cdot \sigma \text{ et avec}$$

$$\text{Eq 61.} \quad W_z \propto d^2 \cdot e_z$$

Nous en déduisons que l'épaisseur optimale du tube à l'altitude z en dessous de la nacelle obéit à la relation de proportionnalité suivante⁵ :

$$\text{Eq 62.} \quad e_z \propto z \cdot \frac{F}{d^2} \propto z \cdot \frac{F}{H^2}$$

En intégrant sur la hauteur H , on en déduit que le stock de matières contenu dans le fut⁶ est alors proportionnel à :

$$\text{Eq 63.} \quad S_{fut} \propto d \cdot \left(\int_0^H z \frac{F}{H^2} dz \right) \propto d \cdot F \propto H \cdot F$$

¹ Pour les éoliennes à portance, dite rapide. Il existe également des éoliennes bipales ou aussi quelques éoliennes monopales disposant alors de contrepois. Les éoliennes multipales sont en général réservées au pompage.

² Permettant la conversion de l'énergie mécanique en électricité

³ En particulier la fondation et le fut

⁴ Le dimensionnement dynamique est assurément à prendre en compte pour le dimensionnement du fut, en particulier eu égard les masses suspendues (nacelle et rotor)

⁵ Et en se souvenant que l'élanement du fut est considéré comme étant proportionnel à la hauteur H

⁶ Pouvant être sa masse, ou encore les externalités écologiques induites par sa fabrication, CO₂ ou énergie grise

Pour ce qui concerne la fondation, celle-ci sera essentiellement dépendante du moment dimensionnant en pied et nous pouvons alors aussi établir que :

$$\text{Eq 64. } S_{\text{fondation}} \propto H.F$$

Pour la nacelle et sa génératrice, sa taille sera gouvernée par la puissance caractéristique de la turbine et nous considérons alors :

$$\text{Eq 65. } S_{\text{nacelle}} \propto f$$

Dernier composant de l'éolienne à axe horizontal, les pales du rotor. Il est certain que les effets de second ordre et le comportement dynamique rentrent en ligne de compte pour leur bon dimensionnement. Nous considérerons que le dimensionnement essentiel des pales est celui d'une poutre à inertie variable, encastree à son extrémité et soumis à une pression surfacique constante. Pour simplifier le calcul, nous assimilerons la pale à une section rectangulaire constante¹ et à épaisseur variable. À une distance r de l'extrémité de pale, nous avons :

$$\text{Eq 66. } \mathcal{M}(r) \propto br^2 \propto W(r) \propto bh^2e(r) \propto R^3e(r)$$

Soit :

$$\text{Eq 67. } e(r) \propto \frac{r^2}{R^3}$$

En intégrant sur la longueur des pales, on a donc :

$$\text{Eq 68. } S_{\text{pale}} \propto bh \left(\int_0^R \frac{r^2}{R^3} dr \right) \propto D^2$$

En synthèse, la masse totale (ou par extension le stock construit au sens écologique du terme) de notre éolienne à axe horizontal (HAWT) est donc gouvernée par la somme des quatre termes suivants :

$$\text{Eq 69. } S_{\text{HAWT}} = S_{\text{fut}} + S_{\text{fondation}} + S_{\text{nacelle}} + S_{\text{pale}}$$

Soit :

$$\text{Eq 70. } S_{\text{HAWT}} \propto H.F + H.F + f + D^2$$

On en déduit :

$$\text{Eq 71. } S_{\text{HAWT}} \propto H.D^2.(lnH)^2 + D^2.(lnH)^3 + D^2$$

¹ Dont les dimensions seront proportionnelles au rayon R

Comme évoqué au début de cette analyse, le rayon R du rotor et la hauteur H sont liés et nous pouvons considérer que la position la plus basse de la pale correspond à une cote altimétrique minimale¹. Nous avons donc :

$$\text{Eq 72.} \quad R = H - H_0$$

Nous pouvons donc considérer qu'à partir d'une certaine échelle, diamètre et hauteur de la nacelle croissent dans une certaine proportionnalité. Au premier ordre, on considère donc :

$$\text{Eq 73.} \quad D = \mathcal{O}(H)$$

On peut alors en conclure que le stock construit total pour une éolienne à axe horizontal obéit à loi d'échelle suivante :

$$\text{Eq 74.} \quad S_{HAWT} = \mathcal{O}(H^3 (\ln H)^2)$$

Pour Wind-it, éolienne à axe vertical (Wi)

Pour ce qui concerne l'effort dimensionnant F , ce dernier est gouverné par la surface balayée des éoliennes intégrées à l'exostructure. Nous pouvons donc établir que

$$\text{Eq 75.} \quad F \propto HD \cdot (\ln H)^2$$

On considère que Wind-it est principalement composée d'une exostructure, de fondations et d'une éolienne à axe vertical (VAWT). Pour l'exostructure, nous considérons de façon simplifiée que le diamètre de Wind-it est constant et nous assimilons l'exostructure à un tube d'épaisseur variable. À l'altitude z en-dessous du point haut, le moment fléchissant est :

$$\text{Eq 76.} \quad \mathcal{M}_z = F \cdot z = W_z \cdot \sigma \text{ et avec}$$

$$\text{Eq 77.} \quad W_z \propto D^2 \cdot e_z$$

Nous en déduisons que l'épaisseur optimale du tube équivalent à l'altitude z obéit à la relation de proportionnalité suivante :

$$\text{Eq 78.} \quad e_z \propto z \cdot \frac{F}{D^2}$$

¹ Pour échapper à la couche limite aérodynamique

En intégrant sur la hauteur H , on en déduit que le stock de matières contenu dans l'exostructure est alors proportionnel à :

$$\text{Eq 79. } S_{exo} \propto D \cdot \left(\int_0^H z \frac{F}{D^2} dz \right) \propto \frac{H^2}{D} \cdot F$$

Pour ce qui concerne la fondation, celle-ci sera essentiellement dépendante du moment dimensionnant en pied, modéré par le diamètre du tube et nous pouvons alors aussi établir que :

$$\text{Eq 80. } S_{fondation} \propto \frac{H}{D} \cdot F$$

Pour la turbine et sa génératrice, sa taille sera gouvernée par la puissance caractéristique de la turbine et nous considérons alors :

$$\text{Eq 81. } S_{vawt} \propto f_{Wi}$$

En synthèse, la masse totale (ou par extension le stock construit au sens écologique du terme) de Wind-it est donc gouvernée par la somme des trois termes suivants :

$$\text{Eq 82. } S_{Wi} = S_{exo} + S_{fondation} + S_{vawt}$$

En se rappelant, les relations suivantes :

$$\text{Eq 83. } F \propto HD(\ln H)^2$$

$$\text{Eq 84. } f_{Wi} = \mathcal{O}(DH(\ln H)^3)$$

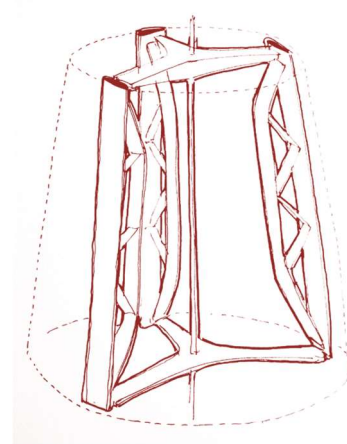
Nous avons donc :

$$\text{Eq 85. } S_{Wi} = H^3(\ln H)^2 + H^2 \cdot (\ln H)^2 + \mathcal{O}(DH(\ln H)^3)$$

On peut alors en conclure que le stock construit total pour une Wind-it obéit à loi d'échelle suivante :

$$\text{Eq 86. } S_{Wi} = \mathcal{O}(H^3(\ln H)^2 + DH(\ln H)^3)$$

Fig. 572. *L'hypothèse des pales biplans comme des poutres Warren (brevet de 2009) puis juillet 2011.*



Temps de retour

Pour des éoliennes classiques à axe horizontal (HAWT)

On en déduit donc que le quotient matière-énergie est alors guidée par la loi d'échelle sur l'énergie (Eq 57) et celle sur la matière (Eq 74) et qu'ainsi le temps de retour matière-énergie augmente avec la dimension caractéristique à partir d'une dimension H suffisamment importante :

$$\text{Eq 87.} \quad \mathcal{T}_{HAWT} = \frac{S}{-f} = \mathcal{O}\left(\frac{H}{\ln H}\right)$$

Cette quantité est homogène à un temps et correspond soit :

- Au ratio entre énergie grise liée à la construction de l'éolienne et son flux courant de production : on divise donc un stock par un flux. Cette quantité correspond au EROI (#20) ;
- Au ratio entre la quantité de matières initiales et la capacité de la machine à réhabiliter un flux de matière de basse qualité en haute qualité ;
- Au ratio entre émissions de gaz à effet de serre liées à la construction de la machine comparée aux émissions évitées lors de son activité...

Conclusion provisoire sur l'échelle des éoliennes à axe horizontal

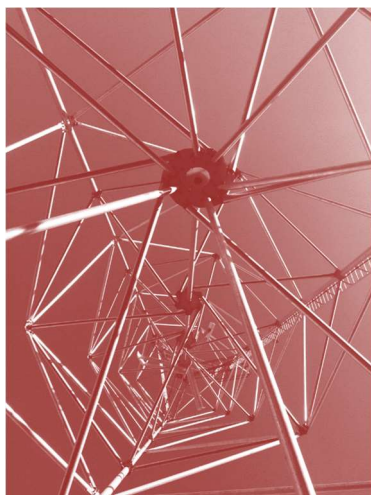
Ce résultat devrait encourager la fabrication de petites machines plutôt que d'éoliennes de grande dimension. Avec un temps de retour écologique plus faible à petite échelle, il serait en toute rigueur plus utile de viser des temps de retour énergétique et carbone les plus courts possibles. Or, l'histoire récente montre au contraire une course au gigantisme et les éoliennes tendent au contraire à augmenter leur taille caractéristique. Quelles en sont les raisons ? En premier lieu, la densité de puissance disponible croît avec la hauteur caractéristique (Eq 57). Cela signifie que sur un territoire donné, un parc d'éoliennes de grande taille produira plus qu'un parc constitué de petites turbines. L'argument foncier fournit sans doute un premier argument. Le nombre plus réduit de turbines simplifie aussi les opérations d'entretien-maintenance en limitant le nombre global de composants. De même que les coûts fixes des études par exemple sont faiblement dépendantes de la dimension. Il y en aurait pourtant lieu d'inventer d'autres stratégies d'implantation.

Pour Wind-it, éolienne à axe vertical (Wi)

Dans le cas de Wind-it, le rapport entre le stock construit (Eq 86) et le flux de production (Eq 58) conduit à l'expression suivante de temps de retour :

$$\text{Eq 88.} \quad \mathcal{T}_{Wi} = \frac{S}{-f} = \frac{H^3(\ln H)^2 + \alpha \cdot DH(\ln H)^3}{DH(\ln H)^3} = \frac{H^2}{D \ln(H)} + \alpha$$

Fig. 573. Une vue de Wind-it



Comme pour l'éolienne à axe horizontal (Eq 87), si la croissance du diamètre suit l'échelle de la tour, le temps de retour croît avec l'échelle, ce qui plaide également en faveur de dimensions contenues. Toutefois, il est possible d'adapter la proportion de l'exostructure selon l'échelle de telle sorte à rendre constant le temps de retour et l'élanement D/H de Wind-it devra ainsi évoluer selon la quantité :

$$\text{Eq 89.} \quad \frac{D}{H} \approx \frac{H}{\ln(H)}$$

Selon cette relation (Eq 89), au fur et à mesure de la croissance de la taille de Wind-it, son élanement devrait donc s'alourdir, en favorisant un accroissement plus rapide de sa largeur vis-à-vis de sa hauteur.

Bilan énergie-matière

Pour des éoliennes classiques à axe horizontal (HAWT)

Nous approchons à présent le bilan énergie-matière, à savoir la différence entre les produits générés (sur la durée de vie) et la dette liée à construction. D'après Eq 1, ce bilan s'écrit :

$$\text{Eq 90.} \quad \mathcal{B}_{HAWT} = f \cdot \mathcal{T}_{vie} + S$$

Si l'on néglige les termes de masse liées à la nacelle et aux pales (Eq 71), on établit alors que pour une hauteur suffisamment importante :

$$\text{Eq 91.} \quad \mathcal{B}_{HAWT} \propto -\mu \cdot H^2 (\ln H)^3 + H^3 (\ln H)^2$$

On peut établir que cette quantité possède un extremum local (Fig. 575).

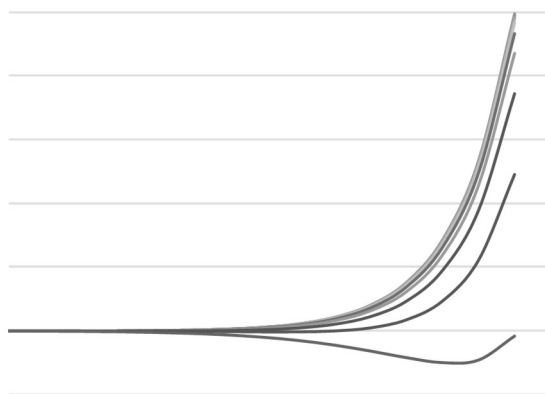


Fig. 574. *Wind-it, le pilote de Revel*



Fig. 575. *Exemple de faisceau de courbe de bilan en fonction de la hauteur*

Il existe donc a priori une hauteur optimale permettant de maximiser le bilan énergie-matière. Pour s'en convaincre, et si l'on néglige l'effet de cisaillement des vitesses de vent en fonction de l'altitude, le bilan énergie-matière serait alors :

$$\text{Eq 92. } \mathcal{B}_{HAWT} \propto -\mu \cdot H^2 + H^3$$

Cette quantité possède bien un minimum pour $H^{opt} = \frac{2\mu}{3}$

Bilan énergie-matière surfacique pour une ferme éolienne classique (HAWT)

Si l'on se rappelle qu'une ferme éolienne suppose un prospect à l'échelle des turbines, on peut également s'interroger sur le rendement optimal rapporté à la rareté de l'allocation spatiale (d'après Eq 91), cette quantité tendant vers l'infini à grande échelle. La densité de bilan écologique semble donc posséder des dimensions critiques.

$$\text{Eq 93. } b_{HAWT} \propto \frac{\mathcal{B}}{H^2} \propto -\mu(\ln H)^3 + H(\ln H)^2$$

Pour Wind-it, éolienne à axe vertical (Wi)

Dans le cas de Wind-it, le bilan s'écrit :

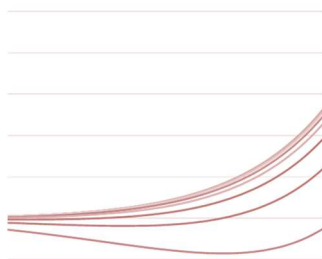
$$\text{Eq 94. } \mathcal{B}_{Wi} \propto -\mu \cdot DH(\ln H)^3 + H^3(\ln H)^2 + \alpha \cdot DH(\ln H)^3$$

Soit :

$$\text{Eq 95. } \mathcal{B}_{Wi} \propto [(\alpha - \mu)(\ln H)D + H^2]H(\ln H)^2$$

Si l'on suppose que le premier coefficient négatif, le contrôle du diamètre D permet a priori de conserver un bilan négatif (et donc favorable selon notre convention), quel que soit l'échelle H . Il faudra cependant veiller à la faisabilité de rotor de grand diamètre.

Fig. 576. Faisceau de densités de bilan en fonction de la hauteur



Bibliographie

1. MENARD Raphaël, (WO2010130947) *éolienne à axe de rotation perpendiculaire à la direction du vent*, 2010
2. MENARD Raphaël, (WO2016034818) *structure de tour pour rotor d'éolienne à axe vertical*, 2015
3. MENARD Raphaël, (WO2018015642) *structure de tour pour supporter au moins un rotor d'éolienne à axe vertical*, 2017
4. PAULI Gunter, *The Blue Economy*, Paradlightnigm Edtions, 2010
5. SAMYN Philippe, *Étude de la morphologie des structures, à l'aide des indicateurs de volume et de déplacement*, Académie royale de Belgique, 2004

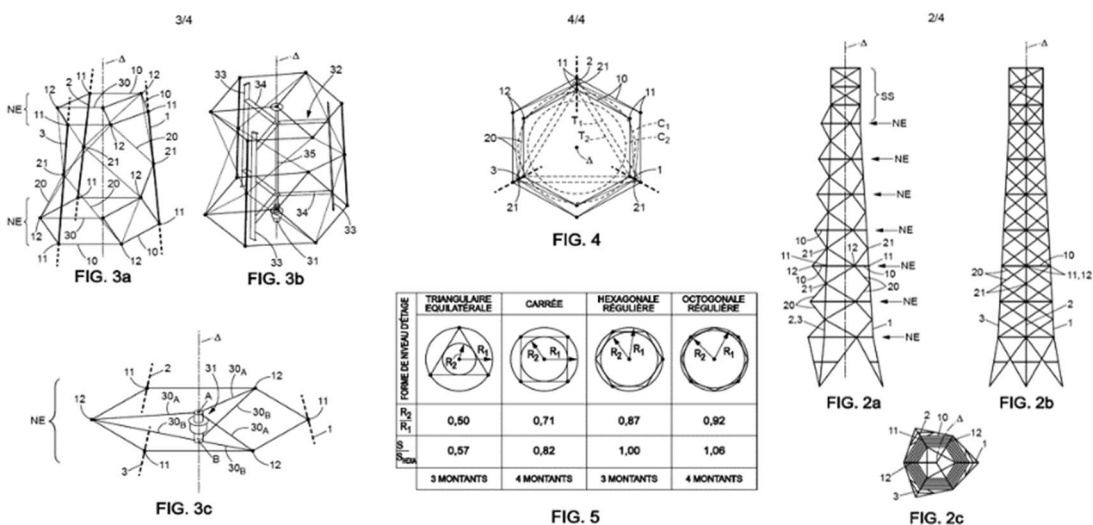
Liens sur Wind-it

- Site web de Wind-it : <http://www.wind-it.fr/home.html>
- Blog de Wind-it : <http://blog-wind-it.tumblr.com/>
- Vidéo du pilote de Madagascar : <https://vimeo.com/224340710>

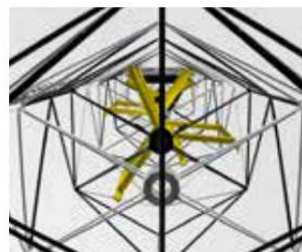
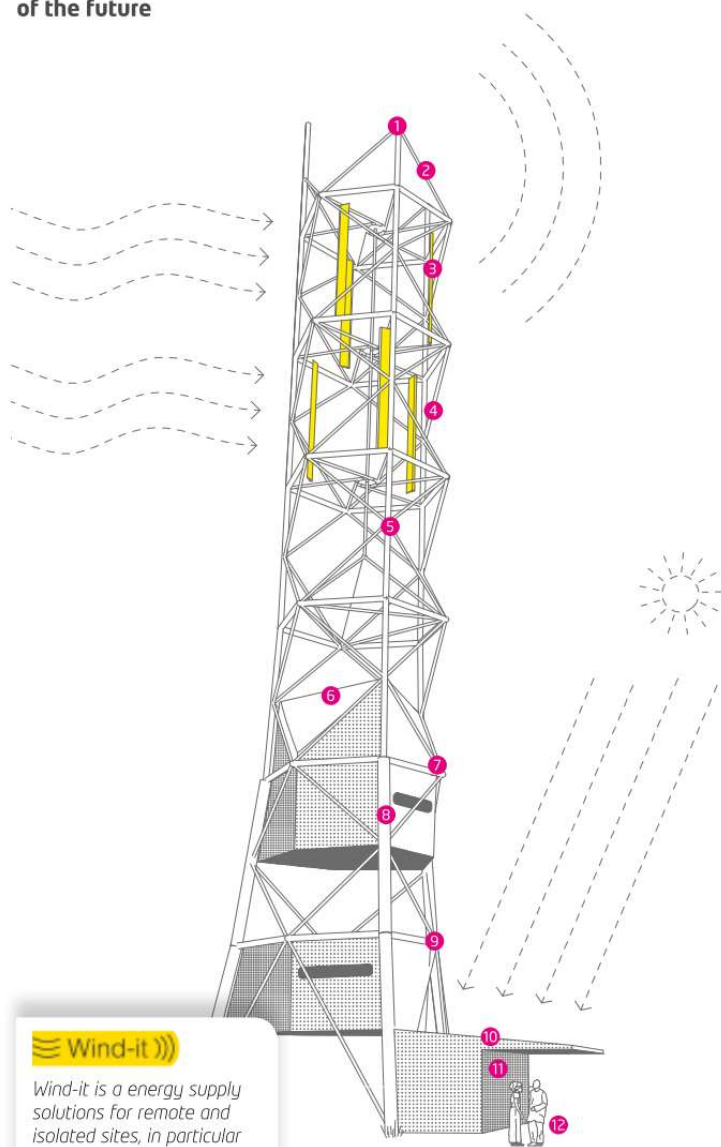
Les brevets de Wind-it

- Brevet #1, l'exostructure
- Brevet #2, le « code géométrique »
- Brevet #3, optimisation géométrique, juillet 2016. Extrait des revendications principales :
 - « Structure de tour pour supporter au moins un rotor d'éolienne à axe vertical, comprenant une structure creuse qui s'étend verticalement et qui est destinée à reposer au sol par des pieds de ladite structure creuse répartis angulairement autour d'un axe vertical central de la structure creuse, dit axe central [...] »
- Brevet #4, revêtement de parties. Un nouveau brevet (no FR 176156) concernant un "Revêtement propre à diminuer la traînée de l'écoulement d'un fluide autour d'un élément cylindrique", a été déposé le 5 décembre, en partenariat avec l'École Nationale des Arts et Métiers. C'est le quatrième brevet protégeant la solution Wind-it.

