Réforme

Raphaël Ménard, Maurizio Brocato, Alain Dervieux, Paolo Ciuccarelli, Yves Cochet

▶ **To cite this version:**

Raphaël Ménard, Maurizio Brocato, Alain Dervieux, Paolo Ciuccarelli, Yves Cochet. Réforme. [Rapport de recherche] IMR-2011-MEN, Ministère de la culture et de la communication / Bureau de la recherche architecturale, urbaine et paysagère (BRAUP); Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement; Atelier international du Grand Paris. 2014. hal-01740771

HAL Id: hal-01740771
https://hal.science/hal-01740771

Submitted on 22 Mar 2018

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.

Ignis Mutat Res

Penser l'architecture, la ville et les paysages au prisme de l'énergie | Session 1

Reforme

Rapport final | Equipe Reforme

Avril 2014

Avant-propos....7
Evolutions de la problématique....7
Synthèse des livrables finaux....8
Implémentations et publications....9
Contributions....11

Introduction générale....13
Préambule....13
Le projet Reforme....16

Partie 1. Les Représentations....25
Introduction....25
Espace, temps, énergie....29
Analyse selon la latitude....29
Conséquences territoriales....34
Analyse en Ile-de-France....35
Le bassin versant énergétique....35
Les transitions de Paris....36
Une Ile-de-France agrandie ?....37
Première cartographie de la demande....39
L'exemple du Parc des Portes de Paris....42
L'outil de visualisation Reforme....43
Introduction....43
Etat de l'art des représentations....43
Début de formalisation....44
Présentation de l'outil....47

Partie 2. La Formalisation....59
Mesurer l'énergie....61
Quelles variables pour définir l'urbain ?....64
Fonctions d'offre et de demande....73
Mesurer la demande....76
Introduction....76
Une typologie des besoins....81
Modèle pour la mobilité....88
Le modèle (d,e) de la demande....90
Mesurer le stock....96
Introduction....96
Stocks de long terme....96
Stocks de court et moyen terme....98
Stocks incorporés....99
Mesurer l'offre....112
Introduction....112
Récolter le soleil....116
Récolter la photosynthèse....128
Récolter les gisements locaux....132
Cartographies d'offre....136
Synthèse de la deuxième partie....147
Dimensionnement architectural....147
Faire adhérer demande et offre....154
Demande et stocks....155
Augmenter l'offre....157

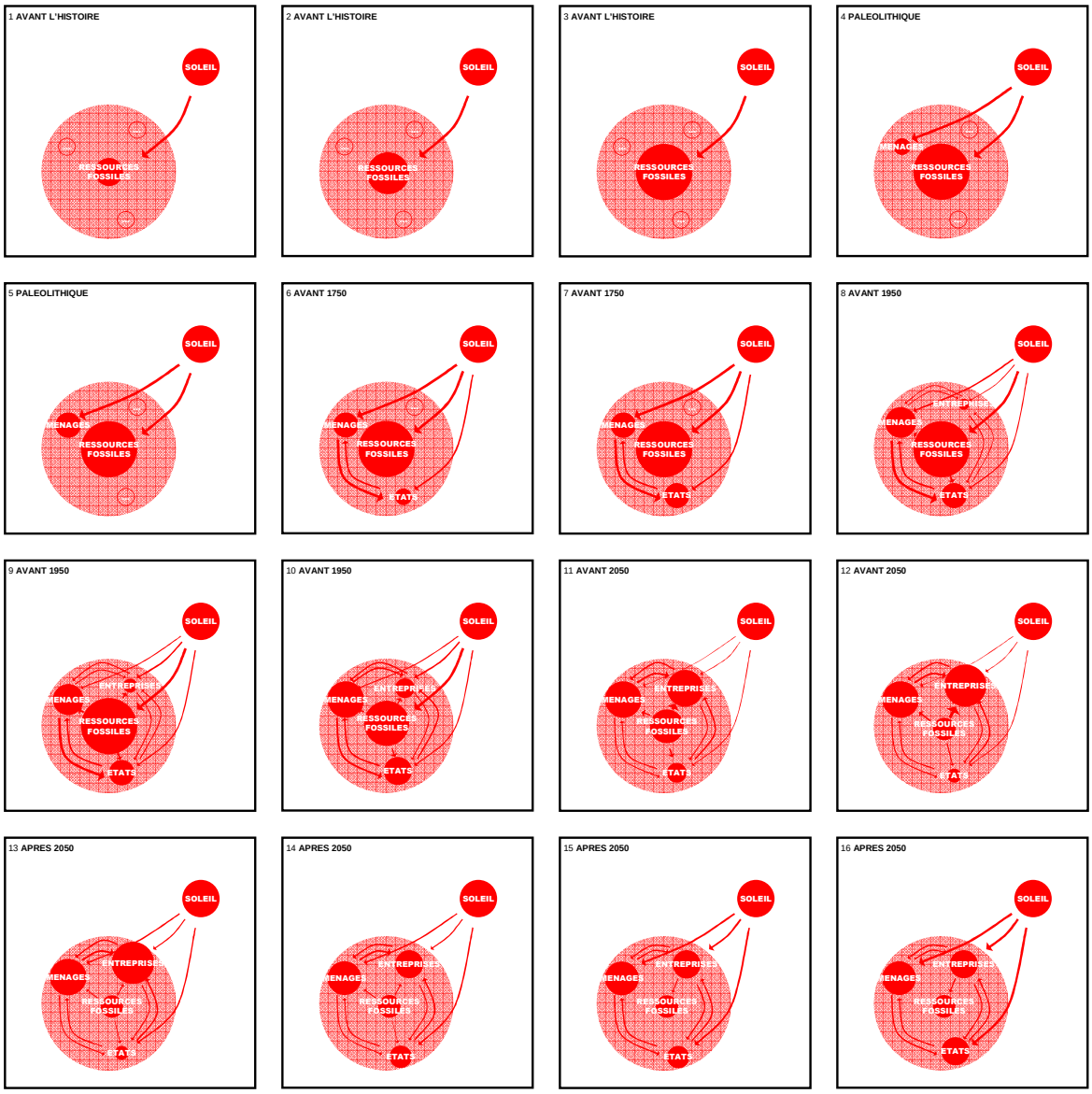
Partie 3. Les Métamorphoses 163
Conclusion #1 : scénarios globaux 164
Scénariser le long terme 165
Les scénarios Reforme 166
Conclusion #2 : réforme en France 169
Introduction 169
Remembrer les régions selon l'énergie ? 170
De la science (politique) 177
Les Infrastructures Solaires Urbaines 179
Une utopie locale pour la solarisation 179
Premier principe 179
Deuxième principe, stocker 180
Troisième principe, contenir 180
Dimensionnement des ISU 181
Quelques représentations des ISU 186

Cas pratiques pédagogiques 193
DPEA Architecture Post-Carbone 194
Introduction 194
Enseignements de projet 195
La modernité après 202
Introduction 202
Le 30-30 & le 30-30scope 203
Pédagogie du projet 212
Influence sur un enseignement contemporain 215
Solar Decathlon 235
Contexte 235
Projet Astonyshine 236
Projet « LivLib » 240

Annexes 241
Compléments pour les Représentations 242
Extrait d'état de l'art des représentations 242
Structure de données pour l'outil Reforme 246
Compléments pour la Formalisation 248
Espace vectoriel de l'énergie 248
Algèbre de la géonergie 252
Démolition sélective 264
Compléments pour les Métamorphoses 272
Trajectoires de solarisation équilibrées 272
Cartographie de la demande énergétique 280

Glossaire 283

Bibliographie 286



La planche story-board du "[Me] originel" de [Re][For][Me], les [Mé]canismes économiques devenues ensuite les Métamorphoses dans Reforme. Un clin d'œil aux illustrations de Le Macrocosme, vers une vision globale *par Joël de Rosnay, 1975.*

Avant-propos

Evolutions de la problématique

Après deux ans de travail, ce document synthétise les résultats des travaux menés par l'équipe *Reforme* dans le cadre du programme de recherche *Ignis Mutat Res*. Depuis fin 2011, et dans le prolongement de la diffusion des notes d'avancement[1] et des rapports de recherche intermédiaires[2], nous récapitulons dans ce qui suit, les inflexions impulsées à notre problématique de recherche[3].

De façon essentielle, notons la réorientation imprimée à la dernière partie ; rappelons qu'originellement, nous souhaitions explorer les interrelations entre énergie et économie dans la dernière partie de notre recherche, les *[Mé]canismes économiques*.

Lors de la présentation aux membres du Conseil Scientifique en mai 2013, nous avions justifié de la nécessaire inflexion pour cette troisième et dernière partie. La question de l'économie ouvre un champ disciplinaire bien trop vaste et la question soulevée par le « *[Mé]* originel » aurait réclamé une problématique de recherche dédiée. Nous comprenons donc l'ambition trop large donnée à notre problématique initiale. Il était donc nécessaire de nous concentrer sur le développement des *Représentations* et de la *Formalisation.*

Aussi, les résultats de recherche issus des *Représentations* et de la *Formalisation* ont fait naître puis réapparaître les problématiques de la forme, des interrogations sur les typologies architecturales et les morphologies urbaines.

Sur les questions énergétiques, les avancées sur les principes de dimensionnement à l'échelle territoriale puis urbaine ont révélé la nécessité d'interroger la diversité des feuilles de route à échelle planétaire permettant l'horizon d'adéquation entre *offre* et *demande* énergétique, *l'atterrissage vers le régime permanent* énergétique ou vers de nouveaux équilibres.

A plus petite échelle, s'est imposée l'émergence de nouvelles typologies d'infrastructures urbaines. Nous avons alors redéfini l'acronyme de la dernière partie de notre recherche, les *Métamorphoses.*

Le projet *Reforme* agrège ainsi trois temps successifs d'exploration :

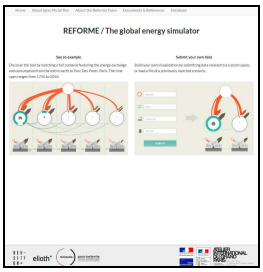
les *Représentations,* [Re]
la *Formalisation,* [For]
et les *Métamorphoses.* [Me]

[1] Mars 2012
[2] Octobre 2012 puis Juillet 2013
[3] Projet de l'équipe Reforme transmis le 28 septembre 2011, pour mémoire en annexe à ce rapport

Synthèse des livrables finaux

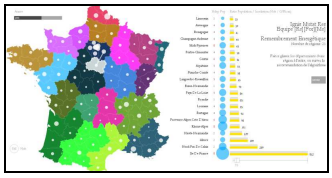
Livrable 1 : le rapport final

Le présent document constitue la synthèse finale des avancées de recherche. Il a vocation à être disponible de façon publique et sera en libre téléchargement sur le site dédié du projet *Reforme*.



Livrable 2 : le site web et l'outil numérique

Notre problématique de recherche (septembre 2011) exprimait l'intention et la mobilisation de nos efforts de recherche sur la constitution des « DSSD », les diagrammes de Sankey spatialisés et dynamiques. Le site dédié à cette application *Reforme* est en ligne à l'adresse *solar-reforme.org*



Livrable 3 : le logiciel territorial

Au terme de notre recherche, et en lien avec les questions politiques françaises, nous avons également développé une application dédiée à la péréquation territoriale en vue d'homogénéiser les densités de demande et d'offre à l'échelle du territoire français métropolitain. Ce logiciel a pour objet de requestionner les bassins versants énergétiques pour chaque région française. L'application pour le redécoupage territorial *Reforme | Vers de nouvelles régions énergétiques ?* est disponible en téléchargement sur le site *solar-reforme.org*

Implémentations et publications

Implémentations pédagogiques

Le projet *Reforme* a permis et catalysé le déploiement de nouveaux projets pédagogiques et de nouvelles explorations sur des académies existantes. Cette production très importante de notre recherche est détaillée dans la suite de ce rapport.

Citons notamment les évolutions apportés au sujet du « 30-30 », exercice de projet de troisième année à l'Ecole d'Architecture de Paris-Belleville ; la mise en place et le déploiement de la formation post-master à l'Ecole d'Architecture de Marne-la-Vallée, le DPEA Post-Carbone ; et enfin, le rôle et l'inflexion suscité par les *Métamorphoses* pour l'équipe Paris du *Solar Decathlon 2014* à laquelle prend activement part l'Ecole d'Architecture de Paris-Malaquais.

Articles scientifiques

L'équipe *Reforme* a transmis des projets d'articles scientifiques auprès de plusieurs revues pour diffuser les résultats de notre recherche. Ce travail se poursuivra au cours de l'année 2014 et 2015. Citons les projets en cours suivant :

- Daniele Ciminieri, Raphaël Ménard, Guillaume Meunier, Paolo Ciuccarelli, *Energetical streams visualization using interactive sankey diagrams*, 16th International Conference on Geometry and Graphics University of Innsbruck, Austria, August 4-8, 2014. Résumé accepté et publication de l'article dans les actes.
- Maurizio Brocato, *Urban (thermo)mechanics*, projet d'article
- Maurizio Brocato, *Le bâti comme source d''energie grise*, projet d'article

Publications en rapport avec la recherche

L'équipe *Reforme* a également participé à des articles qui ont permis d'exposer et de diffuser quelques résultats de la recherche. Citons notamment :

- Menard R., *Les Infrastructures Solaires Urbaines*, Dossier «*Vers la ville symbiotique ? Valoriser les ressources cachées* », Tracés, novembre 2013
- Menard R., *Work in Process*, nouveaux bureaux, nouveaux usages. Pavillon de l'Arsenal. Article « *Don Drapper, la voiture et le climat* », p237 à p265, 2012

Conférences, débats

L'équipe *Reforme* a pris part à des conférences et à des débats en lien fort avec nos problématiques.