Fig. 577. Extrait du brevet #2



The micro-grid of the future



- 1 HEIGHT 41m
- 2 MULTI-OPERATORS TOWER
- 3 VERTICAL AXIS WIND-TURBINE #1 5kW
- 4 VERTICAL AXIS WIND-TURBINE #2 5kW
- 5 SKELETON IN HIGH POSITION IN STEEL
- 6 UPPER OBSERVATION DECK
- 7 SHELTER #1 ~25sqm (+ MEZZANINE)
- 8 SKELETON IN LOW POSITION IN TIMBER OR BAMBOU STRUCTURE
- 9 SHELTER #2 ~30sqm
- 10 PV SOLAR PANELS ~45sqm BklWp
- 11 ENERGY SHELTER ~ 20sqm INCLUDING ELECTRICITY STORAGE
- 12 CHARGE FACILITY FOR ELECTRICAL MOBILITY



Wind-it is a energy supply solutions for remote and isolated sites, in particular for telecommunication towers and rural electrification.

Role:
Inventors
Skateholder

Design: **Elioth**

Services:
Structural design, micro-grid design & engineering



Wind-it, an invention that Elioth has nourished and which is alive. In 2014, a dedicated startup was created to accelerate the product's development and the Wind-it company was established. It is currently developing and proposing a whole new field for telecommunications which result in significant energy savings. Wind-it is a reliable solution also for

rural electrification possibilities, 100% renewable. This project has been the subject of patent applications. Wind-it, first and foremost is the pooling of Elioth's know-how: geometry, structure and renewable energies. Understanding the stakes which allow us to reinvent and solve new cost-effective solutions for vertical axis wind turbines.

#27 Le sol à albédo variable

Si les sols urbains possédaient des qualités thermiques variables selon les saisons ? Si ces sols favorisaient l'effet d'îlot de fraîcheur en situation estivale, et à l'inverse, plus de chaleur solaire en hiver ? Des géométries, des revêtements de sols et d'enveloppes qui anticiperaient les dérives climatiques à venir.

À l'origine

Qu'est-ce que l'albédo ?

L'albédo est le pouvoir réfléchissant d'une surface, c'est-à-dire le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie à l'énergie lumineuse incidente. C'est une grandeur sans dimension (voir chapitre #19). L'albédo de la neige fraîche est par exemple compris entre 0,75 et 0,90 : c'est-à-dire que l'énergie solaire renvoyée vers le ciel est comprise entre 75% et 90%. À l'inverse, en situation urbaine, du fait de la colorimétrie sombre de revêtements des bâtiments ou des sols urbains, du fait aussi de la géométrie complexe des tissus urbains, le rayonnement solaire est majoritairement piégé [3].

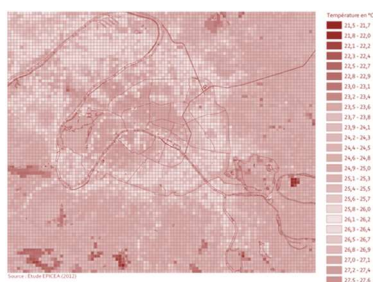
Effets d'îlot de chaleur

En situation estivale, cette situation concourt à l'effet d'îlot de chaleur urbain. La notion d'îlot de chaleur fait référence à l'augmentation de la température due à l'urbanisation : les villes sont plus chaudes que leurs environs moins denses. Les consommations d'énergie en chauffage sont diminuées, mais les consommations pour la climatisation augmentent et le confort thermique en été se dégrade. Cette notion est extrêmement bien documentée avec par exemple des projets de recherche de grande ampleur [3] comme Muscade ou Épicéa, ou plus spécifiquement des programmes de travail avec l'agence d'urbanisme de l'aire métropolitaine lyonnaise. La notion d'îlot de chaleur est d'autant plus importante que la tendance du changement climatique à long terme est sur l'amplification de ces phénomènes et surtout des conséquences négatives. Aussi, si la résilience vise essentiellement à réduire les causes et l'adaptation aux conséquences il est important d'améliorer généralement le confort (qui par rebond réduit les effets).

Albédo et forçage radiatif

Au-delà d'un effet purement local, l'augmentation de la valeur moyenne de l'albédo terrestre concourt à limiter le forçage radiatif (chapitre #19). Dans leur article [5], Akbari et al. établissaient une équivalence entre l'augmentation de l'albédo et des effets d'atténuation sur les gaz à effet de serre : l'augmentation de 1% de l'albédo sur un mètre-carré participait à limiter le forçage radiatif de façon analogue à la non-émission de cinq kilos de CO₂ équivalent. Selon Akbari [5], en utilisant des toits et des sols à fort

Fig. 578. L'îlot de chaleur urbain à Paris, APUR



pouvoir réfléchissant, on pourrait modifier l'albédo urbain de +10%. Ce qui aurait pour conséquence un forçage radiatif négatif de 0,044 watts par m², équivalent à une réduction de 44 Gt d'émission de CO₂.

Albédo et infrastructures

En 2011, chez Elioth, nous effectuons une recherche interne pour Egis afin de documenter cet enjeu, développer un outil de modélisation thermique interne et rendre opérationnel cet enjeu, a fortiori pour les activités de prescription et d'exploitation d'infrastructures chez Egis. Avec l'hypothèse de 1600 kilomètres d'autoroute en exploitation, le potentiel équivalent d'atténuation serait d'environ 150 000 tonnes de CO₂ si l'albédo était augmenté d'un pourcent. À l'échelle d'une route quatre voies, l'augmentation de +1% de sa valeur d'albédo sur un tronçon d'un kilomètre correspondrait à la non-émission de 50 tonnes de CO₂. L'effet est donc considérable et il est certain que les villes et les métropoles devraient largement documenter et planifier l'augmentation graduelle de leur albédo (chapitre #21).

Un sol climatique

Plusieurs recherches démontrent que les sols ont un effet très important sur le climat urbain [3][6]. Les caractéristiques thermiques et spectrophotométriques des matériaux des revêtements urbains vont influencer sur le microclimat ambiant au travers de l'albédo et de ses réflexions spéculaires ou diffuses mais aussi par leurs propriétés d'isolation ou d'inertie thermique [8]. Afin de lutter contre l'îlot de chaleur, il est utile de diminuer la température de surface des sols, essentiellement l'été [4]. Un des paramètres importants de ces phénomènes souvent mis en avant est l'albédo des matériaux de l'espace urbain, c'est-à-dire la proportion de rayonnement réfléchi. Par exemple, les toits en zinc d'un centre historique réfléchissent environ 60% du rayonnement et chauffent moins que les toits en tuile, qui en réfléchissent environ 20%. Le « sol à albédo variable » est une expérimentation à mi-chemin entre de la recherche pure et un essai classique de sol. Il s'agit ici d'inventer de nouveaux matériaux de sol, aux propriétés thermiques particulières qui permettent de lutter contre les îlots de chaleur en milieu urbain, mais aussi d'améliorer le confort thermique en situation hivernale : objectifs contradictoires ?

Les essais à Lyon Part-Dieu

L'histoire d'une idée

En 2012, Elioth proposait d'intégrer des sols innovants dans la création du quartier Part-Dieu, des sols producteurs d'énergie ou des sols régulateurs. L'idée a fait son chemin et en 2013, au sein du groupement piloté par l'AUC¹, la proposition d'un sol dont l'albédo serait variable, émerge et

Fig. 579. Recherche de pavages par Elioth.

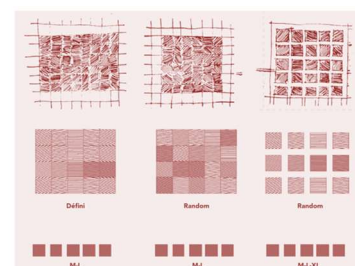


Fig. 580. Fiche d'identité

Expérimentation sol à albédo variable	
Listé	•
Bureau	Elioth
Lieu	Lyon
Rôle	Arche • Ingé •
Phase	Etudes • Travaux •
Type	IV-3 V VI VII •
Temps	Début 2013 Fin - Livraison 2017
Q	1
Volume	m ³ 4,5
Energies	Solaire thermique
Matériaux	Béton, différents revêtements
Composition	Acier kg - Verre kg - Bois kg 1E+02 Béton kg 6E+02 Autres kg 2E+02 Masse unitaire kg 9,0E+02

¹ avec Bas Smet, Egis, ON, No Design, Encore, Éléments Ingénierie

Fig. 581. *L'expérience en cours à Lyon Part-Dieu. L'emplacement de l'expérimentation dans le quartier de Part-Dieu à Lyon.*



reprend une proposition qui avait été formulée par Elioth en 2007 dans le cadre du quartier Artem à Nancy.

Une concrétisation avec la SPL Lyon Part-Dieu

Le dispositif d'expérimentation des futurs espaces publics du quartier est lancé à travers l'installation d'un site test qui doit être l'occasion de réfléchir à des solutions innovantes en termes de matérialité, des propriétés des revêtements de sol et de solutions quant à l'ilot chaleur urbain. À la fin de l'année 2016, Elioth dessine le projet et le groupement Maia-Sonnier et C2AI remporte le marché pour la réalisation de la table qui sera finalement livrée début mars 2017.

Le principe en deux schémas

À la différence d'un sol classique utilisant uniquement un albédo fixe pour réduire son impact sur la chaleur en été l'expérimentation consiste à créer un sol avec des capacités climatiques variables en fonction des saisons. Un sol plus frais en été et plus chaud en hiver. Il s'agit de conjuguer une micro-géométrie liée à la course solaire et l'usage de différents matériaux aux propriétés thermiques différentes (Fig. 586). La différenciation saisonnière se fait grâce à une géométrie adaptée. Nous souhaitons tester différents types de sol : des sols courants comme des hypothèses de sol innovant, possédant cette caractéristique d'albédo variable. Aussi, cette table d'expérimentation de 6 mètres par 5 permet de tester différents types de matériaux utilisés pour le revêtement des sols des espaces publics (Fig. 582).

Fig. 582. *Vue de la table d'expérimentation et de des différents capteurs. Les 6 échantillons innovants sur la partie droite de la table. Aperçu des 12 échantillons de sol.*



Des capteurs pour ausculter le sol

À cette fin, la table a été très fortement instrumentée avec un ensemble de capteurs pour mesurer les évolutions des propriétés et des conditions thermiques. Selon le protocole de mesure établi par Elioth, il y a par exemple des capteurs de température de surface et d'air, des capteurs d'ensoleillement, de vitesse du vent. On compte presque 60 capteurs qui pren-

ment des mesures toutes les 10 minutes pendant les sept mois de l'expérimentation. Toutes les informations sont retransmises sur un serveur pour être analysé ensuite par les équipes du Lab chez Elioth.

Une mosaïque de sols

La table est composée de 12 échantillons de sol de 1,2m par 1,2m. Six échantillons sont des matériaux existants servant de base de mesure (bétons, asphalte, stabilisés, ...). En discussion étroite entre les concepteurs d'Elioth et les équipes de Maia-Sonnier, six échantillons de sol « à albédo variable » avec différentes caractéristiques ont été prototypés et testés. Les indentations des sols innovants visibles sur la table d'expérimentation seront évidemment réduites dans le cadre d'un futur développement industriel. L'objectif est de comparer les propriétés des matériaux sur plusieurs saisons et dans différentes conditions climatiques.

Études parallèles

En parallèle de l'instrumentation, un modèle de calcul thermique théorique urbain a été réalisé par Elioth. Il sera calé grâce aux données récupérées de la table. L'objectif est de pouvoir explorer l'influence relative de l'albédo, de l'émissivité, de la capacité thermique des matériaux de pavage sur le confort (UTCI), et d'extrapoler les mesures sur site à d'autres conditions météorologiques (hiver, printemps, été, automne, autres, morphologie urbaine différente) et à d'autres échelles (si on pose 200m² du matériau par exemple). La modélisation se base sur une rue « canyon ».

Les premiers résultats

Nous avons déjà un aperçu des premiers résultats. Lors de la canicule de juin le béton foncé et l'asphalte sont montés à 65°C là où les essais de sol à albédo variable sont restés sous les 55°C. Sur la table d'expérimentation, des premiers résultats mettent en évidence des différences importantes de comportement thermique des différents revêtements testés (jusqu'à 20°C d'écart entre les surfaces testées). Ils confirment notamment que l'utilisation du granit, prévu dans les principaux aménagements à venir du quartier est plus vertueuse (inférieure à 50°C en surface) que les matériaux plus traditionnels d'espaces publics, asphalte et béton (plus de 65°C en surface).

Objectif à terme

La recherche sur l'augmentation de l'albédo est très importante mais se focalise uniquement sur les problématiques de réduction de la température du sol. Chez Elioth, notre ambition est de trouver un matériau qui a une température de surface faible en été, mais aussi, et presque contre nature, une température plus élevée que la normale en hiver. Ce matériau permettrait à la fois de lutter contre l'îlot de chaleur en été mais aussi de réduire l'inconfort lié au froid en hiver. Indépendamment, ces deux contraintes sont réalisables mais l'innovation porte donc sur la manière cumuler les deux contraintes dans un seul matériau.

Fig. 583. *Effet de l'îlot de chaleur urbain : Profil de température lors d'une journée estivale moyenne, extrait du guide IEC2 par Elioth & Egis*

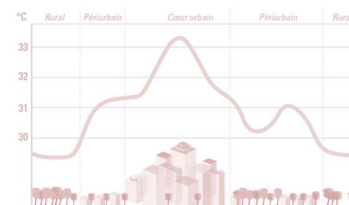
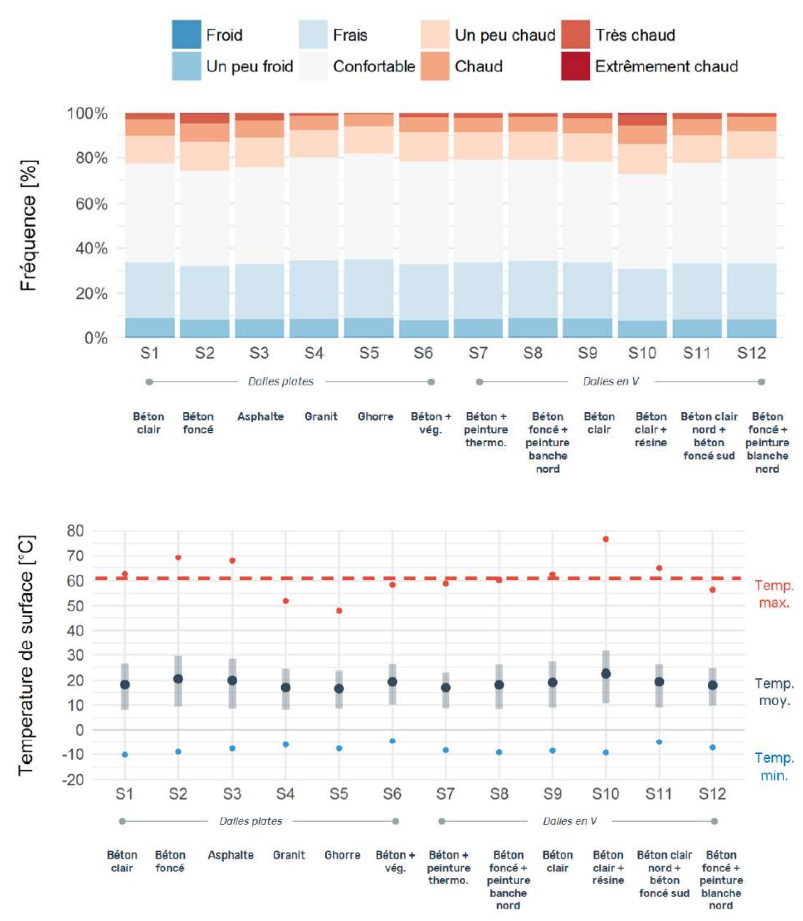


Fig. 584. Extrait du rapport de récupération des résultats par Elioth et la comparaison horaire des températures des différents matériaux



Bibliographie

1. TROMEUR Eric, MENARD Raphaël, BAILLY Jean-Baptiste, SOULIE Christophe, *Urban vulnerability and resilience within the context of climate change*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012
2. TROMEUR Eric, MENARD Raphaël, « Changement climatique : les besoins en climatisation en France : un enjeu majeur en 2050 », *Le Moniteur*, 25 Novembre 2011.
3. COLOMBERT Morgane, *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*, Thèse de Doctorat, Université Paris Est, 8 décembre 2008.
4. AKBARI, H; POMERANTZ, M., and TAHA H. *Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas*, Solar Energy, Vol 70, N°3, pp. 295-310, 2001
5. AKBARI, H., MENON S., and ROSENFELD, A.. *Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO2*, Climate Change, Vol 95, Joint Issue 3-4, 2009, DOI 10.1007/ s10584-008-9515-9.
6. OKE, T R (1982) *The Energetic basis of the Urban Heat Island*, Q. J. R. Meteorol. Soc., 108, 1–23
7. MENARD Raphaël et al., *Guide d'interaction énergie-climat, volume 2, résilience climatique*, ISBN : 978-2-8760-2052-8, Egis, 106 pages, 2013
8. APUR, *Les îlots de chaleur urbains à Paris - Cahier n°4 : influence climatique des revêtements de sol à Paris*, juillet 2017

Liens complémentaires

Informations par Lyon Part-Dieu

<https://www.lyon-partdieu.com/actualites/experimenter-espaces-publics/>

Reportage sur France 3 Régions

<http://france3-regions.francetvinfo.fr/auvergne-rhone-alpes/emissions/jt-local-1920-grand-lyon>

#27

Le sol à albédo variable

Fig. 585. Les 12 échantillons et les 6 configurations

Mock-up of innovative urban grounds



béton avec peinture thermosensible (sensible à la chaleur)



béton clair + remplissage en résine



béton noir + peinture blanche sur face Nord



béton lourd clair
béton léger noir



béton clair



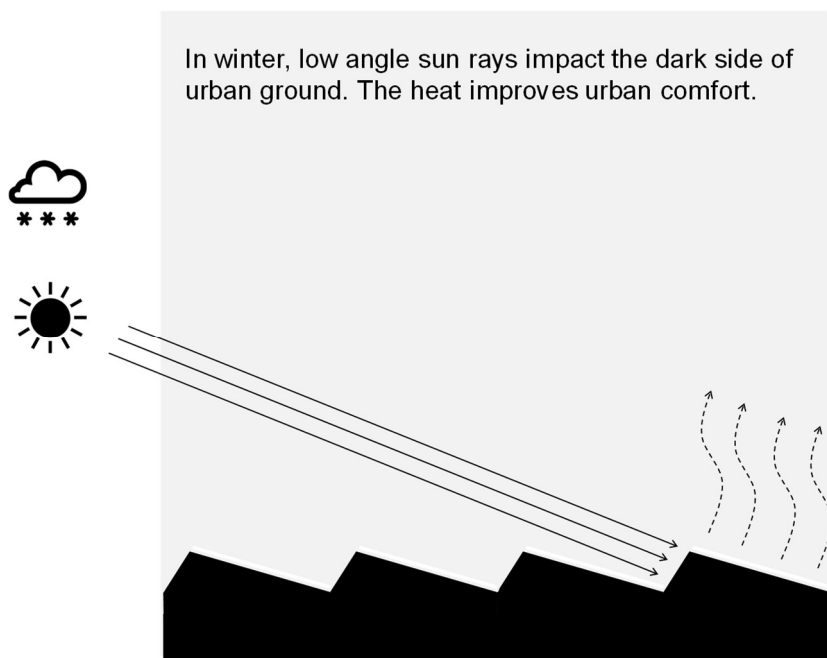
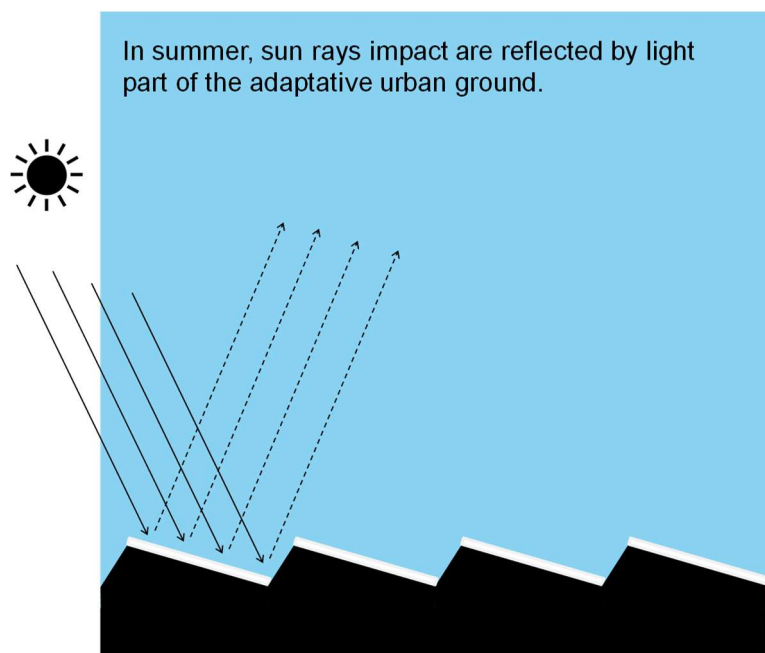
béton noir + peinture blanche sur face Nord



Photo drone c2ai, 30 mai 2017



Fig. 586. *Comportement du sol en hiver. Une coupe schématique à très petite échelle, en considérant que la hauteur des ondulations est millimétrique. Sur ce schéma, le sud est à gauche. En hiver l'angle des rayons solaires atteint la face nord du sol et chauffe le matériau. La chaleur réchauffe l'environnement urbain.*



#28 La Table Climatique

Comment transposer à petite échelle les enjeux énergétiques ? Et si le mobilier participait aussi à ce mouvement ? Comment traiter la problématique de l'économie d'énergie, du confort à l'échelle du mobilier plutôt qu'à celle du bâti ?

À l'origine

En quelques mots

Avant le lancement de l'initiative autour de la Table Climatique (Fig. 590) et les recherches conjointes avec Jean-Sébastien Lagrange depuis 2012, je m'interrogeais dans l'article rédigée pour l'*Architecture d'aujourd'hui* [1] sur la question de l'échelle des rénovations :

« [...] Le 'Changer d'ère' du bon docteur Ademe nous présente ses méthodes de vaccination énergétique. Au-delà de certaines rénovations longues, coûteuses et parfois aux résultats incertains, n'y a-t-il pas un gisement de micro-rénovations, d'écolo-bricolages qui nous permettraient de faire la chasse au gaspillage avec une efficacité d'investissement redoutable ? Condition nécessaire : un (très) bon diagnostic ou comment faire une simulation thermique dynamique pour tout le monde. La version web du Clim'Elioth est en cours : son interface et sa sortie graphique permettront un jour les arbitrages de tous les foyers (et/ou comment une bonne paire de doubles rideaux présente une très bonne efficacité d'investissement !). Double flux sur l'eau. On parle beaucoup de double flux pour récupérer nos calories perdues par le renouvellement d'air hygiénique... La consommation d'eau chaude dans les logements peut représenter la moitié de notre consommation chaleur. Et qu'advient-il de notre bain ou de notre douche à 35°C ? Une pompe à chaleur sous la baignoire [...] »

Ce texte était accompagné de quelques dessins dont l'un qui figurait le principe d'une récupération de chaleur sur une baignoire (Fig. 588). Dans la veine de ces réflexions à l'échelle du design, je dessinais aussi quelques hypothèses quant à conception de « faux-plafonds à eau » pour des bureaux (août 2011) ou la mise au point de double-rideau permettant d'augmenter le calfeutrement d'une baie [2].

Et si le mobilier faisait sa part ?

Alors que la question de l'économie d'énergie est reconnue comme un enjeu primordial (chapitre #16), le designer reste bien trop souvent en retrait laissant le soin aux architectes de traiter la question. De fait, on rappelle avec pertinence le poids déterminant des consommations énergétiques du bâtiment, comme l'importance de nos architectures dans les émissions de gaz à effet de serre, tant pendant leur durée d'usage que lors de leur édification ou leur transformation. Pour « faire sa part », l'urbanisme et l'architecture doivent faire leur révolution. Voilà ainsi notre point de départ. Et si le mobilier participait aussi à ce mouvement ?

Fig. 587. *La table climatique, prototype pour le VIA, 2015*

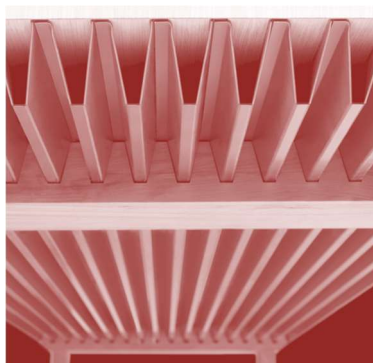
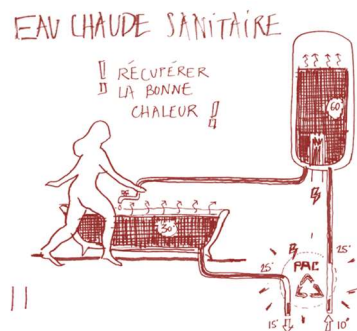


Fig. 588. *Croquis de la baignoire tiré de l'article dans l'Architecture d'aujourd'hui, 2011*



Des objets passifs

Non pas avec des solutions technologiques ou des matériaux sophistiquées [4] voire le paradigme de l'objet connecté : proposer des concepts simples, avec des matériaux courants concourant à l'efficacité et au bien-être de façon passive. Si, à l'échelle de l'habitat, l'intervention des architectes s'articule généralement autour de l'isolation des bâtiments : murs pignons, utilisation d' huisseries performantes, isolation des planchers et plafonds [3], nous souhaitons intervenir dans le champ de l'objet afin de proposer des solutions plus légères et flexibles, donc rationnelles et par la même incitatives. Nous voulons prouver que le designer peut, non seulement, apporter des réponses dans ce domaine mais également que l'échelle de l'objet peut parfois être plus viable que celle de l'architecture. En d'autres termes, un temps de retour énergie-carbone bien plus bref et moins risqué que les propositions classiques [1].

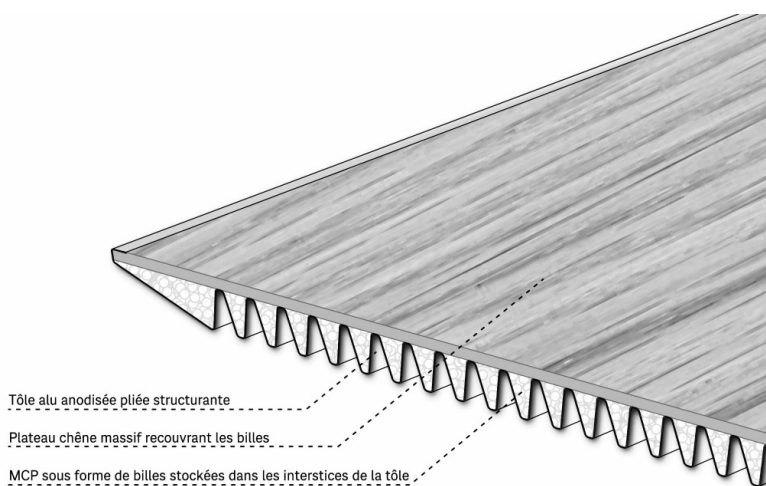


Fig. 589. Coupe sur la Table Climatique avec les matériaux à changement de phase dans son épaisseur

Le programme ZEF

Le programme Zero Energy Furniture

Trois principes encadrent notre recherche. Son but : dessiner des objets simples, efficaces et cohérents que nous avons qualifiés par l'acronyme ZEF (pour *Zero Energy Furniture*). ZEF sous-tend une intention didactique : et si l'objet participait à la médiation entre l'usage et son besoin énergétique, et si le design révélait une sensualité de la « juste frugalité » ? Les objets du programme ZEF seront volontairement passifs, composés de matériaux simples et aisément séparables : énergie et confort ne doivent faire oublier l'autre crise, celle des matériaux.

Fig. 590. *Fiche d'identité de la Table Climatique*

Table Climatique		
Listé	•	
Bureau	Pers. (avec ZEF)	
Lieu	Paris	
Rôle	Archi	•
	Ingé	•
Phase	Etudes	•
	Travaux	•
Type	IV.3	
	V	
	VI	•
	VII	
Temps	Début	2014
	Fin	-
	Livraison	2015
Q	1	
Volume	m ³	2
Energies	-	
Matières	Aluminium, bois, MCP	
Composition	Acier kg	-
	Verre kg	-
	Bois kg	1E=01
	Béton kg	-
	Autres kg	1E=01
	Masse unitaire kg	1.0E=01

La Table Climatique

La Table Climatique (Fig. 590) est une recherche conjointe avec Jean-Sébastien Lagrange, designer avec qui j'avais déjà collaboré pour la conception et la fabrication du démonstrateur de la montagne solaire en 2008 (#25). Au lancement de cette initiative conjointe, notre recherche s'est tout d'abord portée sur la possibilité d'importer des technologies ayant des caractéristiques prometteuses en termes d'économie d'énergie : les MCP (matériaux à changement de phase) qui ont la capacité de stocker une très grande quantité d'énergie thermique dans peu de volume.

Les matériaux à changement de phase

Ce matériau ayant des propriétés prometteuses, mais peu utilisé nous semblait intéressant à transférer de l'échelle du bâti à celle du mobilier pour deux principales raisons : contourner une réglementation restrictive peu incitative et contre-performance pour l'usage de ce matériau (i) ; rapprocher le matériau de l'utilisateur le rendant encore plus efficace et augmentant ainsi le confort d'usage (ii). En se basant sur cette technologie (Fig. 589), nous avons conçu une « Table Climatique » et réalisé un prototype avec un financement du VIA en 2014. Extrêmement simple dans son dessin et son système constructif, ce mobilier est tout entier dessiné autour de l'intégration de MCP au sein d'une tôle d'aluminium pliée anodisée. Accroissant le niveau de confort de ces bâtiments mal isolés à faible inertie, il permettrait d'y réaliser des économies d'énergie pouvant atteindre près de 60% en besoins chauds et de plus de 30% en besoins froids.

Design frugal

Nous avons également à cœur de créer des objets simples. Plutôt que d'utiliser des technologies complexes ou fictives, nous puisons notre inspiration dans des dispositifs climatiques et des objets ancestraux (*kotatsu* japonais, moucharabieh ...). Le projet doit pouvoir être aisé dans sa fabrication et son utilisation, privilégiant des dispositifs low-tech. Nos objets sont le résultat d'une vision frugale du design ou l'objet se doit d'être simple et économe à fabriquer, à réparer puis à démonter en fin de vie. Cette recherche d'économie de matière est l'application à plus petite échelle des apprentissages de l'architecture et de l'ingénierie des structures.

Objet passif mais vertueux

Enfin, il nous semble important que l'objet se suffise à lui-même et qu'il ne nécessite pas l'usage de l'électricité ou de branchement complexes. Nous souhaitons dessiner du mobilier autonome, évident dans son utilisation, passif dans sa consommation mais vertueux dans la redistribution qu'il fait de l'énergie. Nous affirmons la place d'objets non-connectés en contrepoint d'une mode vantant les mérites de la convergence de l'objet et du numérique. L'objet connecté sous-tend l'intégration de composants électroniques : nous réfutons a priori cette convergence conduisant en général à une accélération des obsolescences. Les objets ZEF seront éventuellement connectés mais selon une extension indépendante de l'essentiel.

Une première expérience, la table Climatique

La géométrie ondulée de l'aluminium (très bon conducteur) favorise les échanges thermiques entre la pièce et les MCP situés à l'intérieur du plateau. Les plis de cette feuille légère d'aluminium procurent également une excellente rigidité structurelle et une résistance importante. Le plateau peut ainsi avoir une très grande portée, un grand empattement entre ses points de support. Suite au prototype, nous avons réalisé des tests et mesuré les propriétés thermiques de la table et avons pu en conclure qu'elle pouvait être particulièrement performante lorsqu'elle équipait les espaces de bureau, les salles de réunion voire aussi les espaces de restauration ou d'enseignement.

Apporter de l'inertie quand l'architecture ne la propose pas

Accroissant le niveau de confort de ces bâtiments mal isolés à faible inertie, il permettrait d'y réaliser des économies d'énergie pouvant atteindre près de 60% en besoins chauds et de plus de 30% en besoins froids. Les pages qui suivent illustrent la méthodologie et l'évolution du projet étapes par étapes : des premiers dessins, en passant par la mise au point du prototype, jusqu'aux dernières esquisses cherchant à faire évoluer la gamme de mobilier vers d'autres usages (lampe permettant de stocker la chaleur dégagée par la source lumineuse, assises enveloppantes, systèmes de rangement ...). Ce premier projet et l'intérêt qu'il a pu susciter auprès des personnes à qui nous l'avons présenté a renforcé notre volonté de creuser cet axe de recherche.

Fig. 591. Premiers croquis de la table climatique



Synthèse énergie-matière

Pour un objet passif traditionnel

Des consommations de matière et d'énergie essentiellement liées à la production de l'objet passif (par exemple une chaise, un lit, une table : des objets qui ne sont pas connectés à un flux particulier comme une lampe avec l'électricité)

Pour la Table Climatique

Un remboursement à terme de l'énergie grise totale de l'objet grâce à son impact sur la réduction de la consommation d'énergie de l'espace dans lequel il est installé.