- « *Et si le Grand Paris devenait énergétiquement autonome ?* », vendredi 31 janvier 2014. Pavillon de l'Arsenal, Paris. Animé par François Bellanger. Philippe Villien, Raphaël Ménard et Franck Boutté
- « *Architecture de l'énergies. Quel urbanisme pour une société à 2000W ?* », Forum .13, Association Ecoparc, « *Vers la ville symbiotique ? Valoriser les ressources cachées* », Neuchâtel, septembre 2013
- « *Architectures de l'énergie* », projet Reforme et DPEA Architecture Post-Carbone, ENSAVT, mai 2013
- « Quel *Grand Paris ? (et avec quelles énergies ?)* », Ecole Spéciale d'Architecture, avril 2013
- « *Quelques résiliences urbaines* », Institut des hautes études de développement et d'aménagement des territoires en Europe, Dunkerque, septembre 2012
- « *Quel champ de variable pour construire les prospectives urbaines sur l'énergie ?* », Conférence GIS Modélisations urbaines, Lille, juin 2012

Contributions

Le projet Reforme

Première session, 2011-2013.
Rapport final du projet et de l'équipe Reforme.
Date de diffusion au Conseil Scientifique : 30 avril 2014 (délai de 6 mois complémentaires accordés suite transmission du rapport pré-final)

Composition de l'équipe Reforme

- Raphaël Ménard, responsable scientifique, Elioth, groupe Egis et enseignant associé ENSAVT, DPEA Architecture post-carbone
- Maurizio Brocato, responsable institutionnel, Ensa Paris-Malaquais, laboratoire GSA
- Alain Dervieux, ENSAPB et ENSPV
- Paolo Ciuccarelli, Density Design Lab, Politecnico de Milan
- Yves Cochet, député européen

Participants à la recherche

Adelaïde Feraille, Alain Dervieux, Amandine Juston, Antoine Virolleau, Azhar Kahn, Clémence Yon, Daniele Ciminieri, Felix Pouchain, Giorgio Caviglia, Guillaume Meunier, Hadrien Durand-Baissas, Henri Chapouthier, Katarzyna Lechka, Loubliana Petroff, Maurizio Brocato, Paolo Ciuccarelli, Paul Azzopardi, Raphaël Ménard, Roberta Zarcone, Roberto Monastra,Vincenzo Montefusco.

Relecteurs

Pour les rapports et documents transmis pendant les deux années de recherche : Bernard Decombs, François Ménard, Jean-Pierre Péneau, Léo Bénichou, Nicolas Tixier, Valérie Wathier.

Le programme Ignis Mutat Res

« Penser l'architecture, la ville et les paysages au prisme de l'énergie » .Programme interdisciplinaire de recherche.

Ministère de la Culture et de la Communication (MCC), Direction générale des patrimoines (DGP), Bureau de la recherche architecturale, urbaine et paysagère (BRAUP)
Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL), Direction de la recherche et de l'innovation (DRI), Atelier international du Grand Paris (AIGP)

Images et illustrations

L'ensemble des graphiques, illustrations et images sont issues de la production de recherche par l'équipe *Reforme*, sauf lorsque les crédits sont mentionnés en légende.

Remerciements

Alain Maugard, André-Marie Bourlon, Anne-Sophie Harnisch, Corinne Tiry-Ono, Dominique Alba, Fanny Lopez, François Roddier, Jean-François Blassel, Joël Sakarovitch, Joëlle Trouvé, Julien Bigorgne, Linda Sanquirgo, Mindjid Maïzia, Panos Mantziaras, Philippe Chartier, Sabine Barles, Sébastien Marot.

Version 1.0, 30 avril 2014
Première diffusion format pdf

Photo K.James (Bloomberg / Getty)

Introduction générale

« 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. »

François Roddier [4]

Préambule

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[5]. Le citoyen a perdu toute mesure de cette profusion énergétique[6].

Selon des axiomes en phase avec cette *ignorance énergétique*, notre économie reste fondée selon les préceptes d'une croissance continue de création de richesses[7]. 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).

[4] *Thermodynamique de l'évolution*, p164

[5] Jean-Luc Wingert, *La vie après le pétrole, de la pénurie aux énergies nouvelles*, Collection Autrement, 2005

[6] Jean-Marc Jancovici et Alain Grandjean, *Le plein s'il vous plait*, Seuil, 2006. Les auteurs rappellent dès l'introduction l'écart entre la puissance musculaire disponible par un humain (~100W) et le contenu énergétique d'un litre de pétrole (~10kWh) soit l'équivalent de 100h de travail d'un forçat.

[7] Yves Cochet, *Economie et Thermodynamique* dans Cosmopolitiques n°9, juin 2005

[8] Yves Cochet, *Pétrole Apocalypse*, Fayard, 2005

Ontologiquement, l'entropie est d'ailleurs étroitement corrélée à la flèche du temps[9] : la dynamique des systèmes complexes rompt la symétrie inhérente aux équations de la mécanique classique. L'état de notre planète et l'imminence des différentes déplétions[10] impriment un « début de l'Histoire ». Pour l'architecture, le paysage et l'urbanisme, cette prégnance de la dimension temporelle devrait déjà nous pousser à opérer un renversement : transformer ces arts et techniques de l'espace en sciences du temps. Or, théories, méthodes, représentations et outils projectuels manquent pour étayer ce paradigme.

De façon parallèle, nous sommes aussi entrés dans l'âge de l'information et des communications : l'apothéose de la néguentropie[11]. Projet implicite d'une humanité interconnectée, fantasme d'un cerveau global : le *mirage d'une croissance économique à consommation nulle d'énergie*. Une partie de notre consommation délétère de l'énergie utilise donc parfois la partie utile, la « quantité qualitative » de l'énergie pour opérer des transformations sur l'information[12]. Toutefois, les factures électriques de nos *datacenters* et de nos terminaux sonnent comme des rappels cybernétiques. Ceux de Shannon et la solution au paradoxe du Démon de Maxwell : pas de génération d'ordre (ou de néguentropie) sans externalités énergétiques. Pris en tenaille dans cette double aliénation, modèles culturels, théories politiques et démonstrations scientifiques manquent pour déclencher et catalyser notre sevrage[13].

Au cours d'une interview en 2011[14], le designer Roger Talon énonçait qu'en matière de création automobile, le stylisme avait définitivement supplanté le design. En ces temps où le *premium* est porté au pinacle, où les *sport utililty vehicles* et autres *crossover*s règnent en maîtres-dinosaures au milieu de notre faune automobile, adoubés par un marketing devenu planétaire, une partie importante de la production architecturale contemporaine semble parfois emboîtée le pas à cette dérangeante tendance de fond[15]. Une réaction est urgente, ce programme de recherche en fournit le support.

Réinscrire la pensée des arts de l'espace dans une perspective politique : proposer des représentations, exprimer les trajectoires possibles de décision pour corriger notre aveuglement collectif. Ce travail exploratoire constitue l'opportunité d'écrire collectivement la reprise d'une *autre modernité*, issue de l'hybridation de Richard Buckminster Fuller et de la radicale ambition de *permanence* du projet moderne. Au terme de cette exploration, *Reforme* tachera d'apporter sa pierre au débat pour la réémergence de propositions formelles.

Les architectes, les ingénieurs ont à cet égard une dette et une responsabilité majeure sur la consommation des ressources et la production des exutoires environnementaux. Rappelons le *levier écologique des concepteurs* : sans doute 200 fois supérieur à celui d'un citoyen[16] pour les émissions de CO_2 et près de 200 fois plus élevé également pour ce qui concerne l'énergie primaire : toute pédagogie du projet devrait débuter par ce préambule. Il est ainsi plus qu'urgent que les *acteurs du construire* se saisissent de cet examen de conscience, pour collectivement produire et participer à la production de feuilles de route de transition et de mutation pour nos territoires et nos paysages bâtis.

Au cours de notre exploration, nous nous sommes gardés de proposer trop rapidement une réponse formelle. Nous souhaitions éviter une logique d'optimisation « fosterienne »[17], de définir d'emblée des géométries solaires qui auraient été des transpositions du travail de l'aérodynamicien pour optimiser la finesse d'un planeur. Il s'agissait pour nous de dépasser une posture *low-tech* ou *post high-tech* qui ferait l'apologie des outils numériques, ferments d'une nouvelle architecture et d'un nouvel urbanisme[18] (y compris même s'ils agrègent un horizon plus large du cycle de l'énergie pour ces artefacts[19]). Ces approches omettent la considération de l'usage comme la qualification des espaces non bâtis : elles se concentrent sur l'optimisation du « contenant ».

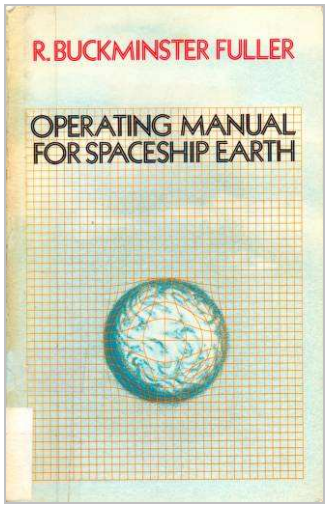
[9] Olivier Costa de Beauregard, *Le Temps des Physiciens, La Notion de Temps. Le Second principe de la Science du Temps*, Aubin Editeur ,1996
[10] Pic de Hubbert pour le pétrole comme pour les autres hydrocarbures et plus généralement pour les minerais.
[11] En cybernétique, l'information est le contraire mathématique de l'entropie (I=-S).
[12] Sur ce point, nous développerons certains de ces aspects dans la *Formalisation* au sujet de l'introduction à l'exergie.
[13] Michel Serres, *Petite Poucette, Les Nouveaux défis d'éducation,* 1er mars 2011
[14] Dans Télérama, "*Les designers, les vrais, sont des masochistes*", 30 janvier 2011
[15] Lucien Kroll, *Changement climatique – actions globales, Des réponses humanistes aidées par les basses technologies.*

[16] Si l'on s'en tient à l'énergie primaire, un concepteur de bâtiment (architecte ou ingénieur) est annuellement responsable en moyenne de 2000m² construits livrés chaque année. L'empreinte de cette responsabilité « génétique » s'estime selon a minima la construction et la première période de vie de l'ouvrage : environ 1500kWh/m² auxquels s'additionnent 30ans multipliés par 100kWh/m² par an. Soit près de 9 millions de kWh d'énergie primaire par an soit l'équivalent de plus de 5000 barils de pétrole ou de l'ordre de 800 TEP.
[17] Exemple du City Hall, Grand London Authority, par Foster and Partners, 1998-2002
[18] On peut par exemple citer le cas de BedZed.
[19] En intégrant également une prise en compte de l'énergie nécessaire à l'édification.

La question énergétique interpelle par nature la dimension temporelle[20] : elle convoque intermittence et intensité des usages. Elle conditionne aussi le rapport individuel à la consommation d'énergie et donc davantage le contenu que le contenant. Ces approches formelles oublient la question paysagère et rurale.

Nous souhaitons donc en premier lieu nous concentrer sur les fondamentaux qui gouvernent l'équilibre et la *permanence énergétique* de notre vaisseau terrestre, puis des géographies, puis enfin à l'échelle urbaine. Nous avons donc cherché davantage à élaborer des *cartes exploratoires* qui éclaireront ces sujets fondamentaux. Nous avons travaillé à déterminer de nouveaux paramètres d'objectivisation pour caractériser l'interaction *énergie-matière-espace-temps* dans des milieux complexes et au sein desquels l'information disponible est souvent incomplète et floue.

Notre programme de recherche se compose de trois parties, possédant une articulation méthodologique forte, mais disposant également d'une indépendance constructive intrinsèque.



Couverture de l'édition de 1969 de l'ouvrage de Richard Buckminster Fuller.

[20] L'énergie étant trivialement homogène à $[ML^2T^{-2}]$

Le projet Reforme

Les énergies de notre Spaceship Earth

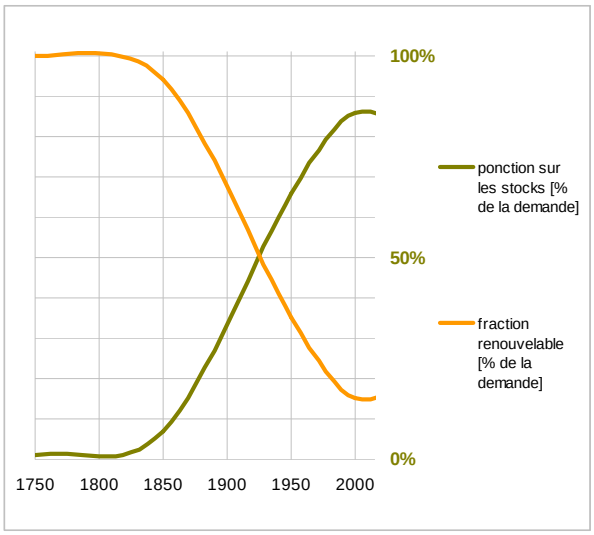
Il y a un peu plus de deux siècles, la quasi-totalité de l'énergie consommée par l'humanité était fournie par des formes directes ou dérivées de l'énergie solaire. *Une civilisation du Ciel.* En cette première moitié du 21ème siècle, la quasi-totalité de la consommation mondiale d'énergie est issue de nos stocks : charbon, gaz, pétrole, fissiles nucléaires. *Notre fugace civilisation du Sol.*

Les énergies renouvelables sont très minoritaires dans le tour de table planétaire de l'énergie. Le rendement moyen de conversion de la *douche énergétique solaire* reste excessivement faible : environ 80W sur les quelques 2100W consommés en moyenne par un terrien en ce début du 21ème siècle[21]. Il *pleut* pourtant en moyenne environ 170W/m² d'énergie sur la surface du globe.

L'essentiel de notre demande est assouvie par le prélèvement sur nos stocks. Tant vis-à-vis des exutoires engendrés par ce mix (émissions de CO_2 et autres polluants) que face à la déplétion des stocks, il y a donc urgence à *resolariser notre vaisseau terrestre.*

Dans la préface à l'édition française de *Something New under the Sun*[22], 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 20ème 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.* »



Evolution tendancielle depuis 1750 de la nature des intrants primaires permettant d'assurer la demande énergétique mondiale.

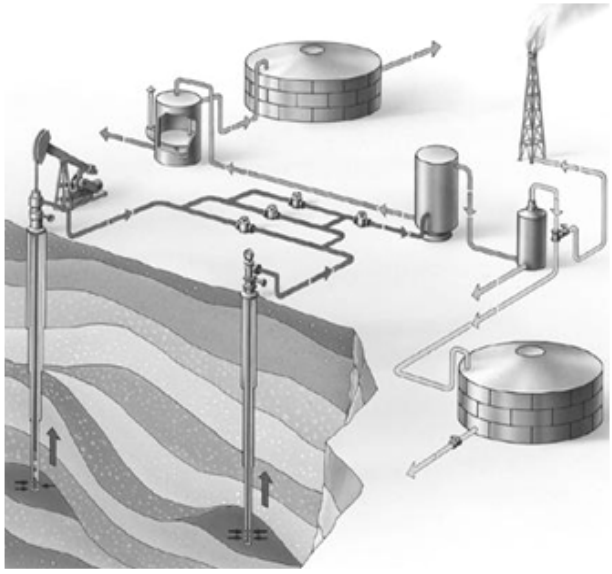


Schéma d'extraction pétrolière dans les couches géologiques (durée de maturation et de récolte supérieure à plusieurs dizaines de millions d'années). Le solaire ancien (ou notre stock). (Source Larousse)

[21] Part de la production primaire de l'hydraulique et des autres renouvelables sur la production globale.

[22] *Du nouveau sous le soleil, une histoire de l'environnement mondial au 20ème siècle, Champ Vallon, 2010* pour la traduction. Date de parution de l'édition originale, 2000.

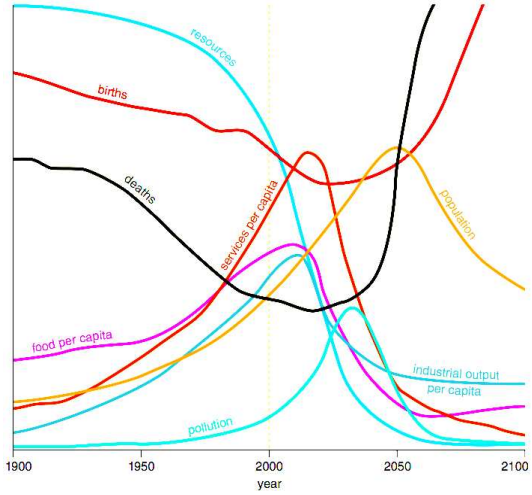
Tous les flux nécessaires à la vie et à la société peuvent se décrire en débit[23], en crédit[24] et en stock : eau, énergie, matières, population, économie, pollution...

C'est sur la base de ce schéma métabolique, et dans le cadre d'une commande du Club de Rome, que l'équipe emmenée par les Meadows avait élaborée en 1972 le modèle systémique conduisant aux différents scénarios du rapport devenu mondialement célèbre (et récemment traduit en français[25]), *Les Limites de la Croissance (dans un monde fini)*.

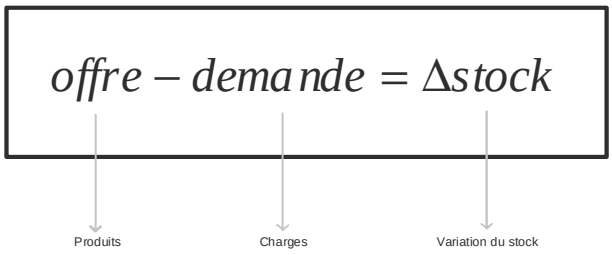
Selon cette filiation, la fin inéluctable des stocks énergétiques imposera une imparable égalité entre débit et crédit. Cet horizon de l'équilibre entre l'*offre* d'énergie (renouvelable) et la *demande*, nous le nommerons le *régime permanent*. Dès lors, à un certain terme, l'*offre* énergétique ne pourra être essentiellement issue soit :

- De l'énergie solaire et des formes dérivées[26],
- De l'énergie géothermique[27],
- De l'énergie marémotrice[28].

Retenons néanmoins qu'en moyenne et à l'échelle planétaire, le gisement offert par les deux dernières est négligeable comparé au gisement solaire terrestre.



Chronogramme basé sur les scenarios de 1972 "Limits to Growth", mis à jour par Charles Hall et John Day dans "Revisiting Limits to Growth After Peak Oil"



En miroir aux courbes chronologiques, le rappel de la comptabilité de base, valable pour le budget de son ménage comme pour notre problématique énergétique globale.

[23] Ou en *demande* ou en passif.
[24] Ou en *offre* ou en actif.
[25] Donella Meadows, Dennis Meadows, Jorgen Randers. Édition Rue de l'échiquier, mars 2012.

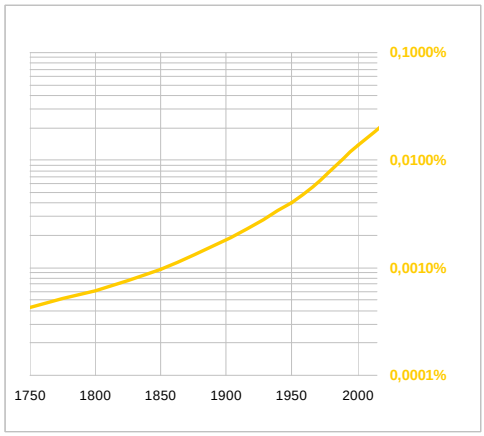
[26] Hydraulique, éolien et énergies des mers.
[27] Issue de la chaleur rémanente du noyau et du manteau terrestre.
[28] Issue des oscillations gravitationnelles entre la Terre et la Lune.

Organisons donc la prolifération solaire ! Pour parvenir à cet objectif, il faudrait que nous parvenions à convertir et exploiter 0,07% de l'énergie solaire frappant la surface continentale[29] ou 0,02% de la surface terrestre globale en comprenant les océans. Exprimée différemment, les 15TW de notre demande primaire actuelle d'énergie correspond au flux moyen d'énergie solaire reçue sur moins de 90 000km² de surface[30] soit à peu près le sixième de la France…

Cela semble facile à l'échelle globale, mais plus compliqué lorsque la population se concentre… Le projet *Reforme* consiste à explorer cette tension, a fortiori lorsque la *densité de demande* augmente en situation urbaine. La dernière partie de cette recherche, *les Métamorphose* explore et dimensionne les critères de convergence entre offre et demande au fur et à mesure de la descente d'échelle : planète, continent, territoire puis espace urbain.

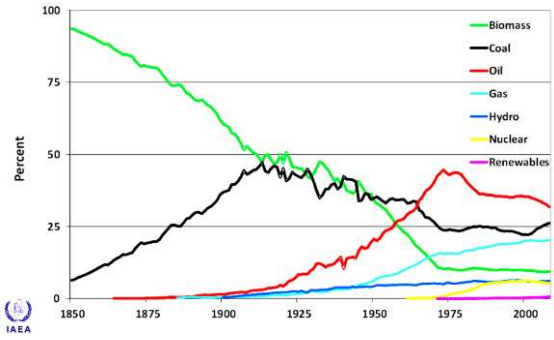
Il n'est pas question ici de déterminer si la rareté des stocks surviendra en 2030, 2050 ou au cours du prochain siècle : cela arrivera. *Reforme* n'a pas vocation à ouvrir cette discussion et nous laissons au lecteur le soin d'un parcours dans bibliographie mentionnée à la fin de ce document[31].

A long terme, rêvons du jour où notre production renouvelable deviendra excédentaire. Nous ambitionnerons alors de reconstituer les stocks antérieurs ; la transmission du patrimoine énergétique sera préservée et les batteries de notre *Spaceship Earth* regonflées.



Rendement moyen nécessaire de conversion de l'énergie solaire permettant d'assurer 100% de la demande par l'offre renouvelable. La croissance continue de la demande énergétique mondiale renforce la nécessité de transformer les capacités de valorisation et de transformation de l'énergie solaire.

En 2020, une Terre « 100% renouvelable » réclamerait un ratio moyen de conversion de l'énergie solaire de l'ordre de 0,02%.



Structure de la demande énergétique mondiale. En 1850, la très grande majorité de la demande est assurée par la biomasse. Après 2000, le mix énergétique primaire s'est largement diversifié ; le solaire récent (biomasse, hydraulique et autres renouvelables) ne constitue plus qu'une faible part de la demande.

L'essentiel est assouvi par la ponction sur les stocks fossiles (charbon, pétrole et gaz) et fissiles (combustibles nucléaires). Source World Energy Demand and Supply par H-Holger Rogner, IAEA[32]

[29] Exprimée différemment, l'énergie totale consommée par l'humanité sur une année correspond à peu près à la quantité d'énergie solaire frappant le sol d'un territoire de 100 000km².
[30] Sur la base de la moyenne de 169W/m²

[31] Par exemple Jean-Luc Wingert, *La vie après le pétrole, de la pénurie aux énergies nouvelles*, Collection Autrement, 2005
[32] *http://www.iaea.org/nuclearenergy/nuclearknowledge/schools/NEM-school/2012/AbuDhabi/PDFs/day1/04_Rogner_World_Energy_D%26S.pdf*

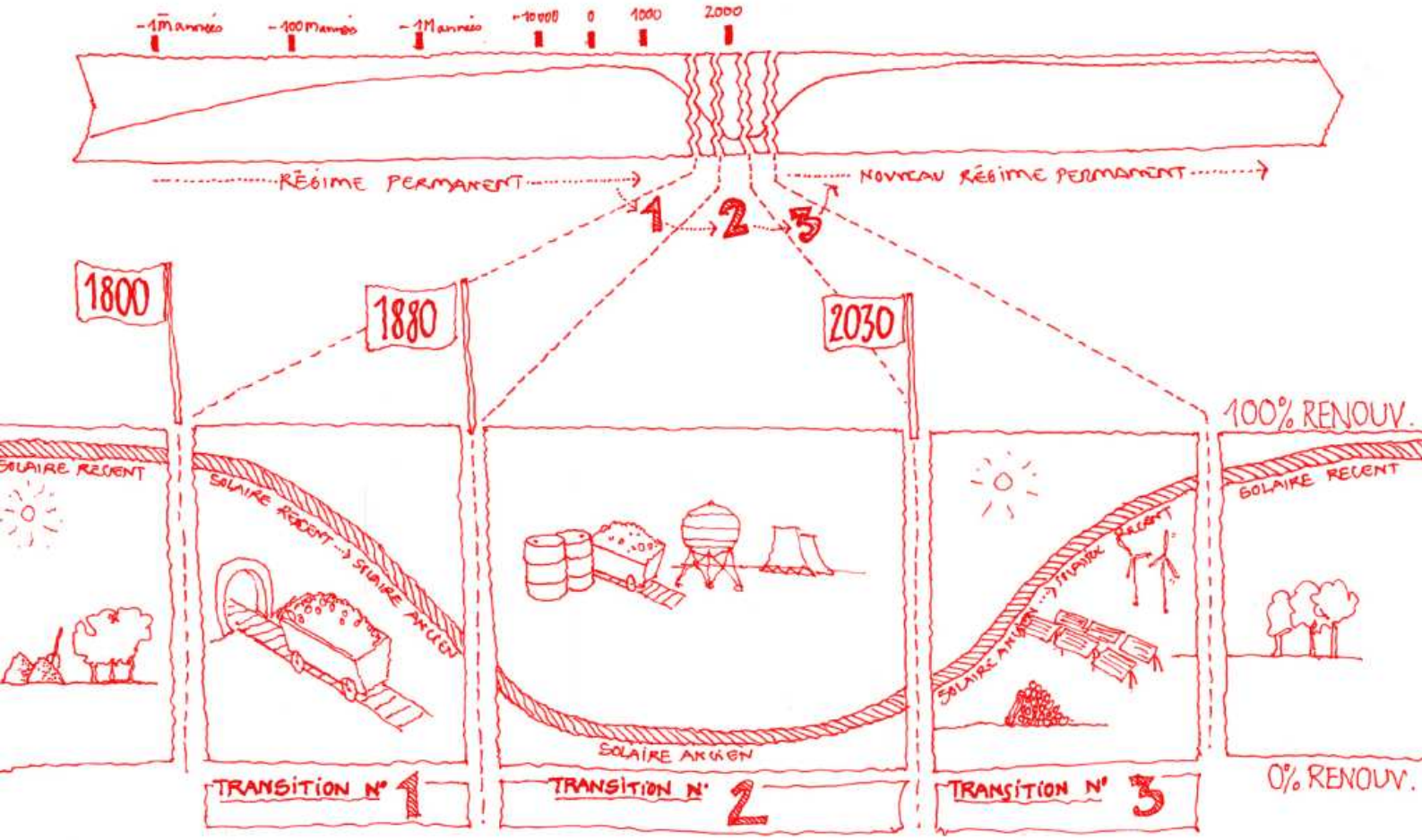
Pas une mutation, mais trois.

Voilà deux siècles que l'humanité a entamé trois mutations énergétiques fondamentales.

La première associée à l'avènement de la révolution industrielle : une partie de l'humanité s'est progressivement *dé-solarisée* en découvrant puis en exploitant les stocks de *solaire ancien* tout en délaissant progressivement le *solaire récent* (de 1800 à 1880, en passant du bois au charbon).

Une deuxième période donnant l'illusion d'une permanence énergétique en puisant massivement dans le *solaire ancien* ainsi que dans les stocks de matières fissiles (de 1880 à 2030, en ajoutant gaz, pétrole et combustibles nucléaires à nos mix).

Nous nous apprêtons à vivre la *troisième transition* en étant confronté à la finitude des stocks : l'atterrissage vers un nouveau *régime permanent* reste à inventer alors que le degré de *solarisation* de l'humanité est devenu très faible, que la population a largement augmenté et que la quantité et la diversité des usages énergétiques ont explosé.



Les trois transitions fondamentales. Reforme, pour explorer l'atterrissage vers le régime permanent à réinventer.