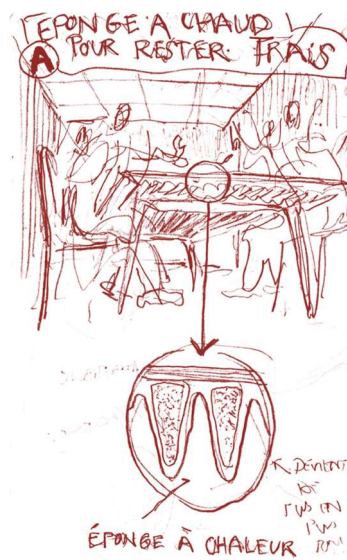


Fig. 592. Chronogramme énergie-matière d'un mobilier passif classique

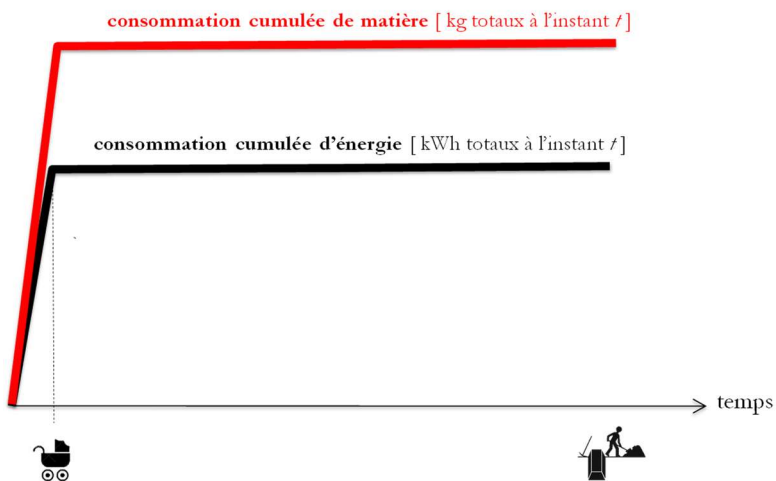
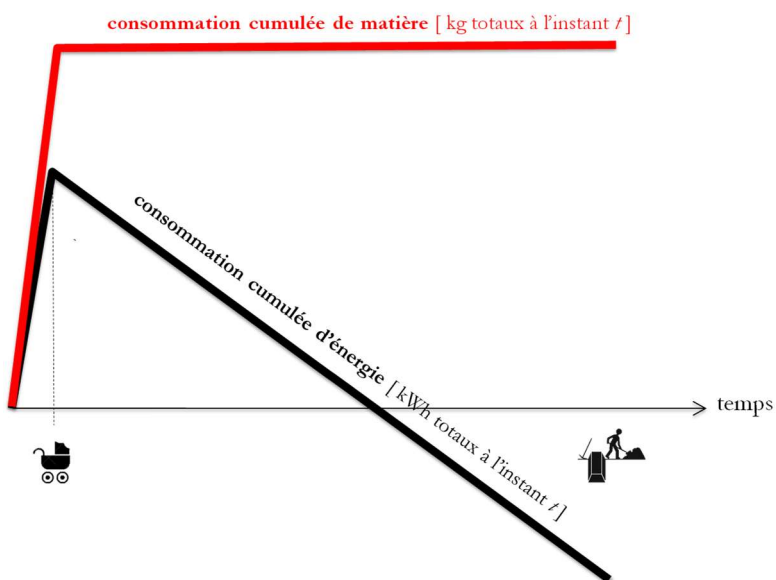


Fig. 593. Le principe du bilan énergie-matière pour le mobilier ZEF



Bibliographie

1. MENARD Raphaël, « Un Petit Dessin vaut mieux qu'un long discours » (p64 à 71), Perspectives Durables, *L'Architecture d'Aujourd'hui*, 2011
2. HESCHONG Lisa, *Architecture et Volupté thermique*, Marseille, Parenthèses, 1981
3. LEMPEREUR Hubert, « Histoire de l'isolation », feuilleton en sept épisodes, *d'Architecture*, 2017
4. BANHAM Reyner, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, Marseille, Parenthèses, 2011 [1969].
5. GARCIA-GERMAN Javier, *Thermodynamic Interactions. An Architectural Exporation into Physiologica, Material, Territorial Atmosphreres*, Actar, 2017
6. KAZAZIAN Thierry, *Design et développement durable : Il y aura l'âge des choses légères*, Victoires Éditions, 2003
7. KULA Daniel, TERNAUX Elodie, *Materiology. L'essentiel sur les matériaux et technologies à l'usage des créateurs*, Birkhäuser, Frame, 2013
8. MENARD Raphaël, *Work in Process, nouveaux bureaux, nouveaux usages*. Exposition au Pavillon de l'Arsenal. Article « Don Drapper, la voiture et le climat », p237 à p265, 2012

Fig. 594. *Photo par C.Clier du premier prototype de la Table Climatique.*



#29 Édicule de la place Marguerite

Une structure provisoire massivement en bois. L'objectif d'une neutralité carbone pour un objet à faible durée de vie potentielle. Les vertus du bois pour la modénature architecturale¹.

En quelques mots

En 2017, la RATP a mandaté Elioth et 169-architecture pour la conception d'un ouvrage de couverture provisoire de la sortie de métro située place Marguerite de Navarre à Paris. Cet ouvrage vient en remplacement et en attente de l'ouvrage prévu et conçu par les architectes Berger et Anziutti dans le cadre du réaménagement du pôle de transport des Halles (Fig. 595). Il est de nature provisoire, et vise à être déconstruit lorsque le projet initial aura reçu les approbations techniques nécessaires à sa réalisation (ATEX). La durée de service exacte de l'ouvrage n'est donc pas connue à ce jour. Ainsi le projet est pensé et réalisé de façon similaire à un ouvrage pérenne. Il s'inscrit toutefois dans un environnement bâti prévu pour le projet initial et adapté par la suite.

Fig. 595. *Perspective du projet initial de Berger et Anziutti*



Description

Un édifice simple et rapide à installer

L'ouvrage conçu est une couverture de conception à la fois simple et sobre. Sa qualité architecturale repose sur le soin et la finesse de réalisation des détails. Aussi le projet a été conçu dans le souci de proposer une grande simplicité constructive pour sa charpente primaire. Le schéma statique de l'ouvrage repose sur des principes de portiques auto-stables permettant un montage rapide de la structure. L'ouvrage a également été projeté en permettant à un recours important de pré-montage en atelier pour garantir vitesse et précision d'exécution.

Une structure temporaire, potentiellement pérenne

Le projet s'inscrit dans le cadre d'un projet initial voué à être réalisé une fois les obstacles techniques et administratifs levés. La couverture projetée est donc réfléchie pour d'une part s'intégrer et se combiner avec les éléments de l'ouvrage d'origine qui seront déjà réalisés lors de la mise en place de la couverture (longrine béton et chéneau notamment) et d'autre part pour pouvoir être déconstruit ultérieurement sans dommage pour les ouvrages en place et en permettant son éventuelle réutilisation sur un autre site. L'empreinte du projet initial est déjà présente : géométrie de la trémie (une quasi demi-ellipse) et le départ de la coque selon une géométrie de longrine béton à la géométrie complexe. Notre choix de parti consiste à

Fig. 596. *Fiche d'identité*

Édicule Place Marguerite de Navarre		
Listé		*
Bureau		169
Lieu		Paris
Rôle	Archi	*
	Ingg	*
Phase	Etudes	*
	Travaux	*
Type	IV.3	
	V	
	VI	
	VII	*
Temps	Début	2016
	Fin	2017
	Livraison	2017
Q		1
Volume	m ³	1280
Energies		-
Matières		Bois, acier, verre
Composition	Acier kg	6E+03
	Verre kg	6E+03
	Bois kg	2E+04
	Béton kg	-
	Autres kg	3E+02
	Masse usinaire kg	3,6E+04

¹ Avis partagé par l'architecte Vincent Parreira !

préservé le futur pour l'ouvrage initialement conçu. Les points d'ancrage de notre projet sur l'existant sont ponctuels et dans la plupart des situations selon le flanc extérieur de la longrine béton. Notre projet est donc d'abord un ouvrage « enveloppant » cet existant par l'extérieur. La simplicité constructive et la mise en œuvre choisie des matériaux permettent aussi d'envisager une installation pérenne. Les capacités portantes de la structure primaire sont importantes (gouvernées principalement par la sécurité au feu), la couverture est en verre feuilleté selon une géométrie simple et des principes de mise en œuvre courants. Concernant l'hypothèse d'une installation pérenne de cet ouvrage, les solutions constructives proposées n'ont aucun caractère temporaire : la durée de vie des différents composants et leur mise en œuvre (protection des poutres bois des intempéries notamment) est importante. Soulignons que vis-à-vis des prérequis attendus en termes de protection feu, seuls les éléments de charpente métallique supposent de renouveler périodiquement la couche de peinture intumescente. La structure métallique n'étant située qu'en façade, cet entretien pourra donc s'effectuer de façon extrêmement simple et sans recours à un plâtrage.

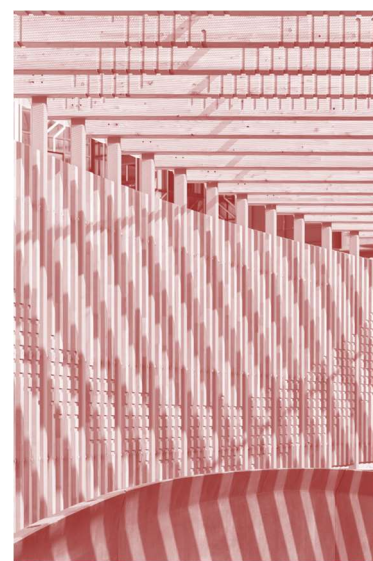
Une construction bas carbone recourant massivement à la construction bois.

Le projet de couverture temporaire s'inscrit dans la démarche de la Ville de Paris visant à promouvoir le réemploi et l'emploi des matériaux biosourcés. Elioth et 169-architecture ont défini des principes de mise en œuvre permettant de limiter l'impact carbone de cet édifice. Retenons que la structure porteuse de la couverture dont la portée maximale est d'environ 16 mètres sera réalisé en bois lamellé-collé. Aussi, la structure de façade, faisant office de garde-corps, sera constituée d'une ossature en bois sous forme d'une trame verticale de tasseaux. Cet ouvrage a été délibérément conçu selon les principes d'une construction à très bas carbone, encourageant des filières courtes d'approvisionnement. L'estimation des émissions CO₂ équivalentes relève que cet édifice est extrêmement performant du point de vue de son empreinte carbone : moins de 70kg eq. CO₂ par m² de couverture (et sans prendre en compte le stock carbone provisoire s'établissant lui à plus 100kg eq. CO₂ par m² couvert)

Une architecture souhaitant recourir au réemploi et à la réutilisation

Dans le cadre de ce projet, nous détaillons dans la suite de ce document des options ouvertes pour tenter de recourir parallèlement aux filières de réemploi et de réutilisation de matériaux. Ces deux options sont en particulier ouvertes tant pour la couverture en verre de l'ouvrage (i) que pour les montants de bois faisant office de garde-corps (ii). Bien que temporaire la couverture peut être vue comme un ouvrage durable, mais en plusieurs lieux. Le réemploi s'étend également à travers la réutilisation de matériaux de construction existants. Les éléments pourront être réalisés à partir de réemploi de matériaux se composent essentiellement des vitrages et des ossatures bois (poutre lamellé-collé et des montants en bois massif). Les entreprises sont donc invitées à proposer dans le cadre de leur offre (en plus de la version de base en neuf) des solutions de réemploi à partir de

Fig. 597. *Vue intérieure*



gissement de matériaux connus pour le maximum d'éléments de la couverture. L'ouvrage est également conçu de telle sorte à maximiser son réemploi éventuel.

Une architecture passive orientée vers le confort des utilisateurs.

Volontairement minimaliste, cet ouvrage souhaite offrir trois objectifs : favoriser la ventilation naturelle de l'espace souterrain et limiter les effets de courant d'air, souvent caractéristiques des sorties de métro. Grâce à sa façade à claire-voie, la convection naturelle est facilitée. Aussi, la sous-face de la couverture est ainsi largement ventilée en situation estivale par exemple et limite ainsi les micro-îlots de chaleur. La couverture vitrée fait aussi office de puits de lumière vers la partie souterraine et permet de diriger alors les usagers vers la sortie. Dans le souci du confort des piétons, la couverture en verre doit aussi permettre de faire le lien entre un espace souterrain essentiellement éclairé par l'éclairage artificiel, avec l'éclairage naturel de l'espace urbain. Nous souhaitons ainsi établir un seuil, une jonction douce entre ces deux univers lumineux. Ainsi, les poutres en bois agissent comme un paralume, permettant de diffuser la lumière. Au-dessus, nous spécifions des vitrages disposant d'une sérigraphie permettant de réduire légèrement la transmission lumineuse de cette couverture.

Un point de repère dans la ville

Enfin, quoique conçu initialement pour un usage provisoire, cet édifice devra aussi être une architecture appropriable par les usagers et les riverains. L'arrière de l'entrée fabrique une façade urbaine à dimension du passant et de la rue. Les tasseaux de bois, à claire-voie, offrent une transparence visuelle et apportent les qualités du matériau bois dans l'espace public. Pour marquer sa destination, informer de sa connexion aux réseaux de transport, la question de sa signalétique est à prendre en compte. Plutôt que d'ajouter des éléments signalétiques, le recours massif au bois et à la facilité de sa transformation en atelier autorise d'intégrer dans le projet la question signalétique. Ainsi la poutre au droit de l'entrée doit pouvoir être gravée pour mentionner le nom de l'entrée. Parallèlement, la découpe des tasseaux de bois permet aussi d'envisager des engravures. Selon cette possibilité, nous proposons de créer une anamorphose, signal visuel rappelant que cette entrée correspond à un chemin d'accès tant vers le RER que vers le Métro. Quelques mètres avant l'entrée dans la station, le piéton découvre alors les deux logos qui apparaissent dans son champ de vision.

*

Fig. 598. L'anamorphose

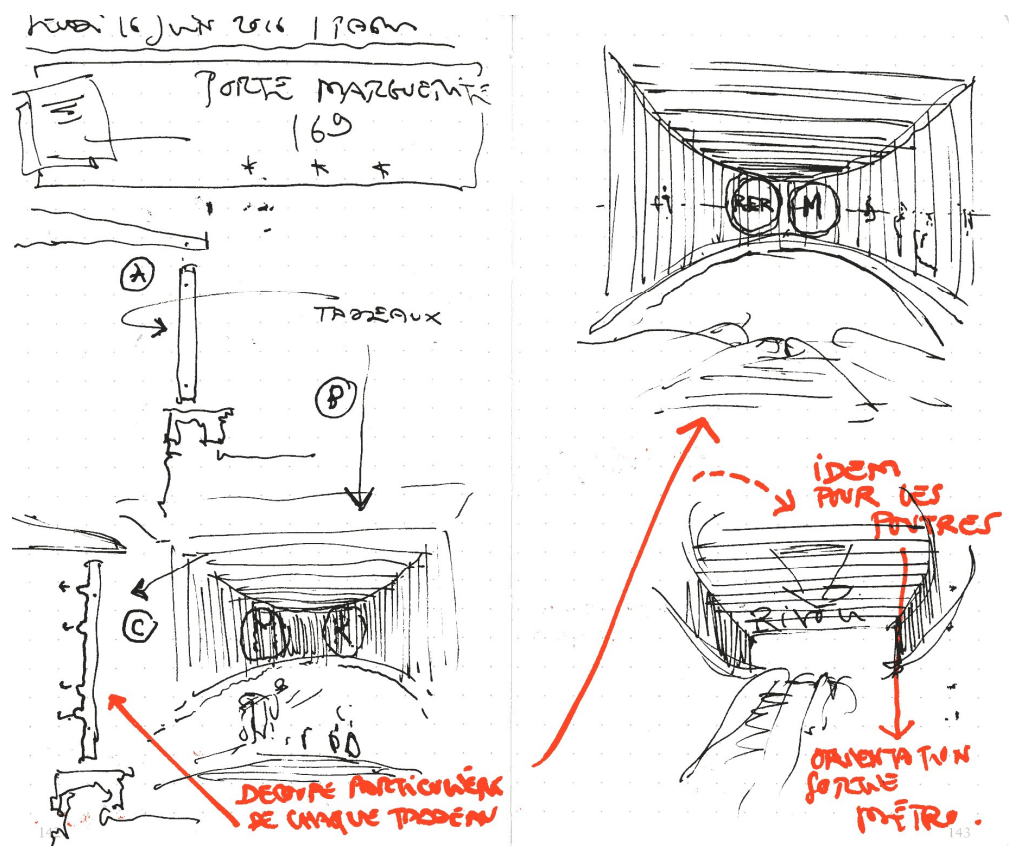


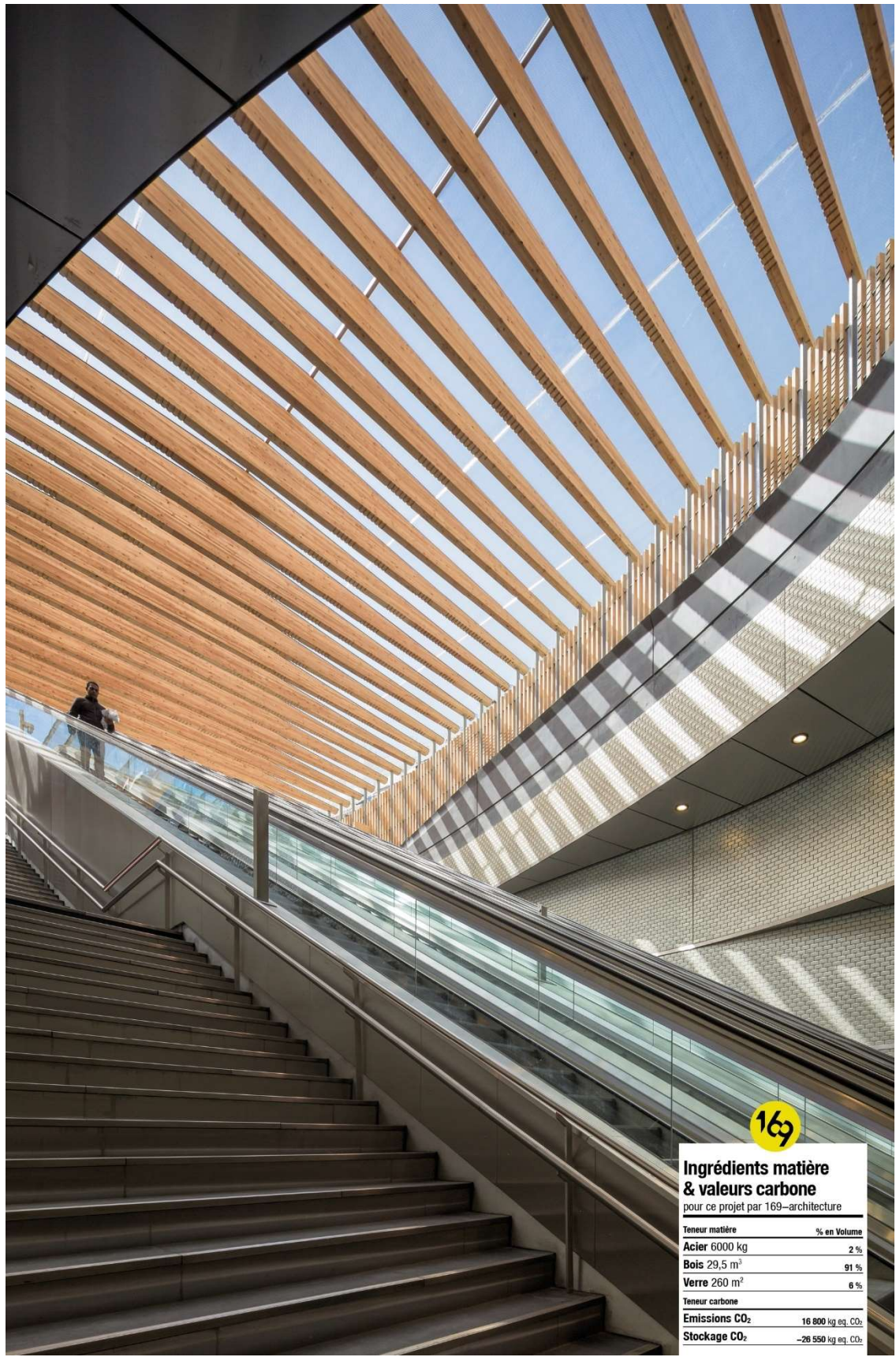


Fig. 599. Anamorphose gravée dans le bois. Photo et montage par Pierre L'Excellent.