Trilogie de compréhension et plan

Offre, stock et demande

Nous développerons donc notre problématique de recherche selon le triptyque suivant : *offre, stock et demande.* L'aveuglement contemporain persiste à décrire le cycle de l'énergie au travers du binôme production-consommation, en confondant dans la production, les énergies renouvelables (l'*offre*) des ponctions sur les réserves fossiles et fissiles (le *stock*). Le projet *Reforme* déclinera ainsi ce triptyque avec une précision variable selon les trois parties de notre parcours.

Approche eulérienne / lagrangienne

Dans une approche parallèle à celle consistant à mesurer de façon dynamique flux et stocks pour un territoire, cette partie souhaite s'arrêter sur un autre choix de système, l'individu.

Reposer la question de la relation entre métabolisme et énergie à cette échelle essentielle autorisera sans doute un enrichissement dans la dualité entre une approche lagrangienne (le cadre statique spatiale) et eulérienne (les particules de vie). Le coût de la dépense énergétique humaine serait bien supérieur à toutes les autres pour une raison essentielle : la facturation du coût de la connaissance humaine et de l'accumulation des savoirs ?[33]

Il s'agit d'interroger le bilan énergétique d'une vie humaine. Trivialement, et sur la base d'un flux moyen[34] primaire de l'ordre de 2000 Watts, la consommation d'énergie sur une vie est de l'ordre d'une centaine de tonnes équivalent pétrole.

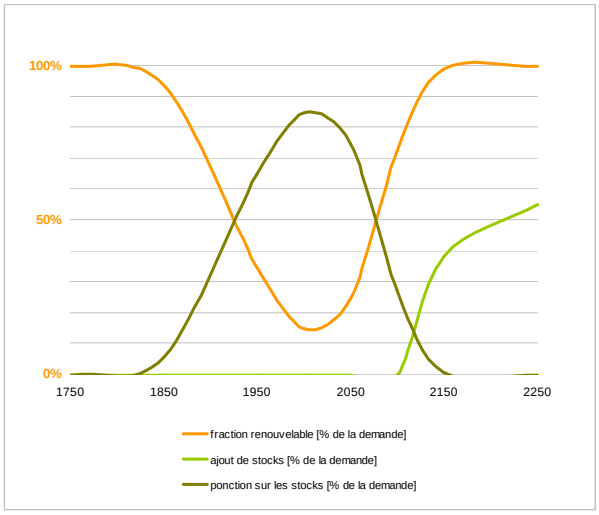
Dans une approche systémique, le flux alimentaire traversant un humain au cours de sa vie peut aussi définir l'évolution du stock (poids de l'individu) ainsi que l'évolutivité du rendement métabolique : la conversion des nutriments pour la production de chaleur interne, l'activité corporelle et psychique et l'ensemble des fonctions vitales internes.

La demande est eulérienne, l'offre est lagrangienne !

Dès lors, dans la suite de notre étude, nous privilégierons :

- Une caractérisation de la demande d'énergie rapportée à la personne plus qu'à l'espace (en flux de demande énergétique par personne, par exemple en W/pers). La densité de demande spatiale sera alors le produit de la demande individuelle par la densité humaine (W/pers x pers/km² par exemple).

- A l'inverse, l'offre renouvelable est davantage le fait du « contenant territorial », selon les choix d'aménagement effectué (notamment par de la production de biomasse) et de l'implémentation de technologies renouvelables. Le résultat sera dès lors davantage exprimé en flux d'offre d'énergie par unité de surface.



Un scénario sur 500 ans d'une solarisation terrestre permettant une production renouvelable excédentaire et la reconstitution à terme de nouveaux stocks d'énergie à long terme pour rembourser la dette énergétique des mutations opérées sur 300 ans (l'un des scénarios Reforme, « Reforme 7 »)

[33] Notion d'esclave énergétique & l'ouvrage « Des esclaves énergétiques », Jean François Mouhot

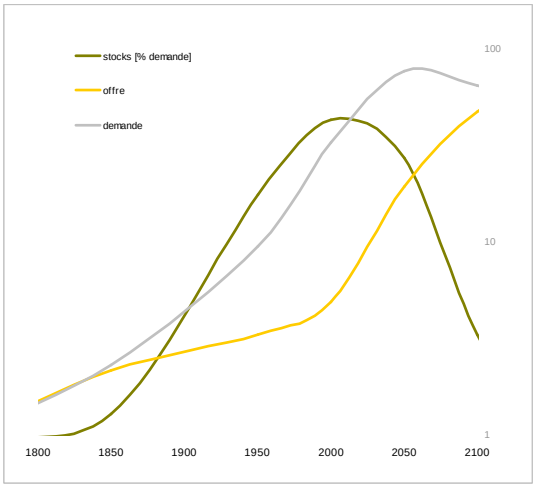
[34] Moyen sur l'ensemble de la population mondiale et moyen également sur une année complète voire une vie (on ne consomme sans doute pas avec la même intensité au cours d'une existence).

Les Représentations

La première partie introduira la comptabilité entre ces trois valeurs pour permettre une représentation simple et didactique des dynamiques de ces trois scalaires[35] dans l'espace et dans le temps. Pour illustrer les prémices d'éléments finis énergétiques territoriaux, nous développerons d'abord une analyse selon la latitude terrestre, pour analyser le paysage de l'*offre* et de la *demande* énergétique.

Nous explorerons ensuite différentes représentations et cartographies du territoire parisien. Cette section mettra en lumière la problématique de la transition énergétique à l'échelle du Grand Paris. Elle initiera une réflexion récurrente au sein de *Réforme,* le lien entre densité et autonomie énergétique.

Avant d'aborder la dernière phase de cette partie, nous introduirons la documentation énergétique du Parc des Portes de Paris, quartier de 70 hectares, situé en bordure du périphérique parisien. Dans un travail d'échanges avec l'opérateur de cette zone, Icade, nous initierons le travail de développement à une échelle plus réduite pour l'initiation de notre outil numérique *Reforme* (accessible à l'adresse *solar-reforme.org*). Les *Représentations* se concluront par la présentation de cet outil et la compréhension du paysage de l'énergie qu'il induit.



Rétrospective et prospective offre, demande et stocks sur trois siècles. Organiser la convergence entre demande énergétique globale et production renouvelable à l'échelle terrestre. Un scénario de jonction à proximité de 2100 (croisement entre la courbe grise et la courbe jaune). Le projet Reforme décrit à plusieurs échelles les outils permettant de dimensionner et donc d'accélérer l'urgence de cette convergence. Extrait du scénario « Reforme 7 » décrit dans la troisième partie de ce document : les Métamorphoses.

La Formalisation

La deuxième partie s'attardera sur une description mathématique formelle des valeurs de *demande*, de *stock* et d'*offre*, notamment pour préciser les dimensions qualitatives de l'énergie. A cet égard, nous introduirons une représentation vectorielle de l'énergie en lieu et place d'un scalaire. Cela constitue une hypothèse importante de nos travaux de recherche. Les annexes fourniront le détail de ce formalisme mathématique adapté et potentiellement puissant pour décrire les opérations successives sur les flux d'énergie, *du berceau exergique à la tombe anergique.*

Concernant la *demande*, nous proposerons un modèle – le modèle (*d,e*) - permettant de quantifier *quantité* et *qualité* de la consommation d'énergie selon deux variables territoriales, la densité humaine et l'emprise d'usage individuel dans le bâti. Cette modélisation permettra d'élaborer plusieurs scénarios de la demande.

Pour les *stocks*, une large part sera dévolue à la problématique de l'énergie incorporée, parfois aussi nommé l'énergie grise[36]. Cette section s'attardera donc sur la question constructive en développant une méthodologie d'évaluation des stocks d'énergie incorporée. Il s'agit de récupérer une pratique constructive ancienne, abandonnée dans les deux derniers siècles ; la ville traditionnelle se compose de parties qui sont en grande partie continument recyclées (les pierres d'un bâtiment deviennent celles d'un autre), alors que la ville moderne se compose de parties qui ont un trajet linéaire de leur source à la décharge. Cette partie se conclura sur une méthodologie de mesure de la *démolition sélective.*

Nous analyserons également les données techniques permettant d'évaluer l'*offre* énergétique. Cette section établira une typologie des méthodes et des techniques de conversion des gisements renouvelables, avec en premier lieu l'énergie solaire. A l'issu de cette partie, nous introduirons des principes méthodologiques permettant de fabriquer des *plans de récolte énergétique*. Nous testerons pour cela plusieurs situations planétaires à différentes échéances temporelles. Cette approche pourra servir les principes d'évaluation des taux de *solarisation* pour un territoire donné dans le cadre de l'utilisation de l'outil numérique *Reforme*. Sera également abordé la question morphologique et géométrique comme point important de caractérisation de l'offre ; nous verrons comment ce résultat précède l'une des *Métamorphoses* et la genèse des *Infrastructures Solaires Urbaines.*

[35] Demande, stock et offre.

[36] Voir également le glossaire

Au terme de cette partie, seront également présentées les lois de dimensionnement du *régime permanent*[37] à une échelle locale, en explorant différents scénarios pour le logement et l'espace tertiaire. Au cours de notre recherche, nous avons développé un outil de dimensionnement permettant l'estimation concomitante de l'offre et de la demande, en indiquant pour résultat, plusieurs prescriptions pour les typologies architecturales et urbaines.

Les Métamorphoses

La dernière partie propose de traduire une déclinaison formelle découlant de ces principes de dimensionnement. Le programme de recherche *Ignis Mutat Res* interpellait la nécessité d'une refondation théorique mais aussi potentiellement formelle.

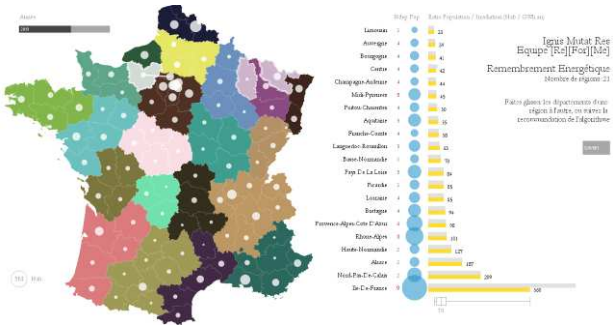
La première *métamorphose* concerne l'exploration de plusieurs scénarios globaux pour le vaisseau terrestre planétaire. Forts des paramètres d'estimation de la *demande* et de l'*offre*, sont d'abord évoqués plusieurs prospectives globales depuis 1750 jusqu'en 2250 avec en paramètres population mondiale, demande individuelle d'énergie et niveau de solarisation planétaire. Ces variables sont celles de l'outil numérique *Reforme*.

La deuxième *métamorphose* agit 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.

Enfin, la dernière *métamorphose* présente les *Infrastructures Solaires Urbaines* : une stratégie locale, pour un circuit court entre offre, stock et demande. Cette typologie *hybride* entre infrastructure et architecture fournit une hypothèse typologique de nouvelle couture entre ville et campagne et la relocalisation du bassin versant énergétique.

L'objectif des *Métamorphoses* est aussi de proposer une entrée visuelle à notre parcours *Reforme* : le lecteur, peut-être interpellé par cette radicalité, pourra alors être intéressé à reconstruire le parcours en sens contraire. Les *Métamorphoses* synthétisent également un résultat important de cette recherche : la forme urbaine gouverne davantage l'offre énergétique que la demande.

Enfin, pour conclure, la fin de ce rapport détaille l'ensemble des implémentations pédagogiques conduites par les membres de l'équipe au cours de ces deux dernières années. Pour l'ensemble des trois parties, des compléments sont disponibles pour compléter, préciser certains aspects. Nous invitons pour finir le lecteur à consulter le glossaire en fin de ce document ; les définitions des mots écrits en italique tout au long de *Reforme y* figurent.



Livrable 3 : le logiciel territorial. Une application développée dans le cadre de Réforme et de la troisième partie, les Métamorphoses. Explorer la péréquation territoriale en vue d'homogénéiser les densités de demande et d'offre à l'échelle du territoire français métropolitain.

[37] Le régime permanent correspondant à l'égalité entre offre et demande énergétique. Dans ce régime, l'état du stock est constant.

Un champ de blé en Seine-et-Marne. La photosynthèse, mécanisme biologique essentiel de conversion de l'énergie solaire en énergie disponible et stockage. Elle était l'essentiel de l'approvisionnement énergétique de l'humanité jusqu'au 18ème siècle (image Wikipedia)

Partie 1. Les Représentations

« *Il n'y a pas une crise de l'énergie, il y a une crise de l'ignorance.* »
Buckminster Fuller.

« De plus en plus d'ingénieurs participent à des processus techniques dont ils ignorent le fonctionnement, mais qui ruinent le monde. »
Bernard Stiegler

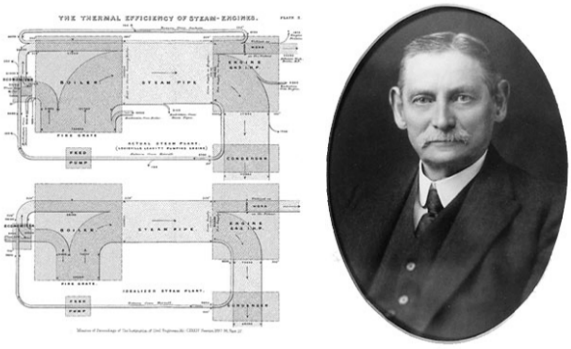
Introduction

Voir l'énergie

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

Dans la typologie des systèmes de représentation, les diagrammes de Sankey[38] sont sans doute les plus efficaces pour révéler embranchements et transformations successives des flux d'énergie[39].

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.



A gauche, l'un des premier diagrammes conçu par Matthew Henry Phineas Riall Sankey (1853 -1926). A droite, portrait du capitaine irlandais Sankey. 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.

[38] P. Riehmann, M. Hanfler, and B. Froehlich*: Interactive Sankey Diagrams*, InfoVis 05: proceedings, IEEE Symposium on Information Visualization, 2005
[39] MacKay D., *Sustainable Energy Without the Hot Air*. Voir bibliographie.

Les diagrammes de Sankey sont utilisés dans le domaine de l'énergie, de l'économie, de l'industrie, et bien d'autres domaines encore. Ils permettent de comprendre visuellement où et quand se passent les transferts les plus importants : l'épaisseur des flèches renseigne l'intensité du flux.

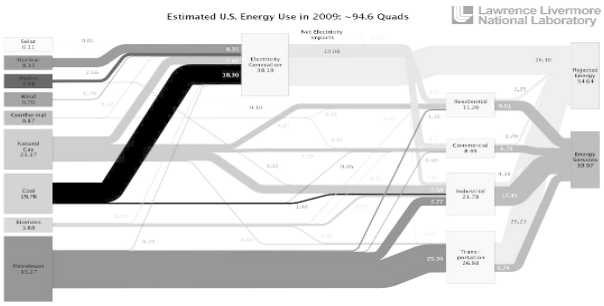
Les diagrammes de Sankey expriment également une direction temporelle au cours d'un processus. Pour l'énergie, ils permettent ainsi de détailler les pertes successives de *qualité* énergétique de la gauche vers la droite ; ou de en haut vers en bas (ce qui sera le cas sur l'outil numérique *Reforme*).

A l'heure où les territoires enclenchent des stratégies de transition[40], il s'agit de proposer 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. C'est l'un des enjeux de l'outil *Reforme* qui sera présenté au cours de cette partie. L'énergie doit devenir en effet un objet graphique pour dialoguer dans la dialectique formelle du projet spatial et politique.

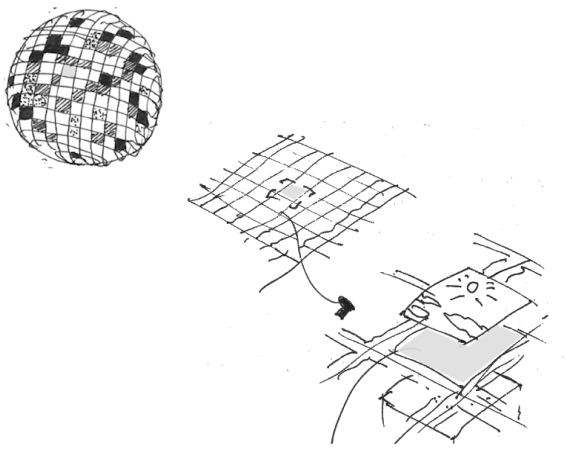
Vers des éléments finis énergétiques ?

Pour les travaux de climatologie, les chercheurs développent des modèles numériques sophistiqués : ils découpent la surface du globe, parcellisent son atmosphère afin d'envisager nos lendemains climatiques. Et pour analyser la dynamique énergétique de notre planète ? Pas grand-chose.

Pour les besoins de notre recherche, nous avons souhaité initier le développement du cadre formel d'un modèle aux éléments finis de la surface terrestre pour analyser *offre, demande, stock* ainsi que les échanges sur une partition donnée de la surface terrestre. Nous pourrions ainsi être plus à même d'identifier *les dynamiques de notre espace-temps énergétique.*



Exemple de diagramme de Sankey : consommation énergétique états-unienne en 2009 (source Lawrence Livermore National Laboratory and the US Department of Energy)



Préfigurer un modèle aux éléments finis des consommations, des productions, des stocks et des échanges énergétiques à l'échelle du globe.

[40] Songeons au récent « Master Plan » proposé par Rifkin pour la région Nord-Pas de Calais.

La « géonergie » : une nouvelle discipline ?

Pour illustrer cette approche, nous avons d'abord choisi une *partition spatiale, triviale et unidimensionnelle* : analyser l'offre et la demande énergétique selon la latitude. En s'appuyant sur les bases de données disponibles, nous avons établi une corrélation selon la latitude terrestre de l'offre énergétique et de la demande énergétique.

Les résultats sont édifiants du point de vue de la force des corrélations ; ils mettent aussi en lumière des questions géopolitiques fondamentales sur la diversité des feuilles de route géographiques permettant de tendre vers la perspective du *régime permanent* (ou de l'autonomie énergétique). Enfin, ils révèlent l'inéquité fondamentale entre pays du Nord et pays du Sud[41].

Au-delà de ces dimensions géopolitiques, ce premier exercice révèle un territoire d'exploration de recherche liant la question spatiale et la question énergétique. A grande échelle, les questions énergétiques sont en général abordées de façon continentale ou sur les périmètres géographiques nationaux.

En faisant « tomber les frontières », et en analysant la problématique énergétique de façon purement physique et spatiale, cette analyse suggère peut être une relecture des questions énergétiques terrestres analysées selon les coordonnées en latitude et en longitude.

$$\phi(lat).\eta(lat) \equiv d(lat).C(lat)$$

L'équation du régime permanent énergétique écrit selon la latitude : le produit du flux solaire terrestre moyen par le rendement moyen de conversion égale la densité de population par la consommation moyenne primaire d'énergie

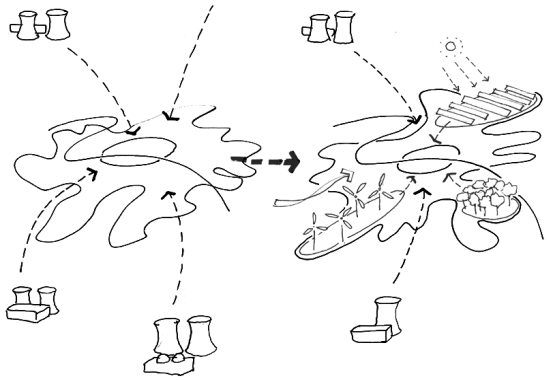
L'aire de captation d'énergie du Grand Paris

Dans le cadre de la consultation du Grand Pari de l'Agglomération Parisienne, nous étions quelques-uns de la présente équipe à prendre part au groupement AJN-AREP-MCP. L'enjeu énergétique était au cœur des préoccupations de la réponse de notre équipe, et nous écrivions[42] en 2008 :

« *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 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 […] »

Dans le cadre de cette deuxième section des *Représentations*, nous produirons plusieurs recherches sur le territoire francilien. Une première à l'échelle de l'Ile-de-France ; la seconde en analysant avec le support d'Icade, la demande énergétique du Parc des Portes de Paris. Ces derniers résultats fourniront d'ailleurs une matière première de données pour notre outil *Reforme*.



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. Première consultation pour le Grand Paris et contributions d'Elioth à l'équipe AJN-Arep-MCD en 2008.

[41] Entendre les pays situés à proximité de la bande équatoriale. En 2010, la bande tropicale contient près de la moitié de la population mondiale.

[42] *Naissances et renaissances de mille et un bonheur parisien*, Nouvel J., Duthilleul J.M. et Cantal-Dupart M., Les éditions du Mont Boron, avril 2009, 638 pages. Extrait « *Introduction au développement durable* », R.Ménard

L'outil Reforme

Une composante importante du projet consiste à élaborer une infrastructure communicante, un « châssis numérique » autorisant un *crowd-sourcing*[43] des informations relatives à l'énergie. A l'heure des *open* et des *big data* et en cette période où les outils numériques offrent des capacités de représentation géographique augmentée[44], il s'agit de proposer les prémices d'un outil simple et ergonomique permettant la centralisation et la capitalisation de données énergétiques, spatialisées et temporalisées, et ce, à différents stades de son cycle de vie : extraction, production, transport, distribution, consommation, stockage et retraitement.

Le développement des API[45] (celles-ci étant en interface avec les bases données de géographiques) autorise l'accès à une multitude de couches d'informations spatialisées, et mises à jour régulièrement. La mise en ligne et à disposition de cet outil revêt à nos yeux un intérêt pédagogique crucial : rendre concret les chemins de l'énergie et participer de ce fait à réduire « *l'illettrisme énergétique* ».

D'un point de vue épistémologique, les grandeurs physiques associées à l'énergie sont d'abord examinées du point de leur dynamique temporelle. La puissance correspond à la mesure du gradient temporel d'une quantité énergétique. Qu'en est-il d'une « culture du gradient spatial[46] » ? D'une mesure de l'évolution spatiale des quantités énergétiques ?

Fonctionnalités

L'outil *Reforme* s'attache à décrire de façon visuelle les échanges d'énergie entre plusieurs territoires sur cinq pas de temps : 1750, 1850, 1950, 2000 et 2050. Nous invitons aussi le lecteur à explorer momentanément la dernière partie de cette recherche, les *Métamorphoses*, pour analyser les différents scénarios globaux *Reforme.*

L'outil *Reforme* propose deux cadres d'analyse spatiale, associés dans le premier cas à une partition fixe de la planète selon cinq territoires[47], et dans le second à deux territoires :

1. Le premier, focalisé sur l'aire francilienne, relate les échanges d'énergie entre le Parc des Portes de Paris, Paris (moins l'emprise du Parc des Portes de Paris), la France (sans Paris), l'Europe (sans la France) et le reste du monde sans l'Europe. L'utilisateur peut alors simuler le comportement énergétique de ces cinq territoires jusqu'en 2050.
2. Le second, laisse plus de liberté pour l'utilisateur puisqu'il peut implémenter son propre territoire. Cela suppose aussi de documenter l'histoire énergétique de ce territoire (et de ceux du reste du monde) selon les cinq pas de temps évoqués avant.

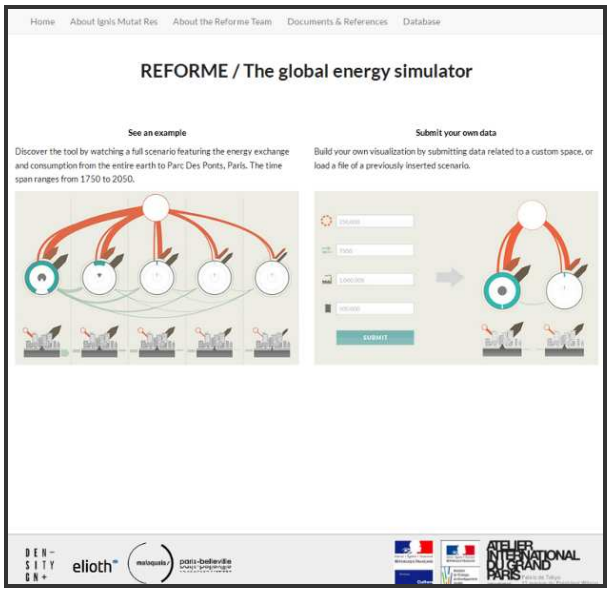
Dans ces deux situations, et à chaque temps, l'utilisateur de l'outil peut alors constater :

1. L'*offre* énergétique renouvelable (et le niveau de *solarisation* du territoire) ;
2. L'état de son *stock* ;
3. La *demande* énergétique ;
4. La nature des échanges au sein de la partition, entre les différents territoires.

Simuler la permanence énergétique

La conclusion de cette première partie de notre recherche permettra de voir émerger une dynamique entre aire spatiale d'influence énergétique, démographie et développement technique.

Ce travail de diagnostic fournira la base du travail d'un second développement : les conditions nécessaires à l'émergence de l'autonomie énergétique en affinant les éléments de caractérisation de l'*offre* et de la *demande* énergétique.



Page d'accueil de l'outil Reforme (solar-reforme.org)

[43] La traduction littérale de *crowdsourcing* est « approvisionnement par la foule, ou par un grand nombre [de personnes] ».
[44] *Google Map, Google Earth, OpenStreetMap,…*
[45] *Application Programming Interface* ou API
[46] Du point de vue des unités de la physique, on rappellera qu'un gradient spatial d'énergie est homogène à une force.
[47] Nous emploierons par la suite également le terme d' « agent énergétique ».

Espace, temps, énergie

Analyse selon la latitude

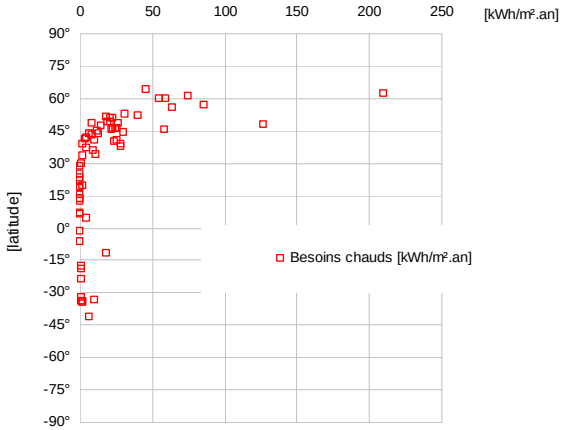
Avant de plonger dans les éléments calculatoires permettant de fournir les intrants numériques tant pour l'outil *Reforme* que pour la documentation technique et mathématique de la *Formalisation*, il s'agit ici d'aborder le problème de façon simplifiée pour dégager quelques tendances et comportements généraux.

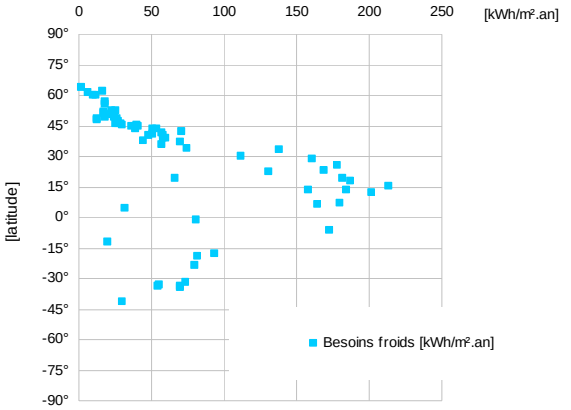
Nous explorons dans cette section les conditions nécessaires au *régime permanent*, soit l'égalité entre l'*offre* énergétique et la *demande* (correspondant à l'équilibre entre production d'énergies renouvelables et consommation d'énergie). Dans cet exercice, la mesure des stocks n'est pas renseignée.