#29

Édicule de la place Marguerite



Ingrédients matière & valeurs carbone

pour ce projet par 169-architecture

Teneur matière	% en Volume
Acier 6000 kg	2 %
Bois 29,5 m ³	91 %
Verre 260 m ²	6 %
Teneur carbone	
Emissions CO ₂	16 800 kg eq. CO ₂
Stockage CO ₂	-26 550 kg eq. CO ₂

Annexes

Notations et abréviations

\propto	proportionnel à
$\mathcal{O}()$	équivalent à (ou même comportement à l'infini)
W_{elec}	watt d'électricité (ou d'exergie pure)
W_{th}	watt thermique, de chaleur
$W_{\text{n.r.}}$	watt non renouvelable, issu des énergies fossiles ou fissiles
B_e	Bilan d'énergie sur la totalité du cycle de vie (en kWh par exemple)
B_m	Bilan de matières sur la totalité du cycle de vie (en kg par exemple)
B_{CO_2}	Bilan d'émissions de gaz à effet de serre (en kgCO ₂ eq par ex.)
S_e	Stock d'énergie (en kWh par exemple)
S_m	Stock de matières (en kg par exemple)
S_{CO_2}	Stock d'émissions de gaz à effet de serre (en kg CO ₂ eq par ex.)
f_e	Flux d'énergie (en W par exemple)
f_m	Flux de matières (en kg par an par exemple)
f_{CO_2}	Flux d'émissions de gaz à effet de serre (en kg par an par exemple)

Glossaire

Adaptation

Ajustement des systèmes naturels ou des systèmes humains face à un nouvel environnement ou un environnement changeant. L'adaptation aux changements climatiques indique l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques. On distingue divers types d'adaptation, notamment l'adaptation anticipée et réactive, l'adaptation publique et privée, et l'adaptation autonome et planifiée (GIEC, 2007).

Albédo

L'albédo d'une surface correspond à la fraction de rayonnement incident directement réfléchi par cette dernière. C'est le coefficient de réflexion dans le domaine visible (faibles longueurs d'ondes).

Analyse de cycle de vie

Méthode d'évaluation environnementale qui permet de quantifier les impacts d'un élément sur l'ensemble de son cycle de vie, depuis l'extraction de la matière première qui a servi à le produire jusqu'à son élimination ou transformation complète. L'analyse du cycle de vie ou *Life Cycle Assessment* (LCA) en anglais, recense et quantifie tout au long de la vie des produits, les flux physiques de matière et d'énergie associés aux activités humaines. L'analyse du cycle de vie est un outil d'aide à la décision. Les résultats qui en découlent peuvent être utilisés pour des besoins d'écoconception ou d'affichage environnemental, entre autres. L'objectif d'une ACV est de présenter une vision globale des impacts générés par les produits (biens, services ou procédés). Elle est souvent utilisée à des fins comparatives.

Anergie

Energie de « qualité nulle ». L'anergie est aussi égale à la différence entre énergie et exergie. L'exergie détruite au cours d'une réaction est appelé « anergie ». Ce phénomène est lié à l'entropie du système et de son environnement, qui ne peut qu'augmenter au cours d'une transformation réelle, non réversible. [renvoi à insérer]

Biosourcé

Un matériau biosourcé est un matériau qui, par le phénomène de photosynthèse, agit comme un puits de carbone et le séquestre, différant ainsi les émissions de gaz à effet de serre. Le stockage temporaire du carbone sur un temps long, comme le rend possible le bâtiment, est donc une réponse à la lutte contre le changement climatique à condition que la ressource soit gérée durablement.

Chaleur fatale

Rejets thermiques qui, s'ils ne sont pas utilisés au moment où ils sont disponibles, seront perdus.

Concentration (solaire à)

Technologie concentrant les rayons du soleil à l'aide de miroirs, afin de chauffer un élément qui permet en général de produire de l'électricité.

Constante solaire

La constante solaire exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de 1 m² située à une distance de 1 ua (unité astronomique, distance moyenne Terre-Soleil), exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence d'atmosphère. Pour la Terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère et elle vaut 1 360,8 W/m². Cette valeur ne doit pas être confondu avec la valeur moyenné sur la totalité du globe (340W/m²) et non plus avec la quantité d'irradiation solaire horizontale moyenne de 169W/m².

CO₂

Molécule de dioxyde de carbone. Molécule dont la concentration atmosphérique a dépassé les 400 ppm en 2015 et amplifiant le forçage radiatif terrestre. Molécule émise lors de la combustion d'hydrocarbures ou de biomasse. Contributeur essentiel au réchauffement climatique avec d'autres gaz à effet de serre.

Cycle de Carnot

Cycle thermodynamique théorique le plus efficace pour obtenir du travail à partir de deux sources de chaleur de températures constantes. Rendement de Carnot et exergie. Ordre de grandeur de la plage de rendement et valeur typique de 30% (et origine du coefficient de 2,58). Origine aussi de la complexité du système énergétique et des rapports entre énergie primaire et énergie finale.

Degré-jour unifié

Le nombre de degrés jours unifiés (DJU) est déterminé en calculant la différence entre la température de référence, 18 °C (pour le chauffage par exemple), et la moyenne de la température minimale et la température maximale du jour considéré.

Déplétion

Décroissance après un maximum

« Diminution de la quantité (de quelque chose). Dépréciation d'un gisement de pétrole résultant de son exploitation. Par extension de la production d'un ensemble de gisements. »

Diffus (rayonnement)

Le rayonnement global est la somme du rayonnement diffus et directe. Le rayonnement diffus est le rayonnement provenant de l'ensemble de l'atmosphère et qui dépend de sa composition. Il se diffuse en traversant l'atmosphère.

Direct (rayonnement)

Le rayonnement global est la somme du rayonnement diffus et directe. Le rayonnement direct est la composante directe qui atteint directement la surface terrestre et varie en fonction de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon.

Energie finale

L'énergie finale correspond à la quantité d'énergie nécessaire aux systèmes thermiques pour combler les besoins. C'est donc par définition la somme de l'énergie utile et des pertes dues aux rendements des systèmes. Où η_p , η_d , η_e expriment respectivement les rendements de production, de distribution et d'émission. Elle constitue le filtre dit « actif » et s'exprime en kWh/m².an. L'énergie finale sous-tend la définition du vecteur énergétique : électricité, gaz, bois, fuel etc. C'est pourquoi la somme d'énergies finales ne fait en général pas sens. Partie située à droite d'un diagramme de Sankey. En amont de l'énergie finale.

Energie grise (ou énergie incorporée)

Énergie nécessaire pour permettre la mise à disposition du bien ou de l'offre de service au consommateur final, en amont de l'usage.

« Une grande partie de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ qui en découlent est liée à la fabrication d'un matériau de construction, c'est-à-dire avant le début même des travaux de construction. Cette énergie nécessaire à la fabrication d'un produit est nommée énergie primaire (PEI) ou énergie grise. On distingue les sources d'énergie renouvelables (PEI r. - bois, hydroélectricité, soleil et éolien) et les sources d'énergie non renouvelables (PEI n.r. - pétrole, gaz, lignite et houille, uranium). L'énergie grise est un indicateur de l'utilisation des ressources et de l'impact environnemental lors de la fabrication d'un produit. On prend ainsi en compte l'extraction des matières premières ainsi que les ressources utilisées pour la production et le transport, jusqu'au produit fini en sortie d'usine. Une évaluation écologique devrait, autant que possible, mesurer le danger et l'impact environnemental d'un produit. D'autres indicateurs comme le potentiel de gaz à effet de serre (GWP - Global Warming Potential) et le potentiel d'acidification (AP-Acidification Potential) sont aussi considérés. Le potentiel de gaz à effet de serre mesure l'impact global et le potentiel d'acidification mesure l'impact local (par exemple sur les cours d'eau et les sols). »¹

Energie primaire

L'énergie primaire est le troisième et dernier maillon de la chaîne énergétique. Elle qualifie la source énergétique utilisée pour fournir l'énergie finale et quantifie la quantité d'énergie nécessaire à la production d'1 kWh. Elle qualifie donc le rendement de conversion global du mix énergétique national et s'exprime en kWh/m².an. Les coefficients de conversion utilisés dans ce document sont ceux présents dans la réglementation thermique 2012. Partie située à gauche d'un digramme de Sankey.

¹ Construire et rénover de façon responsable dans les alpes. Module 2 : l'énergie et le bâtiment. Climalp, une campagne d'information de la CIPRA

« Elle correspond à des produits énergétiques bruts tels que fournis par la nature : bois, charbon, pétrole, gaz naturel, uranium, pour les formes qui ne sont pas renouvelables ; énergie hydraulique, solaire, éolienne, biomasse, géothermie, marémotrice pour les formes renouvelables. »¹

Energie utile

L'énergie utile constitue la base de la chaîne énergétique. Elle exprime l'énergie nécessaire pour combattre les déperditions du bâtiment et maintenir les conditions climatiques de confort imposées par les températures de consigne. Lorsqu'il s'agit d'énergie thermique, elle prend généralement l'appellation de « Besoins chaud » ou « Besoins froid ». Cependant le « besoin » se distingue de « l'énergie utile » lorsqu'une dérive du bâtiment est autorisée. Typiquement, les bâtiments non refroidis (tels que les logements ou bâtiments d'enseignement) font l'objet de besoins de rafraîchissement même s'il est décidé de ne pas les combler de manière active. L'énergie utile dépensée est alors directement reliée à la performance de l'enveloppe et constitue le filtre dit « passif » du bâtiment et s'exprime en kWh/m².an.

« Energie dont dispose le consommateur final après la dernière conversion par ses propres appareils. Par exemple, la chaleur, l'énergie mécanique, la lumière... »²

Entropie

Fonction d'état qui sert à mesurer le degré de désordre d'un système. L'entropie d'un système isolé ou fermé augmente toujours.

« L'entropie est [...] une mesure de la dégradation ou dissipation d'énergie. »³

Exergie

En thermodynamique, l'exergie est une grandeur permettant de calculer le travail maximal que peut fournir un système à l'extérieur lorsqu'il se met à l'équilibre thermodynamique avec son environnement. Le travail maximum récupérable est égal à l'opposé de la variation d'exergie au cours de la transformation. Si l'énergie ne peut que se transformer sans jamais se détruire, l'exergie ne peut en revanche que diminuer dans les transformations réelles.

Forçage radiatif

Variation de l'éclairement énergétique net (différence entre l'éclairement descendant et l'éclairement ascendant, exprimée en W.m⁻²) à la tropopause due à une modification d'un agent externe du changement climatique, comme par exemple une modification de la concentration de dioxyde de carbone ou du rayonnement solaire. On calcule le forçage radiatif après avoir laissé les températures stratosphériques éventuellement perturbées se réajuster à l'équilibre radiatif-dynamique, en maintenant toutefois toutes les propriétés troposphériques à leurs valeurs non perturbées. Le forçage

¹ Ibid

² Ibid

³ *Thermodynamique de l'évolution*, p27

radiatif est qualifié d'instantané si l'on n'observe aucune modification de la température stratosphérique.

Fissile (énergie)

Energie primaire disponible lors de la fission de matières fissiles telles que l'uranium (division du noyau des atomes en d'autres noyaux plus légers).

Forçage radiatif

Impact énergétique équivalent des gaz à effet de serre sur le bilan énergétique terrestre, généralement exprimé en W par m². Variation de l'éclairement énergétique net (différence entre l'éclairement descendant et l'éclairement ascendant, exprimée en W m⁻²) à la tropopause due à une modification d'un agent externe du changement climatique, comme par exemple une modification de la concentration de dioxyde de carbone ou du rayonnement solaire. On calcule le forçage radiatif après avoir laissé les températures stratosphériques éventuellement perturbées se réajuster à l'équilibre radiatif-dynamique, en maintenant toutefois toutes les propriétés troposphériques à leurs valeurs non perturbées. Le forçage radiatif est qualifié d'instantané si l'on n'observe aucune modification de la température stratosphérique.

Fossile (énergie)

Energie primaire disponible produite à partir du soleil ancien et stockée sur terre depuis des milliers d'année (charbon, pétrole et gaz)

Gaz à effet de serre

Constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement infrarouge thermique émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. C'est cette propriété qui est à l'origine de l'effet de serre. La vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde nitreux (N₂O), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃) sont les principaux gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre. Il existe également des gaz à effet de serre résultant uniquement des activités humaines, tels que les hydrocarbures halogénés et autres substances contenant du chlore et du brome, dont traite le Protocole de Montréal. Outre le CO₂, le N₂O et le CH₄, le Protocole de Kyoto traite, quant à lui, d'autres gaz à effet de serre tels que l'hexafluorure de soufre (SF₆), les hydrofluorocarbures (HFC) et les hydrocarbures perfluorés (PFC). Voir à CO₂

Information

Dans son acceptation courante, l'information signifie une acquisition de connaissance. Au sens de « matière première néguentropique », l'information signifie également un pouvoir d'organisation¹.

¹ Tiré de *Le temps des physiciens*, p258.

Joule

Unité élémentaire de mesure d'énergie, de travail et de quantité de chaleur (symbole J). Un Joule correspond à la quantité d'énergie cumulée d'une puissance de 1W pendant une seconde.

Kilowattheure (kWh)

Quantité d'énergie correspond à une puissance de 1000 Watt pendant une heure. Correspond à 3,6MJ

Néguentropie

Mesure du degré d'organisation, d'ordre et d'information dans système, par opposition à la tendance naturelle des systèmes au désordre, l'entropie.

Puissance

Quantité d'énergie par unité de temps. Généralement exprimée en Watt.

« Pour un convertisseur donné (moteur, plante verte, turbine, ...), c'est l'énergie dépensée divisée par l'énergie utile utilisée. Ce rapport est toujours inférieur à 100%. »¹

Résilience

1. [Phys.] Capacité d'un matériau à retrouver son état initial à la suite d'un choc ou d'une pression continue. 2. [écon.] Capacité d'une zone à surmonter rapidement des chocs et perturbations économique. 4. [Urbain] Capacité d'une ville à faire face à un événement dévastateur avec le minimum de dommages possibles, à absorber les perturbations puis à recouvrer ses fonctions au plus vite.

Sankey (diagramme de)

Diagramme de représentation de circulation et de distribution de flux dans lequel le volume de ces flux est figuré par la largeur des flèches. [0]

Solaire ancien

Quantité d'énergie disponible sous forme de flux (rayonnement, vent) ou stockée sur terre sous forme de matières à taux de formation rapide (quelques mois à quelques années : agriculture, production de bois).

Solaire récent

Quantité d'énergie disponible sous forme de flux (rayonnement, vent) ou stockée sur terre sous forme de matières à taux de formation rapide (quelques mois à quelques années : agriculture, production de bois).

Solarisation

Part de sa consommation énergétique couverte par l'énergie solaire et ses dérivées, ou de manière opposée la part de consommation énergétique non couverte par le recours aux énergies fossiles et nucléaires.

¹ Ibid

TEP

Pour tonne équivalent pétrole. Unité de
du Temps 4, 5 et 6.

Watt

Unité de puissance.

Watt-crête (Wc)

Unité de puissance d'une installation photovoltaïque correspond à la puissance délivrée sous une irradiation normale aux panneaux de 1000W par m² et à une température de référence de 25°C. Le rendement d'un panneau peut en effet légèrement chuter avec des températures plus élevées.

Bibliographie

Sources bibliographiques

ADDIS Bill, *Building: 3000 years of design engineering and construction*, Phaidon Press, 2007

ADEME, *Impacts environnementaux de l'éolien français*, 2015

AKBARI, H., MENON S., and ROSENFELD, A.. *Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO2*, Climate Change, Vol 95, Joint Issue 3-4, 2009, DOI 10.1007/ s10584-008-9515-9.

AKBARI, H; POMERANTZ, M., and TAHA H. *Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas*, Solar Energy, Vol 70, N°3, pp. 295-310, 2001

ALEXANDER Christopher, *A city is not a tree*, 1965

ALEXEANDROFF Georges et Jeanne-Marie, *Architectures et Climats. Soleil et énergies naturelles dans l'habitat*, Berger-Levrault, 1982

ALLWOOD Julian M., CULLEN Jonathan, *Sustainable materials – with both eyes open : future buildings, vehicles, products and equipment – made efficiently and made with less new materials*, Cambridge, 2011

ALONZO Eric, *L'architecture de la voie. Histoire et théories*, Éditions Parenthèses, 2017

AMEISEN Jean-Claude, *Sur les épaules de Darwin. Les battements du temps*, Les liens qui libèrent, 2012

APUR, *Cahier n° 3 : Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1851 et 1914*, mars 2011

APUR, *Les îlots de chaleur urbains à Paris - Cahier n°4 : influence climatique des revêtements de sol à Paris*, juillet 2017

ARMAS Fernandez Armas Marcos, *Dimensionnement environnemental des structures, mémoire de projet de fin d'études*, École National des Ponts et Chaussées, 2008

ASHBY Michael F., *Materials Selection in Mechanical Design*, third edition, Butterworth-Heinemann, 2005 (première édition 1992)

AUGISEAU Vincent, *La dimension matérielle de l'urbanisation flux et stocks de matériaux de construction d'Ile-de-France*, thèse sous la direction de Sabine Barles, 2017

AUZANNEAU Mathieu, *L'or noir, la grande histoire du pétrole*, La Découverte, 2015

BAK Per, *How nature works. The science of self-organized criticality*, Copernicus, 1996

BALIAN Roger, « Physique fondamentale et énergétique : les multiples visages de l'énergie », cours donné par l'auteur (Service de Physique Théorique du CEA, Saclay) à la première École d'Été « e2phy » : *L'énergie sous toutes ses formes : données scientifiques, contraintes, enjeux*, 27-30 août 2001

- BANHAM Reyner, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, Marseille, Parenthèses, 2011 [1969].
- BARBER, Daniel A., *A House in the Sun, Modern Architecture and Solar Energy in the Cold War*, Oxford University Press, 2016
- BARDSLEY Henry, MENARD Raphaël, CONSIGNY François, VAUDEVILLE Bernard, *The Bery-Tolbiac Footbridge in Paris*, Footbridge 2002 Design and dynamic behaviour of footbridges, 2002
- BARLES Sabine, *Mesurer la performance écologique des villes et des territoires : Le métabolisme de Paris et de l'Île-de-France*, Rapport de recherche final pour le compte de la ville de Paris, 2004
- BARLES, S. « L'écologie territoriale et les enjeux de la dématérialisation des sociétés : l'apport de l'analyse des flux de matières », *Développement durable des territoires* 5(1), 2014
- BAUS Ursula, SCHLAICH Mike, *Footbridges: Construction, Design, History*, Birkhäuser, 2007
- BEJAN Adrian, LORENTE Sylvie, *The constructal law of design and evolution in nature*, The Royal Society, 2010
- BENEVOLO, *L'histoire de la ville*, Parenthèses, 1983
- BERNARD Jacques, *Energie solaire. Calculs et optimisations*, Ellipses, 2004
- BEUKERS et VAN HINTE, *Lightness: The Inevitable Renaissance of Minimum Energy Structures*, 010 Publishers, 1999
- BHATIA Gautam, *Laurie Baker. Life, Works and Writings*, Penguin Books, 1991
- BIHOUIX Philippe, *L'âge des low tech : vers une civilisation techniquement soutenable* Seuil, Anthropocène, 2014
- BOLTHAUSER Roger, RAUCH Martin, *Haus Rauch. A Model of Advanced Clay Architecture*. Birkhäuser, 2011
- BONNEUIL Christophe, FRESSOZ Jean-Baptiste, *L'Événement anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Seuil, 2013
- BORASI Giovanna, ZARDINI Mirko, *Désolé plus d'essence. L'innovation architecturale en réponse à la crise pétrolière de 1973*, Centre Canadien d'Architecture, 2008
- BORGES Jorge Luis, *la Bibliothèque de Babel*, 1941
- BOUET Paul, xxx
- BRAYER Marie-Ange, *Architectures expérimentales/1950-2012*, Collection du FRAC Centre, 2003
- BRUNNER Paul H., RECHBERGER Helmut, *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, Lewis Publishers, 2003
- BUCKMINSTER R. Fuller, *Operating manual for spaceship Earth*, 1969
- BUCKMINSTER R. Fuller, *Your private sky. The art of design science*, Lars Müller, 1999
- CHAREYRE Robert, *La maison autonome*, Collection Revue Alternatives (n° 3), Gallimard, 1978

CHOISY Auguste, *Histoire de l'architecture*, Bibliothèque de l'image, 1996 [1899]

CHOPPIN Julien, DELON Nicola (direction de l'ouvrage), *Matière Grise*, Pavillon de l'Arsenal, 2014

CIMINIERI D., MÉNARD R., MEUNIER G., CIUCCARELLI P., *Energetical streams visualization using interactive Sankey diagrams*, ISGG, 16th international conference on geometry and graphics, 4-8 août 2014

COCHET Yves, *Pétrole Apocalypse*, Fayard, 2005

COHEN-TANNOUJJI Gilles, SPIRO Michel, *La matière espace-temps, La logique des particules élémentaires*, 1986

COLOMBERT Morgane, *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*, Thèse de Doctorat, Université Paris Est, 8 décembre 2008.