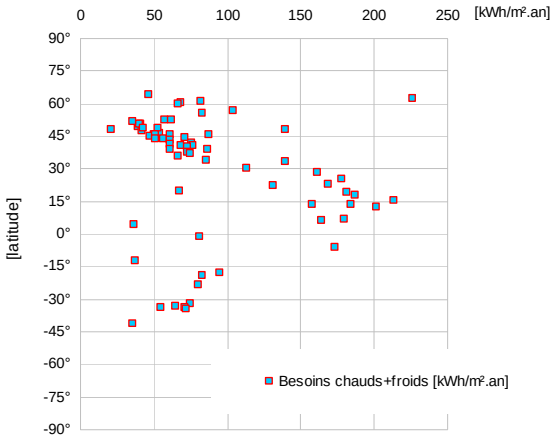
La décomposition par latitude

Pour illustrer cette démarche, commençons par une partition simple. Découpons notre planète selon ses parallèles. L'intuition est triviale : le gisement solaire (et donc l'*offre* énergétique potentielle) est corrélée à la latitude : le soleil est bien plus disponible et puissant aux tropiques qu'en Sibérie. Comme hypothèse simplificatrice, les formes non solaires d'énergies renouvelables comme la géothermie et l'énergie des marées ne sont pas prises en compte[48].

Inversement, on connaît la corrélation entre consommation individuelle d'énergie et pouvoir d'achat. Dès lors, la *demande* d'énergie doit aussi être assez fortement corrélée avec la latitude : les riches au Nord qui consomment beaucoup, les pauvres au Sud qui consomment peu.







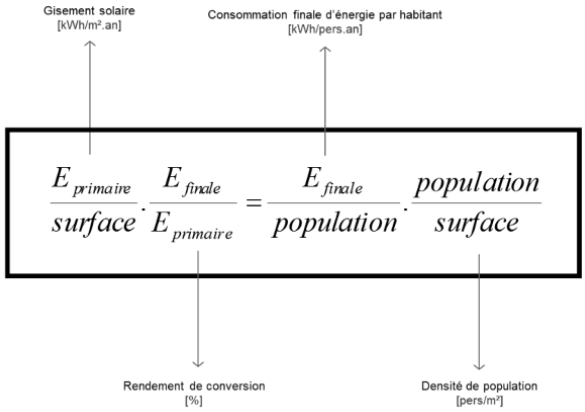
Graphiques des besoins chauds, froids et somme des besoins selon la latitude. Calculs effectués avec le logiciel de thermique dynamique monozone, le Clim'elioth. Les besoins de contrôle climatique dans le bâti vont globalement croissants en se rapprochant de l'équateur.

[48] Retenons qu'à l'échelle globale, leur gisement est très faible comparé à l'ensemble des formes solaires de l'énergie comprenant notamment l'éolien, l'hydraulique et les énergies marines.

Une partition linéaire

Dès lors, ce premier « modèle d'éléments finis terrestres » consiste à découper la surface du globe selon ses parallèles. Dans ce modèle, pas d'échanges entre les « tranches » ainsi découpées : on tache de mesurer les conséquences en terme de solarisation, susceptibles de faire atteindre la *permanence énergétique* de façon autonome et ce, par bande de latitude. La dynamique des stocks n'est pas intégrée dans cette approche. Cette analyse a d'abord pour vocation d'analyser les problématiques propres à chaque latitude pour tendre vers l'autonomie énergétique.

Cet examen fait écho à l'exercice largement documenté par David Mac Kay dans son ouvrage *Sustainable Energy Without the Hot Air*. Sur le périmètre de la Grande-Bretagne, il tache de scénariser les trajectoires techniquement et socialement envisageables pour tâcher de faire converger *offre* et *demande* énergétique : un scénario de croissance pour la première par l'implémentation de technologies renouvelables ; réduction de la *demande* par l'efficacité et la sobriété. Cette approche rejoint aussi les travaux et les scénarios élaborés par l'association *Négawatt*[49] pour la France, articulant ses propositions autour de la trilogie « sobriété, efficacité et renouvelables ». La deuxième partie, la *Formalisation*, complétera les apports initiés par David Mac Kay dans la démarche décrite dans son ouvrage. Pour ce premier modèle, il s'agit d'abord d'estimer le niveau de *solarisation* à atteindre à demande énergétique constante[50].

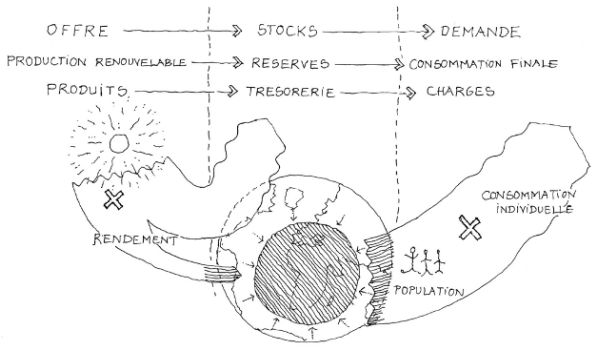


L'équation fondamentale de la permanence énergétique : l'offre à gauche, la demande à droite.

Nota sur les unités employées

L'unité la plus courante consiste en général à quantifier l'énergie en TEP[51] (tonnes équivalent pétrole) mais elle sera un jour ou l'autre nécessairement une unité du passé.

Dans *Reforme*, les quantités d'énergie seront exprimées en Watt et ce, afin d'être homogène avec la démarche de la *Société à 2000 Watts*[52] initiée en Suisse. Rappelons qu'elle consiste notamment à définir les stratégies urbaines, architecturales et d'usage pour parvenir à diviser par environ trois la consommation primaire d'énergie par individu. En 2009, la consommation moyenne d'énergie primaire était d'environ 5500W par Français ; à l'échelle planétaire, la moyenne état légèrement supérieure à 2000W par terrien.



Représentation du métabolisme de l'énergie à l'échelle globale. Le flux constant de rayonnement solaire sur la terre est de l'ordre de 80 000 TW alors que la consommation de combustible fossile correspond à une puissance moyenne de 15TW. Près de 90% de notre production primaire est d'origine fossile, et provient donc du stock. Nous ne convertissons qu'avec un rendement très faible les 80 000TW disponibles.

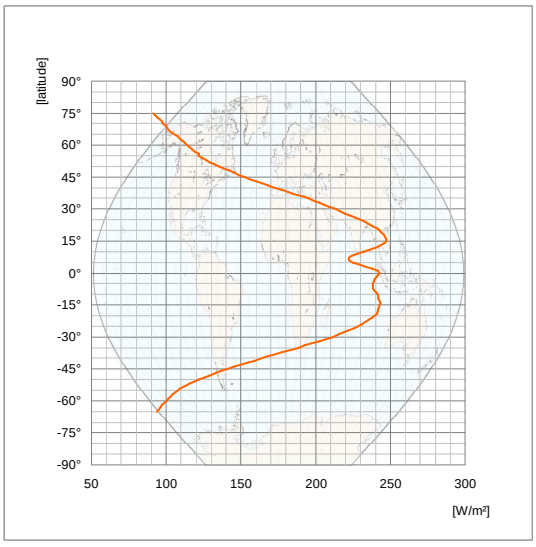
[49] https://www.negawatt.org/ . Voir également références dans la bibliographie.
[50] Notons que dans son développement, cette méthode supposera un exercice de prospective sur la scénarisation de la demande par bande de la latitude en estimant les tendances possibles tant pour la démographie que pour la demande individuelle d'énergie.
[51] Tonnes équivalent pétrole.
[52] Pour convertir la valeur en kWh, il suffit alors de multiplier par 8,76 (8766 heures par an). Comme premier ordre de grandeur, 2'000W c'est environ la quantité d'énergie solaire reçue par 10 à 15m² de la surface du globe.

L'offre solaire par latitude

Pour évaluer l'*offre*, par souci de simplification, nous avons de prime abord considéré que le potentiel était corrélé à l'irradiation solaire terrestre. Cette hypothèse omet donc la diversité des gisements locaux solaires spécifiques comme : l'hydraulique, l'éolien ou encore les énergies marines pour les territoires situés à proximité des côtes. Elle néglige également les ressources géothermiques et marémotrices ; nous verrons néanmoins plus loin qu'elles sont, à l'échelle globale, négligeables.

Nous avons effectué de nombreuses recherches pour tâcher de trouver la courbe de corrélation du gisement solaire en fonction de la latitude, en vain. Afin de documenter cette approche, nous avons construit un programme avec le logiciel *Processing*[53] pour « lire » les pixels des cartographies rendues disponibles par la NASA de gisement solaire[54].

Grâce à cet important travail, nous avons pu alors retrouver la corrélation du flux moyen solaire[55] selon la latitude. Notons que plus de la moitié de la population mondiale bénéficie du double de l'irradiation solaire reçue par un européen. La géométrie et la cinématique de la Terre brise la symétrie de la *douche solaire*. Un autre déterminisme géographique pourra être à l'œuvre pour les scénarios locaux de *permanence énergétique*.



Graphique de corrélation en latitude de la densité d'offre solaire (irradiation terrestre moyenne). Données source Nasa.

La demande selon la latitude

Les données de demande sont issues de la base de données *International Energy Statistics* et correspondent aux valeurs de consommation primaire d'énergie par pays en 2009. Ces valeurs sont ensuite mises en relation avec les populations de chacun des pays. Nous évaluons ensuite par pays, la surface du territoire. Nous sommes alors à même de décrire la *densité de demande énergétique* par pays. Cette valeur peut par exemple être convertie en flux moyen de puissance et est alors exprimée en W/m².

Pour chaque pays, nous relevons ensuite les valeurs minimales et maximales de son extension en latitude. A cette échelle globale, nous faisons alors l'hypothèse simplificatrice que la *densité de demande* est constante sur l'étendue en latitude du pays. Dès lors, nous pouvons alors agréger les valeurs par latitude pour évaluer les demandes moyennes par bande de latitude.

Une autre façon de construire la corrélation de la demande consiste à analyser aussi la densité de population (pers/m²) selon la latitude tout comme la demande énergétique individuelle selon la latitude (W/pers).

La demande énergétique[56] est alors reconstruite comme le produit de la densité de population par la consommation caractéristique individuelle (et s'exprime alors W/m² ou W/ha ou encore en W/km²) : cela coïncide avec la dualité entre approche eulérienne et approche lagrangienne déjà évoquée précédemment. La demande énergétique se caractérise d'abord à la personne. La densité spatiale de demande s'établit alors avec le produit avec la densité de population humaine.

[53] http://www.processing.org/
[54] https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/global.cgi?email=skip@larc.nasa.gov
[55] En puissance moyenne reçue l'ensemble de l'année (et en comprenant les nuits) par une unité de surface horizontale (en W/m² donc).

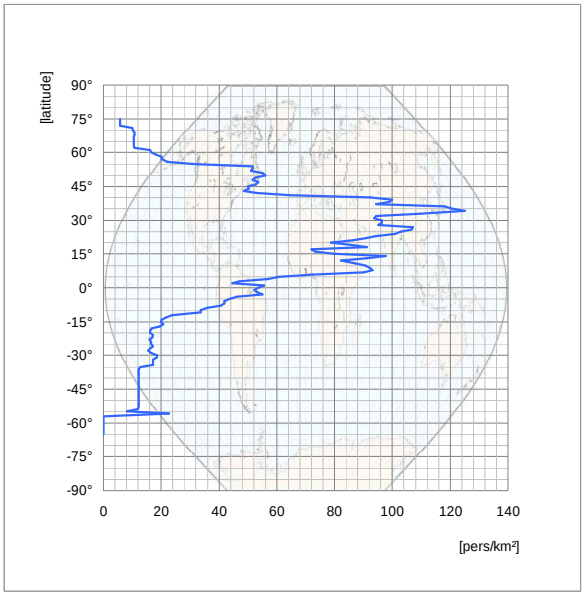
[56] Ou la densité de consommation (en W.m^{-2})

Densité de population

La description de la densité de population selon la latitude est une analyse qui avait été déjà effectuée par le géographe Bill Rankin[57]. Dans le prolongement de ces travaux, et selon la méthode analogue à celle décrite ci-avant pour la demande énergétique, nous avons mis à jour cette analyse.

Zoomons sur notre occupation de la planète et retenons aussi que moins d'un dixième de la population mondiale vit au-dessus de 45 degrés de latitude : le bioclimatisme des baies vitrées orientées au sud ne s'adresse finalement qu'à une minorité !

Notons aussi qu'en 2009, la densité était maximale au parallèle 34°N. Est aussi proposé, en grand format, entre la première et la deuxième partie, le graphique de densité cumulée. Celui-ci permet de lire que le centre de gravité de l'humanité, en 2009, était autour de 20°N.



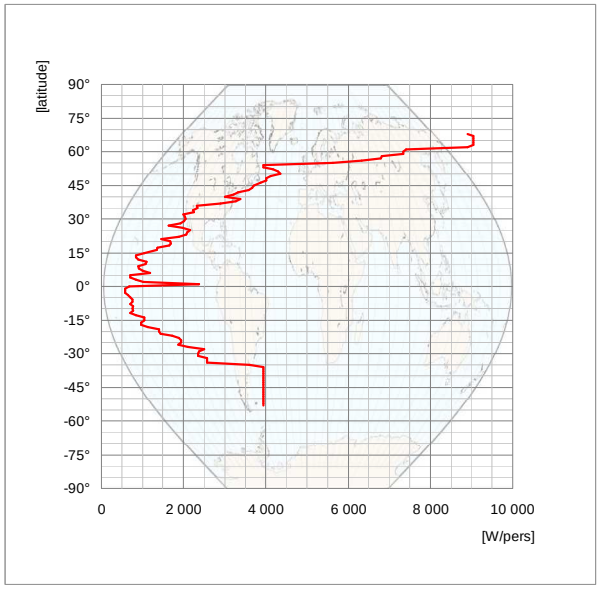
Graphique de corrélation en latitude de la densité humaine.

Consommation par personne

L'analyse est ici exprimée en W/pers. Ce choix d'unité fait écho à la toise de la *Société à 2000 Watts*[58]. Rappelons que cette démarche, initiée en Suisse, consiste à définir les stratégies urbaines et les transformations des usages permettant de diviser par environ trois la consommation primaire d'énergie par individu[59].