CONTAL Marie-Hélène, REVEDIN Jana, *Sustainable design II, Vers une nouvelle éthique pour l'architecture et la ville*, Actes Sud, 2011

COOK Earl, "The Flow of Energy in an Industrial Society." *Scientific American*, vol. 225, no. 3, 1971, pp. 134–147., www.jstor.org/stable/24923122

COSSE Laurence, *La Grande Arche*, Gallimard, 2016

COSTA DE BEAUREGARD, Olivier, *Le Temps des physiciens*, ed. Aubin, 1996

DE ROSNAY, Joël, *Le microscope. Vers une vision globale*, Seuil coll. Points, 1975

DEKAY Mark, BROWN G. Z., *Sun, Wind, and Light: Architectural Design Strategies*. John Wiley & Sons, 2014

DENZER Anthony, *The solar house. Pioneering sustainable design*, Rizzoli, 2013

DEPLAZES Andrea, *Construire l'architecture. Du matériau brut à l'édifice. Un manuel*, Birkhäuser, 2013

DESSUS Benjamin, PHARABOD François, *L'énergie solaire, Que sais-je?*, 2002

DIAMOND Jared, *De l'inégalité parmi les sociétés : Essai sur l'homme et l'environnement dans l'histoire*, Paris, Gallimard, 2000, [éd. amér.1997]

ELIOTH, *Analyse de potentiel solaire. Toitures du Grand Paris*, étude réalisée pour l'APUR, 2015 [lien de téléchargement]

FATHY Hassan, *Construire avec le peuple (Architecture for the poor)*, Martineau, 1970

FERNANDEZ Dominique, *Tribunal d'honneur*, Grasset, 1997

FERNÁNDEZ-GALIANO Luis, *Fire and Memory: On Architecture and Energy*, Cambridge (Mass.), The MIT Press, 2001

FERRY Robert, MONOIAN Elizabeth, *A field guide to renewable energy technologies*, land art generator initiative, www.landartgenerator.org, 2012

FONTAINE Laetitia, ANGER Romain, *Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture*, Belin, 2009

-
- FRIEDMAN, Yona, *L'architecture de survie*, Ed. Casterman, 1978
- GARCIA-GERMAN Javier, *Thermodynamic Interactions. An Architectural Exporation into Physiologica, Material, Territorial Atmospheres*, Actar, 2017
- GEORGESCU-ROEGEN, Nicholas, *La décroissance, Entropie, écologie, économie* (1979), 2ème édition, 1995
- GHYKA Matila C., *Le Nombre d'or. Rites et rythmes pythagoriciens dans le développement de la civilisation occidentale*, Gallimard, 1976 (1931)
- GIEDON Siegfried, *Espace, temps, architecture*, La Connaissance, Bruxelles, 1968
- GIPE Paul, *Le grand livre de l'Éolien*. Éditions du Moniteur, 2007
- GOMBRICH Ernst, *Une brève histoire du monde*, Hazan, 1998
- GOURIERES Désiré Le, *Les éoliennes théories, conception et calcul pratique*. Goudelin, France: Éditions du Moulin Cadiou, 2008
- GRANDJEAN Alain, JANCOVICI, Jean-Marc, *Le plein s'il vous plait*, Seuil, 2006
- GRAWITZ Nicolas, *L'architecte à l'épreuve de la (trop) grande échelle*, Mémoire de HMONP, École d'architecture de la ville et des territoires de Marne-La-Vallée. Directeur d'étude, Raphaël Menard. 2017
- GUIBERT BRUSSET Cécile, HERZOG Lise, *Où vivent les hommes ? Une histoire de l'habitat*, Éditions du Patrimoine, 2017
- HAUSLADEN Gerhard, *Climate skin*, Birkhäuser Architecture, 2008
- HAWKING Stephen, *Une brève histoire du temps*, titre original *A brief history of time*, Bantam Books, 1988
- HEGGER Manfred, FUCHS Matthias, STARK Tommy, ZEUMER Martin, *Energy Manual: Sustainable Architecture*, Birkhäuser, 2008
- HEIBERG Richard, FRIDLEY David, *Our Renewable Future, Laying the path for one hundred percent clean energy*, Island Press, 2016
- HEISENBERG Werner, *La Partie et le Tout*, 1969
- HESCHONG Lisa, *Architecture et Volupté thermique*, Marseille, Parenthèses, 1981
- HESCHONG Lisa, *Thermal Delight in Architecture*. The MIT Press, 1979
- HILLS Richard L., *Power from wind, a history of windmill technology*. Axel Menges, 2007
- HINDRICHS Dirk, DANIELS Klaus, *Plus minus 20° / 40° latitude. Sustainable building design in tropical and subtropical regions*, Axel Menges, 2007
- HOPKINS Rob. *Manuel de Transition De la dépendance au pétrole à la résilience locale*. Montréal, Canada : écosociété, Guides Pratiques, 2010
- HUGHES, Thomas, *Networks of Power: Electrification in Western Society, 1880-1930*, Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1983
- IPCC, *Climate Change 2014 Synthesis Report, Fifth Assessment Report (AR5)*, 2014
- JENCKS, Charles, *Architecture of the jumping universe*, Academy Editions, 1995

- JONAS, Hans, *Pour une éthique du futur*, Paris, Payot, 1997
- KAHN Louis I., *Silence et Lumière, choix de conférences et d'entretiens, 1955-1974*, Edition du Linteau, 1996
- KAZAZIAN Thierry, *Design et développement durable : Il y aura l'âge des choses légères*, Victoires Éditions, 2003
- KHAN Ahmed Zaib, VANDEVYVERE Han, ALLACKER Karen, "Design for the Ecological Age: Rethinking the Role of Sustainability in Architectural Education", *Journal of Architectural Education*, 67:2, 175-185, DOI: 10.1080/10464883.2013.817155, 2013
- KIM Eunhye, BARLES Sabine, « The energy consumption of Paris and its supply areas from 18th century to present », *Regional Environmental Change*, 12(2), juin 2012, p. 295-310
- KNOWLES Ralph L., *The Solar Envelope: its meaning for energy and buildings*, Energy and Buildings, n°35, 2003, pp.15-25
- KÖNIG, Holger. *A Life Cycle Approach to Buildings: Principles, Calculations, Design Tools*, Munich: Edition Detail, 2010
- KOOLHAAS Rem, *Delirious New York*, 1978
- KRAUTHEIM, Mareike, PASEL Ralf, PFEIFFER Sven, SCHULTZ-GRANBERG Joachim. *City and Wind Climate as an Architectural Instrument*. Berlin: Dom, 2014
- KUHN Thomas, *The structure of scientific revolutions*. Chicago, USA : The University of Chicago Press, 1970 (1962)
- KULA Daniel, TERNAUX Elodie, *Materiology. L'essentiel sur les matériaux et technologies à l'usage des créateurs*, Birkhäuser, Frame, 2013
- LAUREANO, Pietro, *Water Atlas*, Bollati Boringhieri, 2001
- LE ROY Robert, « Quelles améliorations environnementales pour le bois ? », *Revue Malaquais n°5*, Actes Sud, septembre 2017
- LE TREUT Hervé, JANCOVICI Jean-Marc, *L'effet de serre: allons-nous changer le climat?* Flammarion, Champs Sciences, 2009. 217 p.
- LEMPEREUR Hubert, « Histoire de l'isolation », feuilleton en sept épisodes, *d'Architecture*, 2017
- LEVIN Sol, *Resturacion de Santo Domingo de Guzman, Oaxaca*, INAH, 1998
- LHOMME Jean-Christian, *Les énergies renouvelables*, Delachaux et Nieslé, 2004
- LOPEZ Fanny. *Le Rêve d'une déconnexion. De la maison à la cité auto-énergétique*, La Villette, 2014
- LOVINS Amory B., *Réinventer le feu*, traduction de Agnès El Kaïm, éditions de l'échiquier, 2013. Titre original *Reinventing Fire*, 2011
- LOVINS, Amory, Hunter, B. et L., von Weizsächer, Ernst, *Facteur 4, Rapport au club de Rome*, Mens, Terre vivante, 1997
- LYONS Arthur, *Materials for architects and builders*, Routledge, 2014 (1997)
- MAC KAY David J.C., *L'Énergie durable, pas que du vent*, Oxford, De Boeck, 2012. Titre original: *Sustainable Energy - Without the hot air*. Cambridge, UIT Cambridge, 2009

MAC LEAN Alex, *Over. Visions aériennes de l'American Way of Life : une absurdité écologique*, La Découverte, 2008

MAC NEILL, John R., *Du nouveau sous le soleil. Une histoire de l'environnement mondial au 20^{ème} siècle*, Seyssel, Éditions Champ Vallon, 2010. Titre original *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*, 2000

MACDONOUGH William, BRAUNGART Michael. *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, North Point Press, 2002

MAÏZIA Mindjid, *Topologie urbaine : l'énergie de la ville*, mémoire HDR de l'UTC, 2008

MALM Andreas, *L'anthropocène contre l'histoire. Le réchauffement climatique à l'ère du capital*, La Fabriques éditions, 2017

MAM Koliann, *Franchissement « Bas-Carbone », Dimensionnement Environnemental des passerelles*, mémoire de projet de fin d'études chez Elioth, École des Ponts ParisTech, 2017

MANIAQUE Caroline. *Go West - Des architectes au pays de la contre-culture*, Parenthèses, Architectures, 2014

MAROT Sébastien, « Hearthbreaking » dans le volume *Fireplace* du recueil *Elements of Architecture* (Marsilio, 2014) sous la direction de Rem Koolhaas

MASSON-DELMOTTE Valérie, LE TREUT Hervé, PAILLARD Didier, *Energie, effet de serre et changement climatique* dans *L'énergie à découvert*, sous la direction de Rémy Mosseri et Catherine Jeandel. CNRS Editions, 2013

MAZRIA Edward, *The Passive Solar Energy Book. A complete guide to passive solar home, greenhouse and building design*, Rodale Press, 1979

MEADOWS Donella H., RANDERS Jorgen, MEADOWS, Dennis. *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*, Rue de l'échiquier, 2012

MENARD Raphaël et al., *Guide d'interaction énergie-climat, volume 2, résilience climatique*, ISBN : 978-2-8760-2052-8, Egis, 106 pages, 2013

MENARD Raphaël et al., *Les infrastructures solaires urbaines, 2050, sous le soleil exactement*. Cours donnés dans le cadre de l'atelier de master. Synthèse des quatre projets rendus par les équipes d'étudiants et dix fascicules des cours associés à l'atelier autour des questions de futurs, de formes et d'énergie. EPFL, 2015.

MENARD Raphaël et al., *Petit manuel pratique de transition énergétique pour le bâtiment et la ville, Convictions et solutions d'ingénieurs-concepteurs*, Egis, 96 p, 2013

MENARD Raphaël et al., *Reforme, rapport final de recherche*, programme Ignis Mutat Res, 2014

MENARD Raphaël, (WO2007051932) *équipement pour produire de l'énergie électrique ou mécanique*, 2007

MENARD Raphaël, (WO2010130947) *éolienne à axe de rotation perpendiculaire à la direction du vent*, 2010

MENARD Raphaël, (WO2016034818) *structure de tour pour rotor d'éolienne à axe vertical*, 2015

MENARD Raphaël, (WO2018015642) *structure de tour pour supporter au moins un rotor d'éolienne à axe vertical*, 2017

MENARD Raphaël, « En finir avec le casse-tête énergétique », (p64 et65), *Ecologik*, n°10, aout-septembre 2009.

MENARD Raphaël, « Introduction au développement durable » (p134 à 139) et contributions dans le reste de l'ouvrage, *Naissances et renaissances de mille et un bonheur parisien*, J. Nouvel, JM Duthilleul et M Cantal-Dupart, Les éditions du Mont Boron, avril 2009, 638 pages.

MENARD Raphaël, « Le pic de l'architecture », pp161-168, *Matière Grise*, Direction de l'ouvrage Encore Heureux, architectes, Edition et distribution exclusive, Pavillon de l'Arсенal, 2014

MENARD Raphaël, « Les Infrastructures Solaires Urbaines », Dossier « Vers la ville symbiotique ? Valoriser les ressources cachées », *Tracés*, novembre 2013

MENARD Raphaël, « Mutations des programmes » (p27 à 31), dans *Architecture = durable*, Catalogue de l'exposition du Pavillon de l'Arсенal, 2008

MENARD Raphaël, « Un Petit Dessin vaut mieux qu'un long discours » (p64 à 71), *Perspectives Durables, L'Architecture d'Aujourd'hui*, 2011

MENARD Raphaël, AZZOPARDI Paul, LEMASSON Alice, TABASSO Edoardo, *Guide d'interaction énergie-climat, volume 1, enveloppes*, ISBN : 978-2-8760-2048-1, 134 pages, Egis, 2011

MENARD Raphaël, *Dense Cities in 2050: The Energy Option ?*, Summer Study Proceedings, ECEEE, 2011

MENARD Raphaël, DOSSIER Julien et al., *Paris, change d'ère. Stratégie de neutralité carbone de Paris en 2050*, Eliothe, 2016

MENARD Raphaël, FAYETTE Etienne, AZZOPARDI Paul, *The Solar Mountains*, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013, 2013

MENARD Raphaël, interview par Tony Côme pp128-131, relecture de l'Architecture d'Aujourd'hui de juillet 1936 consacré à l'électricité dans le bâtiment, *L'Architecture d'Aujourd'hui*, numéro 400, mai 2014

MENARD Raphaël, *La Renaissance des Fabriques. Un monde possible en 2050*, 2015

MENARD Raphaël, LAGRANGE Jean-Sébastien, Dessins & modèles 13/4450, *Table climatique et étagère climatique*, octobre 2013

MENARD Raphaël, *Le Classement, Mode d'Emploi*, Mémoire sur les organisations du savoir et les classifications bibliographiques, 67 pages, 2002

MENARD Raphaël, *Work in Process, nouveaux bureaux, nouveaux usages*. Exposition au Pavillon de l'Arсенal. Article « Don Drapper, la voiture et le climat », p237 à p265, 2012

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ENERGIE ET DE LA MER, MINISTÈRE DU LOGEMENT ET DE L'HABITAT DURABLE, *Référentiel « Energie-Carbone » pour les bâtiments neufs, Niveaux de performance « Energie – Carbone » pour les bâtiments neufs*, Octobre 2016

- MINISTÈRE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, I4CE, *Datalab*, Chiffres clés du climat. France, Europe et Monde, 2018
- MIT, *The Future of Solar Energy*, 2015
- MONOD Jacques, *Le Hasard et la Nécessité : Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, Éditions du Seuil, coll. « Points Essais », 1970
- MUROTANI Bunji. *Process: Architecture 40, Dialogue With Nature* Susumu Shingu, 1983.
- MUSGROVE Peter, *Wind Power*. Cambridge University Press, 2010
- MUTTONI Aurelio, *L'art des structures*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2004
- MVRDV et Huet, Sylvestre, *Climax*, catalogue d'exposition à La Grande Halle de la Villette, Adam Biro-Cité des sciences-Carré, 2003.
- NERDINGER Winfried, *Frei Otto Complete Works: Lightweight Construction Natural Design*, Birkhauser, 2005
- NEUFERT Ernst, *Les éléments de projet de construction*, 1936
- NEWMAN P., KENWORTHY J., *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook*, Brookfield, Gower Publishing, 1989
- NOSENGO Nicola, *L'extension des technosaures. Histoire de technologies oubliées*. Belin, 2010
- OKE, T R (1982) *The Energetic basis of the Urban Heat Island*, Q. J. R. Meteorol. Soc., 108, 1–23
- OTTO Frei, RASCH Bodo, *Finding Form: Towards an Architecture of the Minimal*, Edition Axel Menges, 1996
- PAULI Gunter, *The Blue Economy*, Paradlightnigm Edtions, 2010
- PERLIN John. *Let it Shine: The 6,000-Year Story of Solar Energy*, New World Library, 2013
- PIANO Renzo, *Carnet de travail*, Seuil, 1997
- PIANO Renzo, *La désobéissance de l'architecte*, Arléa, 2007
- PICON Antoine (sous la dir.), *L'art de l'ingénieur*, Ed. Centre Pompidou, 1997
- PICON Antoine, « La notion moderne de structure », article paru dans *Les Cahiers de la recherche architecturale*, n° 29, 3ème trimestre 1992, pp. 101-110
- PRIGOGINE Ilya, STENGERS Isabelle, *La Nouvelle Alliance, Métamorphose de la science*, Gallimard, coll. « Folio », 1986 [1979].
- PUMAIN Denise, *Lois d'échelle et mesure des inégalités en géographie*, 2007. <https://ress.revues.org/193>
- RADJOU Navi, *Innovation Jugaad - Redevenons Ingénieux !*, Éditions Diatèino, 2013
- RAGON Michel, *Les cités de l'avenir*, Planète, 1967
- REEVES Hubert, *Poussières d'étoiles*, Le Seuil, collection « Science ouverte », 1984