Plus la latitude croit en valeur absolue, plus la consommation individuelle augmente. Il en sera plus largement question dans la partie suivante, la *Formalisation*.

Retenons toutefois que la grande majorité de la population mondiale vit en deçà de 2000W, notamment les personnes habitant dans la bande tropicale entre 22°S et 22°N. A l'inverse plus la latitude croit en valeur absolue, plus la demande individuelle augmente (et retenons que cela n'est pas nécessairement du fait la plus grande rigueur climatique). Cette corrélation, cruciale, met clairement en évidence la « tension énergétique » de la *demande* de façon géographique.



Graphique de corrélation en latitude de la densité de demande énergétique primaire par personne.

[57] http://www.radicalcartography.net/

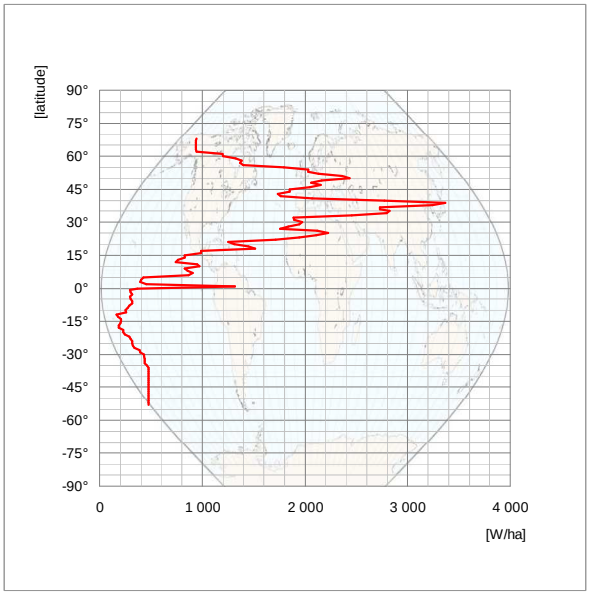
[58] Pour convertir la valeur en kWh, il suffit alors de multiplier par 8,76 (8766 heures par an). Comme premier ordre de grandeur, 2000W c'est environ la quantité d'énergie solaire reçue par 10 à 15m² de la surface du globe.

[59] En 2009, la consommation moyenne d'énergie primaire était d'environ 5500W par Français.

La demande en densité spatiale

Cette valeur est alors le produit de la densité de population par la consommation –ou la *demande*- énergétique par personne. Exprimée en W par unité de surface, elle peut alors être facilement comparée à la densité d'offre énergétique.

Ce graphique montre que le pic de densité de demande était atteint en 2009 autour de la latitude de 40°N ; la valeur moyenne était alors autour de 3400W par hectare, soit environ 0,3W/m². Nous verrons aussi plus loin dans la *Formalisation* qu'en situation urbaine et donc de plus grande densité, la densité de demande peut être bien plus importante pour tendre dans les situations les plus denses vers 100W/m².



Graphique de corrélation en latitude de la densité de demande énergétique primaire par unité de surface.

Conséquences territoriales

L'inconnu d'aménagement

Comment donc *re-solariser* ? Comment définir des feuilles de route de réaménagement, d'investissements technologiques et de sobriétés adaptées aux territoires ? Examinons quelques valeurs d'offre énergétique selon la nature de la récolte. Hormis certaines géographies disposant d'une concentration particulière de l'offre[60], la production renouvelable est un flux. La question spatiale devient intrinsèque.

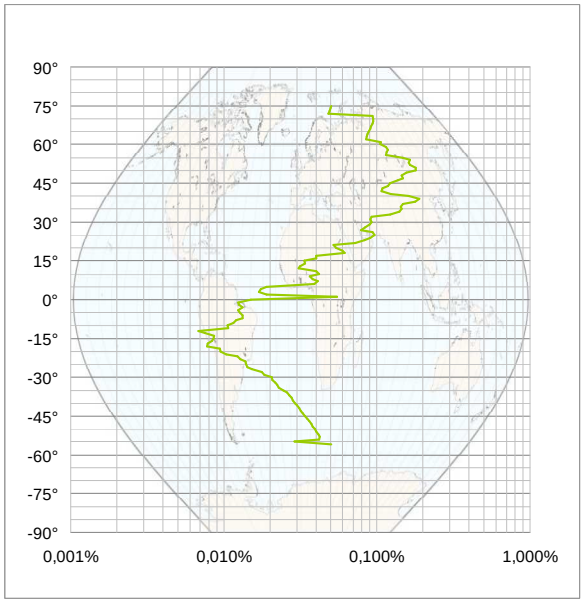
Nous possédons alors les termes pour tenter de définir par bande de latitude, la valeur de rendement assurant l'équilibre entre *offre* et *demande* énergétique. Le ratio de *solarisation* garantissant l'autonomie correspond alors au rapport entre demande et offre. Notons que la toise de *solarisation* pour le Nord devrait être 25 fois supérieure aux territoires proches de l'équateur ! Quand la tension Nord-Sud s'inverse…

Quelques valeurs comparées

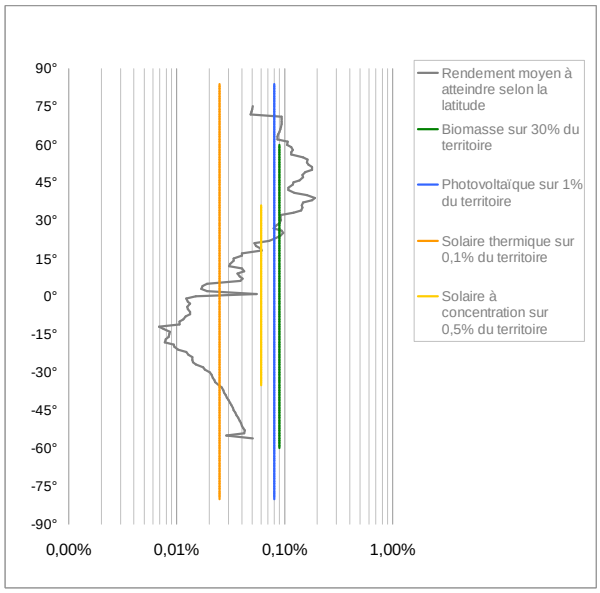
En introduction à ce qui sera plus largement développé dans la *Formalisation*, le graphique ci-dessous met en correspondance les feuilles de route de *solarisation.* En première approche, nous comparons les attentes de niveau moyen de conversion solaire au regard de techniques unitaires de production associés à une hypothèse d'occupation du territoire.

On constate que pour une majorité de la population moyenne -celle située approximativement dans la bande tropicale- l'implémentation à un niveau raisonnable de technologies à rendement assez élevée (supérieur à 5% en plan) permettrait de dépasser les attentes permettant d'atteindre les objectifs de *permanence énergétique*[61].

Ce premier exercice de confrontation entre *offre, demande*, résultat de *solarisation* attendu et mix permettant de l'atteindre sera récurrent dans le cadre de l'exploration de *Reforme.*



Graphique du taux de solarisation moyen nécessaire à l'autonomie énergétique par bande de latitude.



Graphique comparé des taux de solarisation avec quelques technologies de conversion solaire.

[60] Ce qui est le cas de la Suisse pour l'hydraulique. Ressources hydrauliques, gisement éolien, gisement géothermique particulier, proximité maritime et exploitation des énergies marines dérivées du solaire…

[61] Avec même paramètre de densité de population et de demande énergétique individuelle (W/pers).

Analyse en Ile-de-France

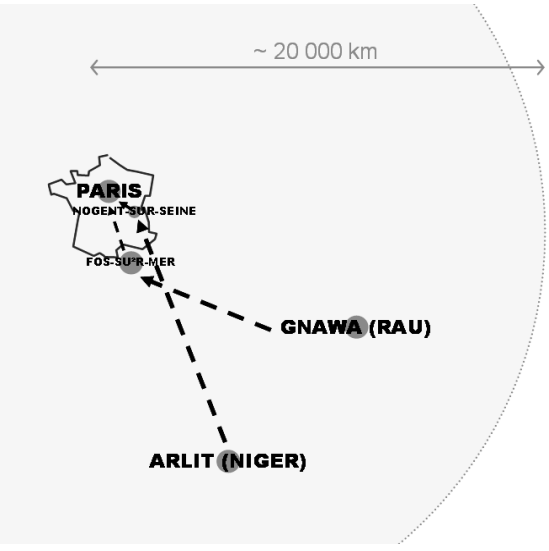
Le bassin versant énergétique

Rappelons une première ambition afférente aux *Représentations* : s'attacher à représenter l'*hypertache* territoriale nécessaire à la nourriture énergétique de l'urbain.

Nous invitons une nouvelle fois le lecteur à sauter (provisoirement) cette partie pour voir quelques résultats afférents au remembrement énergétique du territoire français et plusieurs hypothèses d'élargissement de l'Ile-de-France dans la deuxième section des *Métamorphoses*.

L'outil *Reforme,* présenté dans le prolongement de cette section, fournira le véhicule graphique pour représenter les interdépendances énergétiques entre plusieurs territoires.

Avant cela, notre recherche s'attachera à documenter la problématique d'approvisionnement énergétique pour le territoire de l'Ile-de-France, ainsi qu'à une échelle plus réduite, aux limites administratives de Paris.



La croissance planétaire des rayons caractéristiques des bassins versants énergétiques.

La dualité énergétique ville-campagne

Par cette analyse et cet exemple, nous souhaitons réinterroger la dualité ontologique ville-campagne sur la question énergétique. Dans une filiation *kahnienne* d'un *servant-servi* géographique, nous esquissons représentations et vocabulaires de l'hydrographie : voir et comprendre les *bassins versants énergétiques*. John Mc Neill rappelle par exemple que le bois de chauffe utilisé à Delhi provient de lieux de production distants de 700 kilomètres ; que la surface de récolte nécessaire pour chauffer Vancouver est 20 fois supérieure à celle de la métropole[62].

Avant le début de l'exploitation du *solaire ancien*, la dualité ville-campagne était claire. D'un point de vue énergétique, le rural était le territoire de la production agricole, de l'exploitation de la sylviculture, de l'élevage et de la chasse, et ce, depuis le néolithique. La campagne était en définitive l'espace de conversion de l'énergie solaire, essentiellement gouvernée par la production et la transformation de la biomasse. *La campagne était le lieu de l'offre.*

A contrario, la ville, dans sa frontière avec le rural, était pour l'essentiel le lieu du regroupement humain et de la consommation de l'énergie. La ville était –et reste- essentiellement le territoire de la *demande*[63]. La consommation énergétique était alors principalement gouvernée par les besoins alimentaires et les besoins de chaleur.

Aujourd'hui, la croissance de la demande énergétique individuelle (couplée à l'augmentation de la population dans la plupart des situations urbaines) a accentué cette densité spatiale de la demande énergétique[64]. La ville (et *a fortiori* la métropole) s'est muée en lieu de très haute demande énergétique.

A l'inverse, la production énergétique rurale du début du 19ème siècle n'a pu suivre les qualités[65] et la facilité d'extraction du *solaire ancien*. Cet état de fait s'est aggravé avec l'exploitation de l'ensemble des ressources fossiles au cours du 20ème et du 21ème siècle. Le rural s'est alors transformé comme territoire dédié à la production de la biomasse pour nos besoins alimentaires et dont la productivité[66] a été *boostée* par des intrants énergétiques d'origine fossile (mécanisation de l'agriculture, engrais, produits phytosanitaire, ...).

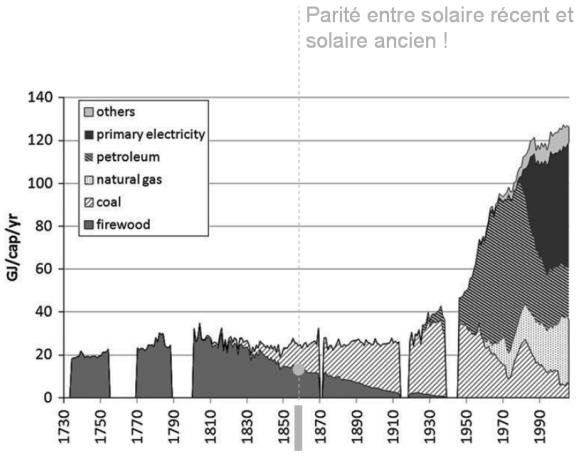
[62] *Du nouveau sous le soleil*, p473
[63] Nous verrons dans la troisième partie, les *Métamorphoses* comment cette caractérisation peut être réinterroger.
[64] Exprimée en W/m².
[65] Au sens du rapport exergie sur quantité totale d'énergie.
[66] Voir *Petrole Apocalypse,* Yves Cochet

Les transitions de Paris

Pour illustrer ces mutations, notre problématique initiale - en reprenant une partie des réflexions initiées dans le cadre de la première consultation pour le Grand Paris- souhaitait représenter les différentes *transitions* géographiques des *bassins versants énergétiques* de l'aire parisienne.

Il s'agissait d'évoquer les « croissances dendritiques » du «servant-servi géographique » entre l'aire parisienne et son dual, ce dernier étant à la surface du sol avant la première mutation, jusqu'à fabriquer des liens invisibles avec des sous-sols très éloignés.

La densité de demande analysée dans la troisième partie de Reforme, les Métamorphoses. La situation singulière de l'Ile-de-France et d'une densité de demande énergétique très supérieure à la moyenne nationale.



Evolution de la consommation primaire d'énergie par Parisien au cours des trois périodes. D'après Kim et Barles.

L'aire d'approvisionnement

Sur le périmètre parisien, cette analyse a été richement documentée[67] en 2011 par Eunhye Kim et Sabine Barles. Dans cet article, les auteurs ont notamment mis en évidence que la distance moyenne des énergies primaires consommées dans Paris était aujourd'hui supérieure à 4000 kilomètres. Elles ont également analysé de 1730 à 2000 la nature et l'évolution des mix primaires (la constitution de l'*offre* et du *stock* pour subvenir à la demande).