- REISER, *L'écologie*, Glénat, 2010
- REY Emmanuel, LUFKIN Sophie, *Green density*, PPUR, 2013
- REY Olivier, *Une question de taille*, Stock, 2014
- REYNOLDS John, *Windmills & watermills*. State Mutual Book, 1974.
- RICCIOTTI, Rudy, *HQE, les renards du temple*, Edition Al Dante / Clash, 2009
- RICE Peter, *An Engineer imagines*, Artemis, London, 1994
- RICE Peter, *Mémoires d'un ingénieur*, Éditions du Moniteur, Collection Architextes, 1998 (1994). 238 p.
- RIFKIN Jeremy, *La troisième révolution industrielle. Comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde*, Éditions Les Liens qui libèrent, 2012
- RIVALS Claude. *Le moulin à vent et le meunier dans la société traditionnelle française*. Editions Serg, 1976
- ROBY François, *Vers la voiture sans pétrole ?* EDP Sciences, 2006
- RODDIER François, *Thermodynamique de l'évolution, un essai de thermo-bio-sociologie*, Parole Éditions, 2012
- ROTOR, *Déconstruction et réemploi. Comment faire circuler les éléments de construction*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2018
- RUBIN Patrick et al., *Construire Réversible*, Canal Architecture, 2017
- RUDOLFSKY Bernard, *Architecture Without Architects: A Short Introduction to Non-Pedigreed Architecture*, University of New Mexico Press, 1987. 128 p.
- RUFIN, *Le parfum d'Adam*, Flammarion, 2007
- SALAT, Serge, *Les Villes et les Formes, sur l'urbanisme durable*, Paris, Hermann éditeurs, 2011.
- SALOMON Thierry, JEDLICZKA Marc, Association Négawatts, *Changeons d'énergie, Transition, mode d'emploi*, Arles, Actes Sud, 2013.
- SALOMON Thierry, *Manifeste NegaWatt*, coédition Actes Sud/Colibris - Collection : Domaine du possible, janvier 2012.
- SALVADORI Mario, *Comment ça tient ?*, Parenthèses, 2005
- SAMYN Philippe, *Étude de la morphologie des structures, à l'aide des indicateurs de volume et de déplacement*, Académie royale de Belgique, 2004
- SCHEER Herman, *L'autonomie énergétique, une nouvelle politique pour les énergies renouvelables*, Actes sud 2007
- SCHEER, Herman, *The energy imperative: 100 percent renewable now*, 2011
- SCHLAICH Jörg, BERGERMANN Rudolf, *Leicht Weit, light structures*, Prestel Verlag, 2005
- SCHLAICH Jörg, SCHIEL Wolfgang, *Solar Chimneys*, Encyclopedia of Physical Science and Technology. Third Edition, 2000
- SCHLAICH Jörg, *The Solar Tower- Electricity from the Sun and Supplement*, September 1995 (the 'Yellow Book')

-
- SCHNEIDER Eric D., SAGAN Dorion, *Into the Cool: Energy Flow, Thermodynamics, and Life*, University Of Chicago Press, 2006
- SERVIGNE Pablo, STEVENS Raphaël, *Comment tout peut s'effondrer. Petit manuel de collapsologie à l'usage des générations*, Seuil, Anthropocène, 2015
- SIJMONS. *kWh/m². Landscape and energy. Designing transition*, nai010 publishers, 2014
- SINAÏ Agnès, SZUBA Mathide, Chapitre 7, « Pour un aménagement permaculturel des territoires », *Gouverner la décroissance. Politiques de l'Anthropocène III*, SciencesPo Les Presses, 2017
- SINGH Madanjeet, *L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature*, Unesco France Loisirs, 1998
- SMIL Vaclav, *Energy Myth and Realities: Bringing Science to the Energy Policy Debate*, Washington, AEI Press, 2010
- SMIL Vaclav, *Harvesting the Biosphere, What We Have Taken from Nature*, MIT Press, 2013
- SMIL Vaclav, *Power Density: A Key to Understanding Energy Sources and Uses*, MIT Press, 2015
- SOUVIRON Jean, *Producing Transparency, An energy and material flows analysis of glazing and membrane façades and their potential of hybridisation*, mémoire de fin d'études des Ponts Paristech, directeur d'études Cyril Douthe, 2016
- STEVENS Peter S., *Les formes dans la nature*, Seuil, 1978
- THOMPSON D'Arcy, *On Growth and Form* (en français *Forme et Croissance*), 1917
- TROMEUR Eric, MENARD Raphaël, « Changement climatique : les besoins en climatisation en France : un enjeu majeur en 2050 », *Le Moniteur*, 25 Novembre 2011.
- TROMEUR Eric, MENARD Raphaël, BAILLY Jean-Baptiste, SOULIE Christophe, *Urban vulnerability and resilience within the context of climate change*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 2012
- VITRUVÉ, *De architectura*
- WHY FACTORY, *Green Dream: How Future Cities Can Outsmart Nature*, NAI Publishers, 2011
- WIGGINGTON Michael, *Glass in architecture*, Phaidon
- WILLEMIN Véronique, *Guy Rottier, Architecte*, Éditions Alternatives, 2008
- WINGERT Jean-Luc. *La vie après le pétrole, de la pénurie aux énergies nouvelles*. Paris, Éditions Autrement, Frontières, 2005
- WOLFRAM Stephen, *A new kind of science*, Wolfram Research, 2002
- WRIGHT David, *Manuel d'architecture naturelle*, Parenthèses, Habitat / Ressources, 2015 (2004)
- ZALASIEWICZ Jan et al., *Scale and diversity of the physical technosphere: A geological perspective*, The Anthropocene Review, 2016

Sources filmiques et audiovisuelles

- ABBOTT Jennifer, ACHBAR Mark, *The Corporation*, documentaire canadien basé sur le livre *The corporation, the pathological pursuit of profit and power* de Joel Bakan documentaire, 2003
- ANDERSON Paul Thomas, *There Will Be Blood*, film d'après le roman *Pétrole ! (Oil!)* écrit par Upton Sinclair en 1927, 2007
- ANNAUD Jean-Jacques, *La guerre du feu*, film adapté du roman éponyme de J.-H. Rosny aîné (1909), 1981
- CERASUOLO Enrico, *Last Call*, documentaire, 2013
- CUARÓN Alfonso, *Les fils de l'homme*, 2007
- DELESTRAC Denis, *Le sable, enquête sur une disparition*, documentaire, 2013
- DION Cyril, LAURENT Mélanie, *Demain*, 2015
- EAMES, Charles, Ray, *Powers of Ten*, documentaire 9 minutes, 1977
- FLEISCHER Richard, *Soleil vert*, film, 1973
- FOX Louis, *L'Histoire des choses (The Story of Stuff)*, documentaire d'après l'œuvre de Annie Leonard, 2007
- GAGHAN Stephen, *Syriana*, film, 2005
- GUGGENHEIM Davis, *Une vérité qui dérange*, documentaire, 2006
- HILLCOAT John, *The Road*, film d'anticipation post-apocalyptique américain réalisé tiré du roman du même nom écrit par Cormac McCarthy, 2009
- PAINE Chris, *Who Killed the Electric Car?*, documentaire, 2006
- PENN Sean, *Into the wild*, 2008
- REGGIO Godfrey, *Koyaanisqatsi*, 1983
- REGGIO Godfrey, *Naqoyqatsi*, 2002
- REGGIO Godfrey, *Powaqqatsi*, 1988
- RIDLEY Scott, *Seul sur Mars* (titre original : *The Martian*), 2015
- RIEDELSHEIMER Thomas, *Breathing Earth, Susumu Shingus Traum*, documentaire, 2012
- ROBIN Marie-Monique, *Les moissons du futur*, 2012
- ROBIN Marie-Monique, *Qu'est-ce qu'on attend ?* documentaire, 2016
- SERREAU Coline, *La belle verte*, 1996
- SERREAU Coline, *Solutions locales pour un désordre global*, documentaire, 2010
- STANTON Andrew, *Wall-e*, film d'animation, 2008
- VAN SANT Gus, *Promised land*, 2013
- VARDA Agnès, *Les Glaneurs et la Glaneuse*, documentaire, 2000

Synthèse publications personnelles

2002

The Bercy-Tolbiac Footbridge in Paris

Bardsley H., Menard R., Consigny F., Vaudeville B., *The Bercy-Tolbiac Footbridge in Paris*, Footbridge 2002, Paris.

Cet article décrit les investigations qui ont été conduites pour augmenter le confort vibratoire de la passerelle Simone de Beauvoir, ouvrage métallique de près de 200 mètres de portée à Paris. Ce document résume une partie des investigations mathématiques que j'ai pu mener lorsque je travaillais sur ce projet chez RFR, en particulier sur l'identification d'une valeur optimale d'amortissement à intégrer dans cet ouvrage de grande portée.

Il détaille également la solution proposée permettant l'intégration discrète des amortisseurs dans l'ouvrage, permettant ainsi de préserver l'élégance technique et architecturale de ce franchissement emblématique.

2003

Mémoire de diplôme d'architecte : Le Classement, Mode d'Emploi

Menard R., *Le Classement, Mode d'Emploi*, Mémoire sur les organisations du savoir et les classifications bibliographiques, 67 pages, décembre 2002.

En prélude au projet de diplôme d'architecte DPLG, ce mémoire explorait l'histoire et la « phylogénèse des taxinomies du savoir ». Concernant les classifications bibliographiques, cette recherche revisitait l'émergence des classifications multidimensionnelles, dont les qualités et intérêts ont été largement supplantées au cours du 19^{ème} et 20^{ème} siècle par les classifications unidimensionnelles : la classification Dewey et la classification décimale universelle.

En amont du projet architectural d'une bibliothèque universitaire scientifique pour le campus de Jussieu, ce mémoire préfigurait le réemploi de la classification mis au point par Claude Braftfort –un membre éminent de l'Oulipo – lors de son expérience au sein du CEA.

Le mémoire concluait ainsi sur le canevas bidimensionnel, départ d'une « grille manhattanienne » pour une bibliothèque composée de tours de livres, et dont la matrice tridimensionnelle correspondrait à un ordonnancement didactique du savoir.

2006

Collection

Collection, publication issue du workshop « *A la recherche d'éléments imaginaires de l'architecture* » organisé par Encore Heureux. *Metavilla*, Pavillon de la France, 10^{ème} exposition internationale d'architecture de Venise, Septembre 2006.

2006

Brevet pour les Montagnes solaires

Titre du brevet : « *Equipement pour produire de l'énergie électrique ou mécanique.* ». Inventeur : Ménard R.

L'invention concerne un équipement (1) pour produire de l'énergie électrique ou mécanique, du type comprenant un espace (4) défini par une couverture (8) d'une part et le sol (16) d'autre part, pour la production d'air réchauffé sous l'effet du rayonnement solaire, cet espace (4) s'ouvrant sur l'extérieur par au moins une entrée d'air (5) à la surface du sol (16) et par au moins un conduit d'évacuation d'air (6), l'équipement comprenant au moins une turbine (7) disposée entre ladite couverture (8) et ledit conduit d'évacuation d'air (6), ladite au moins turbine (7) étant destinée à transformer la puissance cinétique de l'air existant à la jonction dudit espace (4) et du conduit d'évacuation d'air (6) en énergie électrique ou mécanique, ledit équipement (1) étant caractérisé en ce que le conduit d'évacuation d'air (6) est formé par un conduit longeant au moins partiellement un relief naturel s'élevant au-dessus de l'espace (4).

2007

So Watt, du design dans l'énergie

Exposition du concept et de la maquette de Wind-it par Elioth et Encore Heureux. Hors-série coédité avec Beaux-Arts Magazine.

Exposition à l'Espace EDF Electra du 25 mai au 9 septembre 2007. Extrait du communiqué de presse de l'exposition :

« *Qui peut aujourd'hui imaginer vivre sans électricité ? Indissociable de notre quotidien, il faut pourtant commencer à la préserver. Comment adopter un comportement plus économe et raisonné alors que l'électricité est parfaitement immatérielle, invisible, impalpable? C'est à cette question que plus de trente designers venus du monde entier - Bless, Solarlab, 5.5 designers, Positive Flow... - tentent de répondre au travers d'une cinquantaine de projets. Les six thématiques qui composent l'exposition permettent de créer un rapport responsable à la consommation de l'énergie électrique. Grâce au design, celle-ci devient visible, tangible et inspire de nouvelles esthétiques. [...]*

Des objets attirants, étonnants, intelligents. So Watt ! permet de découvrir des projets pour la plupart prospectifs, parfois utopiques, certains déjà produits. Elle montre qu'il y a de plus en plus de créateurs qui s'intéressent à la question de l'énergie, qu'elle suscite déjà des projets et que beaucoup reste à inventer... Si les approches et les propositions formelles sont très diverses, une chose est sûre, les objets porteurs d'un autre rapport à l'énergie doivent être attirants, étonnants, intelligents. [...]

Avec ingéniosité, les designers apportent des solutions incroyablement simples ou remarquablement évoluées. On a choisi ici de se situer du côté du désir, de motiver par l'envie les changements nécessaires. Et sur ce point, le design a un rôle important à jouer. On peut s'attaquer à la question de la maîtrise énergétique et du développement des énergies renouvelables en faisant évoluer la perception de la contrainte et en la transformant en opportunité de création.

Les créateurs présents dans l'exposition (Afrique du Sud, Allemagne, Canada, Etats-Unis, Hollande, France, Grande-Bretagne, Italie, Pays-Bas, Russie, Suède), Art Lebedev (Yegor Zhgun), Gilles Belley, Bless, François Brument, Design Council (Colin Burns, Jude Codner, Kirstie Edmunds, Nick Morton, Robin Murray, Chloe Myers, Chris Vanstone and Jennie Winhall), Diy Kyoto, EDF Design, Elioth + Encore Heureux, Eton Freeplay, Front, Giffin'Termeer, Horizon Fuell Cell, Michael Jantzen, Magenn, Bruno Martinet, Normal Studio, O2 France, Elodie Poidatz, Positive Flow, Radi Designers, François Roche, Solarlab, Static! (Christina Öhman, Ramia Mazé, Sara Backlund, Anders Ernevi, Anton Gustafsson, Magnus Gyllenswärd, Sara Ilstedt, Hjelm, Margot Jacobs, Andreas Kvarnström, Mattias Ludvigsson, Andreas Lykke-Olesen, Ulrika Löfgren, Samuel Palm, Johan Redström, Damian O'Sullivan, Skysails, Solarjo, Alexandre Tonneau, Vincent Vandenbrouck, 5.5 Designers. »

2008

Le Moniteur

Construire durable, hors-série Le Moniteur, mars 2008, « Elioth, tête chercheuse de solutions constructives », « *Instaurer une taxe carbone sur toutes les constructions* », p154

Architecture = durable

Menard R., *Mutations des programmes* (p27 à 31), dans *Architecture = durable*, catalogue de l'exposition du Pavillon de l'Arsenal, 2008

Cet article de cinq pages, en français et en anglais, a été commandé et rédigé dans le cadre de l'exposition « Architecture = durable ». Il intègre le catalogue de l'exposition, édité par le Pavillon de l'Arsenal et comporte quelques dessins et graphiques réalisés par l'auteur. Ce texte est le prélude à plusieurs théma-

tiques futures de recherche et d'écriture : hauteur morphologique et capacité d'autonomie énergétique, bilan environnemental global en comptabilisant habitat et transport, formes solaires urbaines, évolutivité programmatique d'une architecture... Exposition au Pavillon de l'Arsenal du 24.06.2008 au 02.11.2008. Commissariat scientifique : J. Ferrrier, architecte. Scénographie Block architectes. Extrait du communiqué de presse du Pavillon de l'Arsenal :

« L'exposition « Architecture = durable » donne la parole aux architectes qui, au travers de projets en cours de fabrication en Ile-de-France, expriment leur démarche et leur manière de concevoir l'architecture face aux enjeux du développement durable. Au travers d'une analyse détaillée de ces 30 projets, l'exposition présente les dispositions et solutions envisageables et envisagées à différentes échelles. Les sept critères d'analyse pour décrypter ces projets ont été établis au regard de 80 exemples européens également présentés dans l'exposition. Urbanité, implantation, morphologie, matérialité, spatialité, systèmes et performances permettent à chaque visiteur de comprendre les questions liées à l'environnement dans une vision globale qui met les dispositifs techniques en situation dans un contexte urbain et qui, réciproquement, prend la ville dense comme base d'une approche nouvelle du projet. »

2009

Ecologik

Menard R., *En finir avec le casse-tête énergétique*, (p64 et65), *Ecologik*, n°10, aout-septembre 2009.

Article de deux pages. Ce texte interroge la difficulté de traduire l'efficacité énergétique avec l'indicateur de la consommation annuelle exprimée en kWh d'énergie primaire par m².

Naissances et renaissances de mille et un bonheur parisien

Menard R., *Introduction au développement durable* (p134 à 139) et contributions dans le reste de l'ouvrage, *Naissances et renaissances de mille et un bonheur parisien*, J. Nouvel, JM Duthilleul et M Cantal-Dupart, Les éditions du Mont Boron, avril 2009, 638 pages.

Élaboré par l'équipe Jean Nouvel, Jean-Marie Duthilleul et Michel Cantal-Dupart dans le cadre de la consultation de 2008 pour le « Grand Pari(s) », j'ai participé à la rédaction de cet ouvrage et plus particulièrement contribué par les textes et quelques dessins à la section dévolue au développement durable. Ai en particulier question dans ce texte : de l'intégration des énergies renouvelables en situation urbaine (le dessin d'un Parc de la Courneuve transformé en champs de culture énergétique : éolien, solaire thermique et stockage intersaisonnier, production de biomasse. Sont également évoqués : les stratégies développées permettant de réduire l'empreinte écologique de la métropole, préparer le

« macro-urbain » au changement climatique, repenser la place de l'automobile.

Pour Wind-it

Titre du brevet : « Éolienne à axe de rotation perpendiculaire à la direction du vent. ». Inventeur : Ménard R.

2010

Recherche PUCA

Maïzia M, Houdant N. , Joliton D., Rimmel L., Menard R., Berge S. , Teller J., Viejo Garcia P., Lacoste G., Lerolles H., *Les gisements du développement urbain : analyse quantitative à l'horizon 2050 des consommations énergétiques et des émissions de CO₂ des tissus urbains*, PUCA, 2010.

Dans le cadre de cette recherche, Elioth avait plus particulièrement contribué à l'estimation de la demande de chauffage dans plusieurs configurations de tissus urbains.

2011

L'Architecture d'Aujourd'hui

Menard R., *Un Petit Dessin vaut mieux qu'un long discours* (p64 à 71), Perspectives Durables, L'Architecture d'Aujourd'hui, 2011

Article de huit pages en français et traduit en anglais comportant dessins de l'auteur. Rédigé sous forme de dessins légendés, ces croquis et ces textes interpellent sur la nécessité d'innover pour les solutions d'intégration des énergies renouvelables en ville (le premier dessin montre un village dont le second clocher est en fait une tour solaire, concentrant l'ensemble des rayonnements issus des miroirs pilotés de chaque bâti).

Un autre dessin reprend une thématique déjà évoquée dans l'article de « Architecture = durable », celle du « plafond de positivité » : l'incapacité physique des bâtiments hauts à être à énergie positive. L'article se termine par une piste d'invention qui reste à développer : la récupération de chaleur sur nos baignoires !

Dense Cities in 2005

Menard R., *Dense Cities in 2050: The Energy Option ?*, Summer Study Proceedings, ECEEE, juin 2011.

Cet article, en anglais et de quinze pages, examine les corrélations liées à la densité urbaine et à l'énergie. Dans le prolongement des travaux menées par Newman et Kenworthy, il réinterroge la relation densité et demande individuelle d'énergie. Ce texte scénarise l'évolution de l'efficacité énergétique du parc

automobile, et de l'autre, la diffusion des énergies renouvelables. Cet article conclue sur une inversion possible et probable à horizon 2050 de la relation liant densité et demande énergétique nette des territoires.

Il est un prélude à la méthodologie développée plus tardivement dans le cadre de *Réforme*, programme *Ignis Mutat Res*. Ce document fait aussi un premier état des gisements renouvelables disponibles à l'échelle territoriale et propose une quantification de l'offre énergétique ainsi générée.

Changement climatique et incidences énergétiques

Tromeur E., Ménard R., Soulié C., and Toubin M., *Resilis project: urban resilience within the context of climate change*, 2nd World Progress on Cities and Adaptation to Climate Change, ICLEI, Resilient Cities 2011, Bonn, Germany, 3-5 June, 2011.

Cet article fait état des résultats provisoires issus du programme de recherche *Resilis* (programme ANR).

Guide d'interaction énergie-climat, volume 1, enveloppes, ISBN : 978-2-8760-2048-1, 134 pages, Novembre 2011. Ménard R., directeur de publication.

L'ambition de cet ouvrage consiste à proposer un outil de conception et de dimensionnement rapide d'une enveloppe, sans avoir recours à une simulation thermique-dynamique. Fondé sur la rapidité de calcul de l'outil ClimElioth développé depuis 2005, il propose des abaques de calculs énergétiques selon plusieurs scénarios programmatiques et ce, pour différents choix de parti d'enveloppe (fraction vitrée, isolation moyenne etc.) et de contrôle climatique (mise en œuvre ou non de ventilation naturelle, valorisation ou non de l'inertie constructive etc.).

Ce guide constitue un outil d'aide à la décision sur les choix de partis d'enveloppe au regard des performances énergétiques, en phase amont des projets de bâtiment. Il s'adresse principalement aux concepteurs désireux d'orienter leur projet vers une démarche de sobriété énergétique et de conception responsable.

2012

E. Tromeur, R. Ménard, J.-B. Bailly, and C. Soulié, *Urban vulnerability and resilience within the context of climate change*, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 31 mai 2012.

Cet article comporte onze pages et est rédigé en anglais. Il a été publié en 2012 dans la prestigieuse revue *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Ce texte synthétise une partie des résultats

de *Resilis* (recherche effectuée dans le cadre du programme Villes Durables de l'Agence Nationale de la Recherche), en particulier autour de la problématique de la résilience énergétique associée au réchauffement climatique : quels incidences du changement climatique sur la demande énergétique du bâti et quelles conséquences sur le confort des espaces extérieurs ?

Ce papier expose la méthodologie employée pour évaluer les évolutions tendanciennes des besoins chauds et froids dans le futur et ce, dans différentes géographies. Cet article met plus particulièrement en lumière l'augmentation tendancielle importante des besoins en rafraîchissement dans plusieurs agglomérations françaises. Pour plus d'informations, se reporter également à la section « Ouvrages. », *Guide d'interactions énergie-climat, vol 2*.

Work in Process. Nouveaux bureaux, nouveaux usages.

Menard R., « *Don Drapper, la voiture et le climat* », article p237 à p265 du catalogue de l'exposition *Work in Process - Nouveaux bureaux, nouveaux usages*, 2012

Cet article de vingt-neuf pages, en français et en anglais, a été commandé et rédigé dans le cadre de l'exposition « Work in Process ». Il intègre le catalogue de l'exposition, édité par le Pavillon de l'Arsenal et comporte quelques dessins et graphiques réalisés par l'auteur, dont un « arbre phylogénétique imaginaire » mettant en parallèle l'évolution de l'archétype du bureau avec celui de l'automobile. Ce dessin avait été agrandi et présenté dans le cadre de l'exposition.

Pavillon de l'Arsenal, exposition du 29.11.2012 au 24.03.2013.
Commissaires invités : François Bellanger, Raphaël Ménard, Soline Nivet, Catherine Sabbah. Design graphique : Sylvain Enguehard. Scénographie : Thomas Raynaud, architecte. Extrait du communiqué de presse du Pavillon de l'Arsenal :

« *Le Grand Paris compte plus de 50 millions de mètres carrés de bureaux. Tours, campus, immeubles réhabilités ou reconversions lourdes, emblématiques ou méconnus, ces lieux sont l'architecture de notre quotidien. L'exposition et l'ouvrage Work in process - Nouveaux bureaux, nouveaux usages explorent les réalisations et projets les plus emblématiques depuis 1900, analysent leurs enjeux sociaux, environnementaux, économiques et urbains et dessinent une cartographie francilienne inédite. [...] Work in process présente la complexité de ces lieux, détaille leur incroyable diversité typologique, explique les préoccupations environnementales qui révolutionnent l'art de les bâtir et affirme le rôle aujourd'hui primordial de ces architectures dans la fabrique des métropoles contemporaines. À travers une sélection de réalisations récentes et de projets en cours, le visiteur est invité à découvrir un large panorama de formes urbaines innovantes en réponse à des*

situations plurielles : réhabilitations, quartiers en devenir, « campus », business HUB, tours... [...] Et demain ? À l'heure des échelles métropolitaines et des enjeux internationaux, le Pavillon de l' Arsenal interroge l'avenir des pratiques et des usages du bureau. Meuble ou pièce, lieu ou espace virtuel, collectif ou individuel, coworking ou « ruche », connecté, nomade ou encore délocalisé, le bureau révèle sous son nom générique une variété complexe de styles et typologies. [...] Par l'ampleur du parc métropolitain qui a doublé en moins de quarante ans, mais aussi la place qu'ils occupent dans nos vies, les bureaux représentent certainement la création architecturale la plus emblématique de notre temps. Explorer cet univers permet, plus qu'ailleurs, de saisir la dimension pluridisciplinaire de l'architecture. »

2013

Tracés

Menard R., *Les Infrastructures Solaires Urbaines*, Dossier « Vers la ville symbiotique ? Valoriser les ressources cachées », Tracés, novembre 2013.

Article de quatre pages en français comportant dessins et graphiques de l'auteur. Ce document fait suite à la conférence donnée en septembre 2013 à Neuchâtel, en Suisse, dans le cadre du symposium Forum .13, association Ecoparc, intitulé « Vers la ville symbiotique ? Valoriser les ressources cachées ».

Ce texte résume une partie des résultats de recherche issus de Réforme (programme *Ignis Mutat Res*) et tout particulièrement, la dernière partie, les *Métamorphoses*. Cet article rend hommage aux travaux et réflexions de Fuller, Meadows et Friedman. Les illustrations de l'auteur montrent les organisations fondamentales des « Infrastructures Solaires Urbaines ».

Sur les Montagnes Solaires

Menard R., Fayette E., Azzopardi P., *The Solar Mountains*, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013.

Ce papier synthétise une partie des recherches menées par Elioth autour du concept de « Montagnes Solaires » et du principe associé de production d'électricité renouvelable. Il comprend quatre pages et est rédigé en anglais. Cet article fait état des techniques constructives possibles des Montagnes Solaires et compare leur efficacité de production énergétique à celle des cheminées solaires traditionnelles. Pour plus de précisions, se reporter également au brevet déposé et à la revue de presse.

Menard R., Fayette E., Azzopardi P., *Approximating a funicular shape with a translational surface – Example of a glass canopy*, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013, 2013.

Cet article relate la genèse de la géométrie du projet de couverture pour la verrière de la bibliothèque de l'université de Rennes (architecte, Bruno Gaudin). Ce texte comprend quatre pages et est écrit en anglais. Il détaille la génération d'une double-courbure pavable par des quadrangles plans et dont l'efficacité structurelle est également avérée. De façon formelle, ce papier décrit le type de surface de translation permettant de générer cette propriété remarquable. Pour de plus amples précisions, se reporter à la revue de presse consacrée à la verrière de la bibliothèque universitaire de Rennes.

Matière grise

Menard R., *Le pic de l'architecture*, pp161-168, extrait du catalogue « Matière Grise », Direction de l'ouvrage Encore Heureux, architectes, Edition et distribution exclusive, Pavillon de l'Arsenal, 2014

Cet article de huit pages, en français, a été commandé et rédigé dans le cadre de l'exposition « Matière Grise ». Il intègre le catalogue de l'exposition, édité par le Pavillon de l'Arsenal. Bâti comme une collection de 24 paragraphes relativement indépendants les uns des autres, le « pic de l'architecture » attire l'attention sur la nécessité de revisiter le principe économique fondateur des concepteurs (payés sur une fraction des coûts de construction et non sur le temps passé à exercer leur matière grise), sur le besoin d'installer de nouveaux systèmes économiques (comme la création d'une fiscalité incitative, la taxe sur la matière ajoutée). L'article interroge finalement l'exercice même de l'architecture comme « art de la croissance » depuis ses origines qui nécessitera tôt ou tard une refondation eue égard la déplétion de toutes les ressources. Commissaires : Encore Heureux architectes, Nicola Delon, Julien Chopin. Exposition présentée du 26 septembre 2014 au 4 janvier 2015.

Resilis, programme Villes Durables de l'ANR.

Résilience urbaine et vulnérabilité climatique. Impacts sur l'énergie, le confort et la santé - développer la résilience urbaine par l'amélioration des aides à la gouvernance des systèmes urbains. Projet labellisé par le Pôle de compétitivité Advancity.

Le projet *Resilis* vise à développer des solutions innovantes pour l'amélioration de la résilience de la ville. Dans ce projet, un des principaux objectifs est d'étudier l'impact du changement climatique au sein des régions urbaines. En effet, les conditions climatiques sont un facteur de stress pour les bâtiments et les infrastructures. Ils sont habituellement bien adaptés au climat dans lequel ils ont été construits. Cependant, les changements du climat peuvent affecter le confort de vie interne et externe. Le GIEC prévoit une augmentation de la température moyenne

mondiale de 1,1°C à 6,4 °C d'ici à la fin du siècle, venant à modifier la température d'équilibre de la Terre. De façon plus locale, dans la communauté urbaine en particulier, cette augmentation pourrait s'avérer d'autant plus drastique. L'albédo est une composante importante dans la quantification du forçage radiatif. L'idée de l'effet d'albédo consisterait alors à limiter localement le chauffage radiatif des villes et des infrastructures par augmentation de l'albédo via une redistribution de l'énergie : utilisation de peinture réfléchissante par exemple, modification simple de la colorimétrie surfacique. Les incidences seraient également importantes pour réduire les effets d'îlots de chaleur urbains (conséquences sur le confort, limitation des risques sanitaires d'exposition aux épisodes caniculaires, réduction des consommations de climatisation etc.). La définition et l'estimation d'indicateurs de la résilience auront besoin d'être réalisés afin de caractériser les évolutions potentielles du climat en termes de température de l'air (degrés jours chauds et froids), de radiation solaire et de nombres d'heures affichant une température supérieure à 28°C. Ainsi, les tendances à adopter dans les villes françaises face au changement climatique et ses impacts en termes de dérives de consommations d'énergie dans les bâtiments et pour le confort extérieur des espaces publics seront caractérisées pour deux scénarios climatiques B2 (modéré) et A2 (case le plus pessimiste). Finalement, des méthodes, des outils ou un guide de bonnes pratiques devront être adressés aux autorités locales, aux décideurs et à la population. Sur le long terme, l'objectif sera de développer des outils pour préparer, adapter et concevoir des systèmes techniques et sociaux tels qu'ils pourront faire face, absorber et recouvrir les perturbations dues au changement climatique.²

Petit manuel pratique de transition énergétique

Petit manuel pratique de transition énergétique pour le bâtiment et la ville, Convictions et solutions d'ingénieurs-concepteurs, éditions Egis, 96 p, juin 2013. Ménard R., directeur de publication.

Rédigé et conçu dans le cadre de mes fonctions chez Elioth et Egis, cet ouvrage avait pour objet de diffuser et partager plusieurs débats afférents à la transition énergétique. Cet ouvrage, rédigé à plusieurs mains, tache de rendre didactique plusieurs enjeux liés à la sobriété, à l'efficacité et à la production d'énergies renouvelables dans le bâtiment et la ville. Il met aussi à jour les problématiques liées aux verrous techniques, réglementaires et économiques. En introduction à cet ouvrage, ai aussi décrit le principe de la « Kaya-bat », une autre façon de résumer les enjeux de transition liés au bâtiment ! Cet ouvrage présente aussi un article présentant les avantages liés à la transposition du calcul du LEC (pour *Levelized Energy Cost*) ou LCOE pour la rénovation énergétique.

Guide d'interaction énergie-climat, volume 2, résilience climatique

Guide d'interaction énergie-climat, volume 2, résilience climatique, ISBN : 978-2-8760-2052-8, 106 pages, mars 2013. Ménard R., directeur de publication.

Inspiré par le premier volume, cet ouvrage a pour ambition de diffuser quelques résultats issus du programme de recherche *Resilis* et en particulier, des recherches effectuées par Elioth dans le cadre de son « work package » : l'évolution drastique de la demande de froid dans les bâtiments, les problématiques d'inconfort estival et à mi-saison ainsi que les solutions permettant de tempérer les effets d'îlot de chaleur urbain. Ce guide constitue un outil de compréhension des enjeux d'adaptation au changement climatique au regard des besoins énergétiques et du confort, en phase amont des projets d'aménagement. Il se focalise sur les questions d'interactions entre énergie et climat à l'échelle du bâti et notamment l'impact du changement climatique sur la diminution ou l'augmentation des besoins en chauffage et climatisation des bâtiments ainsi que les aspects de confort microclimatique des espaces extérieurs. Au travers de scénarios prospectifs, il renseigne sur la prise en compte de stratégies d'adaptation du bâti et met en évidence l'évolution tendancielle des besoins énergétiques de différentes typologies bâties.

2014

L'Architecture d'Aujourd'hui

Ménard R., interview de Raphaël Ménard par Tony Côme, pp128-131, *L'Architecture d'Aujourd'hui*, numéro 400, mai 2014.

Relecture de *L'Architecture d'Aujourd'hui* de juillet 1936, consacrée à l'électricité dans le bâtiment. Interview par Tony Côme, traduite en anglais.

Ciminieri D., Ménard R., Meunier G., Ciuccarelli P., *Energetical streams visualization using interactive Sankey diagrams*, ISGG, 16th international conference on geometry and graphics, 4-8 août 2014.

Cet article a été rédigé dans le cadre de « Reforme », nom du projet et d'équipe de recherche pour la première session du programme Ignis Mutat Res. Ce texte comporte sept pages et est rédigé en anglais. Il contient des graphiques issus du site internet dédié aux résultats de « Reforme ». Publié conjointement par les membres de l'équipe du Density Design Lab (Daniele Ciminieri et Paolo Ciuccarelli) et d'Elioth (Guillaume Meunier et Raphaël Ménard), ce texte décrit le canevas analytique de l'outil numérique, l'un des livrables de « Reforme ». Ce papier explicite les équations de bilan des flux énergétiques, comme leurs traduc-

tions graphiques, sous forme de diagramme de Sankey. Une partie de ce livrable de recherche est visible à l'adresse solar-reforme.org

Horsin A., Ménard R., Pouchain F., *A Fast Smart Grid Simulation Tool for Urban Designers*, ICEEE 2014.

Ce texte expose les travaux de recherche et la formulation de l'outil de modélisation énergétique mis au point chez Elioth. L'algorithme développé permet d'évaluer des scénarios de demande, de stock et de flux de production à l'échelle d'un quartier urbain.

Projet Reforme, programme Ignis Mutat Res.

« Reforme », rapport final de l'équipe Reforme, programme de recherche *Ignis Mutat Res*, 292 pages, avril 2014. Première session, 2011-2013. Composition de l'équipe Reforme : Raphaël Ménard, responsable scientifique, Maurizio Brocato, responsable institutionnel, Alain Dervieux et Paolo Ciuccarelli.

Ignis mutat res, Penser l'architecture, la ville et les paysages au prisme de l'énergie est un des programmes de recherche incitatif initié et piloté par le Bureau de la recherche architecturale, urbaine et paysagère du Ministère de la Culture et de la communication. Il est organisé en trois sessions de deux années chacune, en partenariat dès l'origine avec le ministère de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie et l'Atelier international du Grand Paris. Le projet Reforme est lauréat de la session 1 (2011-2013) de ce programme. Le projet Reforme s'articule autour de trois parties : les *Représentations* (Re), la *Formalisation* (For) et enfin les *Métamorphoses* (Me). En tachant de dépasser la dualité traditionnelle production-consommation énergétique, nous introduisons la trilogie suivante : les énergies renouvelables (l'offre) sont distinctes des ponctions sur les réserves fossiles et fissiles (le stock) tandis que la demande commande. La première partie -les *Représentations* - introduit une comptabilité entre ces trois valeurs pour permettre une représentation simple et didactique des dynamiques de ces trois scalaire dans l'espace et dans le temps. Pour illustrer ces prémices d'« éléments finis énergétiques territoriaux », est développée une corrélation selon la latitude terrestre illustrant un très fort contraste entre pays du Nord et pays du Sud. Nous explorons ensuite différentes cartographies du territoire parisien et mettons en lumière les spécificités de la transition énergétique à l'échelle du Grand Paris, en partie liée à la question de la densité et de ses limitations sur l'autonomie énergétique. La deuxième partie - la *Formalisation* - s'attarde sur une description mathématique des valeurs de demande, de stock et d'offre pour préciser les dimensions qualitatives de l'énergie. À cet égard, nous introduisons une représentation vectorielle de l'énergie en lieu et place d'un scalaire. Les annexes du rapport final fournissent le

détail de ce formalisme mathématique ; il est adapté et potentiellement puissant pour décrire les opérations successives sur les flux d'énergie, « *du berceau exergique à la tombe anergique* ». Nous analysons ensuite les données techniques permettant d'évaluer l'offre énergétique. À l'issue de cette partie, nous introduisons de nouveaux outils de projet, les « plans de récolte énergétique ». Nous illustrons plusieurs situations planétaires à différentes échéances temporelles. Cette approche sert les principes d'évaluation des taux de solarisation pour un territoire donné et illustre l'intérêt de l'outil numérique *Reforme* (solar-reforme.org). La dernière partie - *Les Métamorphoses* - décline formellement les principes de dimensionnement des parties précédentes. La première métamorphose concerne l'exploration de plusieurs scénarios globaux ²popularisée par Fuller. Forts de ces estimations de la demande et de l'offre, sont esquissées plusieurs prospectives globales depuis 1750 jusqu'en 2250 avec comme paramètres, la population mondiale, la demande individuelle d'énergie ainsi que le niveau de solarisation planétaire. Ces variables sont celles de l'outil numérique *Reforme*. La deuxième métamorphose est à une échelle intermédiaire et questionne les découpages administratifs français afin d'assurer une cohérence des « bassins versants énergétiques », permettant d'homogénéiser densité de *demande* et densité d'*offre* potentielle. Cette deuxième métamorphose fait l'objet d'un livrable dédié, un logiciel d'aide à la décision pour le découpage territoriale avec l'hypothèse qu'il puisse être un outil d'aide à la décision politique. Enfin, la dernière métamorphose présente les « *Infrastructures Solaires Urbaines* » : une stratégie locale, une réponse architecturale et urbaine pour un circuit court entre offre, stock et demande. Cette typologie hybride entre infrastructure et architecture fournit une hypothèse typologique d'une nouvelle couture entre ville et campagne et la « relocalisation du bassin versant énergétique ». *Les Métamorphoses* concluent un résultat important de cette recherche : la forme urbaine gouverne davantage l'*offre* énergétique que la *demande*.

Brevet pour Wind-it

Titre du brevet : « Structure de tour pour rotor d'éolienne à axe vertical. ».