Le temps 1 (avant 1800)

Avant la première révolution industrielle et l'ère du charbon, le rayon du bassin énergétique de Paris était alors inférieur à deux cents de kilomètres[68]. La consommation énergétique individuelle était alors de l'ordre 20GJ : la société de Paris était à 600W !

Notons toutefois que cette correspondance avec la *Société à 2000W* ne correspond pas au même périmètre : la *Société à 2000W* intègre l'alimentation et la consolidation des intrants sous forme d'énergie grise. Dans l'étude de Kim et Barles, ces deux demandes énergétiques ne sont pas intégrées dans l'analyse.

Considérons que le Parisien avant le début du 19ème siècle devait sans doute consommer un peu plus que 600W. Cette valeur semble cohérente avec les valeurs présentées plus loin dans les scénarios *Reforme* : en 1750, la moyenne planétaire était d'environ 450W par individu.

Le temps 2 (1800-1900)

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 *dé-solarisée*. 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. A 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* ». Rappelons-nous qu'une partie importante de la population mondiale vit encore aujourd'hui avec moins de 1000W.

[67] *The energy consumption of Paris and its supply areas from the eighteenth century to the present.*
[68] Ibid

Le temps 3 (1900 à 2000)

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.

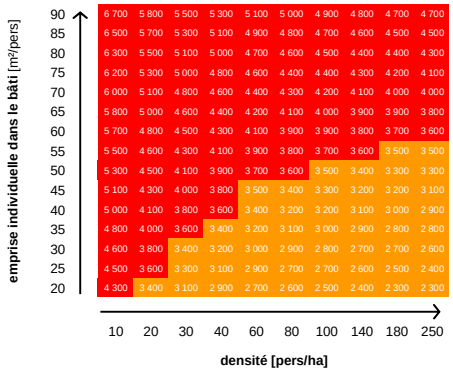
Durant cette période, la diversité des mix ainsi que l'épuisement des stocks proches (notamment le charbon) concourt à accroître de façon drastique la distance moyenne d'approvisionnement. Selon Kim et Barles, en 2000, elle était de 3850 kilomètres pour Paris. La distance maximale était de plus de 15000 kilomètres, soit presque l'antipode de l'Ile-de-France.

La croissance de la demande

Parallèlement, les usages énergétiques ont explosé et la demande individuelle est passée à près de 130GJ par an et par Parisien en 2000, soit l'équivalent de 4000W.

Rappelons une nouvelle fois que le périmètre de comptage n'intègre ni l'alimentation (et sa consommation énergétique en amont de la chaîne de production) ainsi que les intrants énergétiques transformés. Paris comporte également très peu d'industries, et cet état de fait minore encore l'emprise *énergétique réelle* du Parisien contemporain[69].

Rappelons qu'à l'échelle nationale, la consommation primaire d'énergie par Français est de l'ordre de 6000W (et cette valeur ne prend pas en compte les demandes énergétiques « invisibles » des matières et produits importés).



Un extrait du modèle (d,e) et du scénario 1 présenté dans la Formalisation. Avec 60m² par personne (en foisonnant tous les usages du bâti) et avec une densité de 200 personnes par hectare, le Parisien contemporain est environ à 4000W sur une partie de son empreinte énergétique.

[69] Voir *Les nouvelles représentations de l'énergie*, référence rappelée dans la bibliographie et dans la conclusion #2 des *Métamorphoses*.

Une Ile-de-France agrandie ?

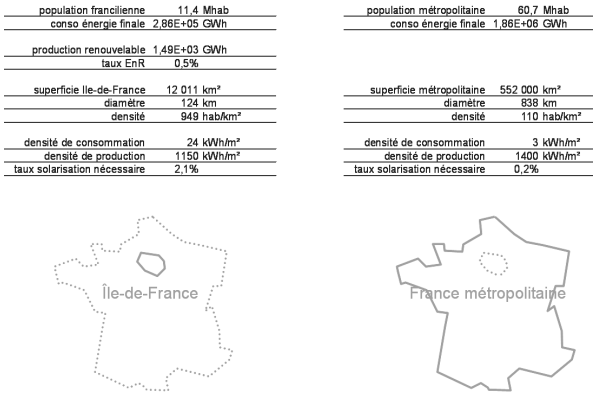
Introduction

L'Ile-de-France comparée au reste de la France

Le gisement solaire en Île-de-France est environ de 1150kWh par m² et par an. Cela correspond à un flux moyen d'irradiation solaire de l'ordre de 130W.m^{-2}. Par comparaison, le gisement moyen en France métropolitaine est de 1400kWh par m² et par an, soit 160W.m^{-2}.

Retenons également que la densité francilienne[70] est près de dix fois supérieure à la moyenne nationale. En première hypothèse, et en considérant que la consommation énergétique individuelle entre un Francilien et un autre habitant français sont similaires, nous en déduisons alors que la densité spatiale de consommation énergétique est dix fois plus importante pour l'Ile-de-France que pour le reste du territoire métropolitain.

A l'échelle de l'Ile-de-France, en l'absence d'une politique volontariste et efficace de la réduction de la demande énergétique (et donc avec l'hypothèse d'un maintien d'une consommation *pro persona* d'environ 6000W), on constate que le rendement moyen de conversion de l'énergie solaire devrait être d'environ 5% sur la totalité du territoire francilien[71].



Comparaison des densités de demande et d'offre énergétique entre l'Ile-de-France et le territoire métropolitain.

[70] Près de 950 habitants par km² dans le cas de l'Ile-de-France contre 90 habitants par km² pour le reste du territoire français métropolitain.
[71] On pourra se reporter aux *Métamorphoses* et à sa première section pour des données chiffrées.

Feuilles de route nationales

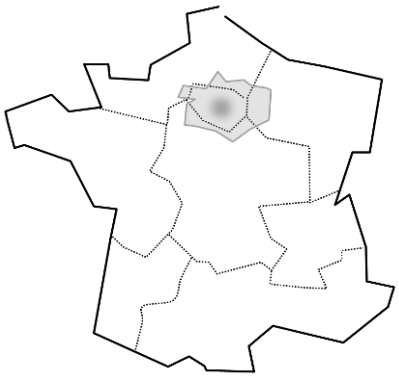
Dès lors, l'Ile-de-France a une tache bien plus ardue que le reste de la France :

- Une densité de demande près de dix fois supérieures au reste du territoire nationale ;
- Une densité d'offre de près de 20% inférieure à la moyenne nationale (en négligeant les apports énergétiques du Dogger, l'un des principaux aquifères disponibles en Ile-de-France[72]) ;
- Un territoire contraint par la complexité de ses aménagements.

Dans le prolongement de l'analyse et des conclusions du premier modèle aux éléments finis (celui de la comparaison par bandes de latitude terrestre), nous pouvons en déduire que le niveau de *solarisation* permettant d'assurer la *permanence énergétique* francilienne devrait être douze fois plus élevé !

Avec une ambition énergétique plus mesurée, cela signifie que pour le même objectif d'autonomie énergétique, les transformations d'aménagement, les implémentations techniques d'énergies renouvelables devraient être aussi douze fois plus intenses ! A l'heure des réflexions nationales sinon européennes sur la transition énergétique, cette problématique interpelle l'équilibre et l'équité des territoires.

Les nécessités de notre *mutation énergétique*[73] réclameront de nouvelles programmations territoriales (pour favoriser la production de biomasse sur les espaces aujourd'hui non valorisés) comme des investissements nécessaires pour l'implémentation de centrales de production d'énergies renouvelables tant sur le bâti, sur les infrastructures et les délaissés (solaire, éolien, géothermie etc.).



Une préfiguration d'un redécoupage territorial pour refonder l'équité d'offre énergétique ?

Décrire les densités de demande énergétique (à différentes échelles de moyenne territoriale) et produire les « lignes de niveau », les courbes d'iso-valeurs des densités de demande énergétique (en W/m² par exemple)

[72] http://www.geothermie-perspectives.fr/07-geothermie-france/02-basse-energie-03.html

[73] Passer des flux de ponction des *stocks* vers l'accroissement de l'*offre*.

Première cartographie de la demande

Procédure choisie

Dans cette partie, l'analyse porte sur le bilan énergétique de l'Île-de-France et introduit une première étude de la demande d'énergie du bâti comparée à la capacité d'offre, qui serait en première hypothèse, assurée par des panneaux solaires.

Cette étude propose aussi d'évaluer la densité de demande par une autre approche : celle du *contenant* plutôt que celle du *contenu*. La densité de demande peut en effet s'évaluer soit par le produit d'une densité de personnes par une consommation individuelle ; ou sinon, par une densité de consommation du bâti selon une densité morphologique.

Par cette approche, il s'agit alors de tester les horizons d'autonomie selon la prise en compte d'une demande partielle de l'énergie : la consommation du bâti en usage. Pour cette analyse cartographique, la formule simplifiée est la suivante :

surface bâtie de la commune x nombre d'étages x demande spécifique

En première approche, l'estimation de la demande finale énergétique du bâti a été définie à 200 kWh par m² et par an (soit un flux moyen d'environ 23W.m^{-2}). Ainsi la densité de demande énergétique à l'aplomb d'un bâtiment R+3 utilisé sur ses quatre niveau, serait de près de 100W.m^{-2} soit presqu'autant que le gisement solaire disponible ! Ce premier calcul laisse voir apparaître qu'avec des rendements moyen de conversion équivalent limités, le nombre maximum de niveaux assurant une autonomie même partielle sera limité.

Pour évaluer la densité d'offre potentiellement offerte par des panneaux solaires situés en toiture, nous faisons que seule la moitié de la surface de la toiture est exploitable du fait des masques, des édicules techniques mais également de la géométrie des toitures non plates.

Dans le cas de figure où les panneaux solaires sont de type photovoltaïque et que le rendement moyen du panneau est de l'ordre de 10%, cela conduit à l'estimation suivante :

*surface bâtie [m2] * 0,5 * 0,1 * 1150 [kWh/m2/an]*

Première méthode

Elle consiste à évaluer la demande d'énergie engendrée par les usages dans le bâti selon le nombre de résidents et le nombre d'employés dans chaque commune. La surface de bâti utilisé est alors définie statistiquement selon la surface moyenne occupée par un habitant pour les usages résidentiels et les emplois par la surface moyenne associée à l'activité.

Sur la base des statistiques de l'INSEE, les chercheurs du LVMT ont préparé les fichiers des données pour les zones choisies d'Île-de-France. Par conséquent, le fichier «Communes» contient la carte d'Île-de-France divisée en communes. Le tableau de données pour la carte «Communes» comprenne des détails tels que le numéro de la commune, le code postal, le nombre d'habitants et la surface.

La première analyse est effectuée sur la base du nombre d'habitants et le nombre d'employés dans une commune choisie d'Île-de-France. Par hypothèse, on estime la « *surface plancher* » selon le ratio de conversion fourni par l'INSEE. Selon l'institut, chaque Français occupe en moyenne 40 m² pour les usages résidentiels et 10m² pour les usages professionnels. On en déduit la formule suivante :

*surface plancher = [pop2007] * 40 + [emploi_2007] * 10*

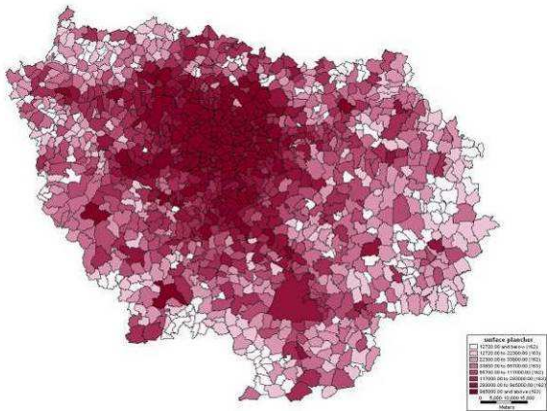
Cette valeur est ensuite multipliée par l'hypothèse de demande finale d'énergie associée aux usages dans le bâti soit 200 kWh par m² et par an. Le modèle comprend en effet une simplification et ne prévoit pas de différenciation d'usage d'énergie en fonction de la destination du bâtiment. Selon cette première hypothèse, la demande finale par commune est alors :

*Demande finale pour le bâti = surface plancher * demande spec.*

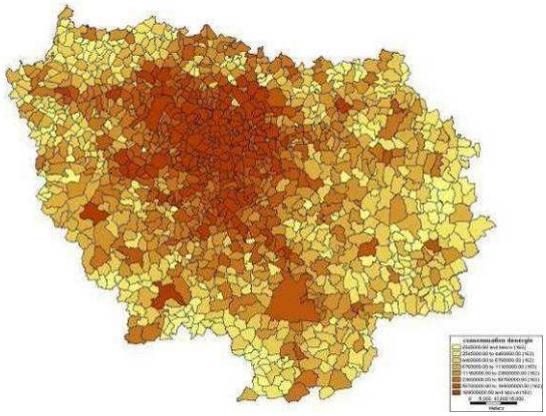
Enfin, la densité de la demande est alors évaluée trivialement de la façon suivante :

Demande / Surface de la commune

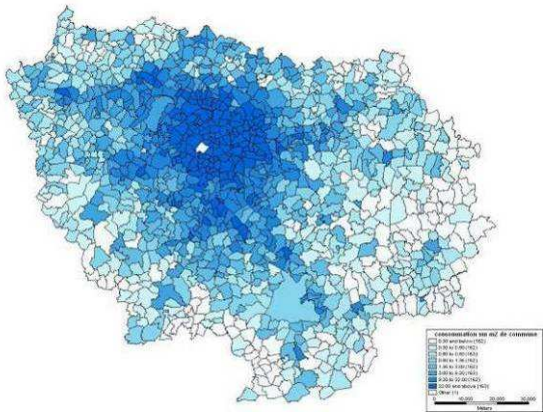
Toutefois, selon ce canevas analytique, les données disponibles par l'INSEE et par le LVMT n'indiquent pas la surface bâtie de chaque commune. L'estimation de l'offre solaire n'est donc pas accessible.



Surface de plancher



Consommation d'énergie des communes



Densité de la demande

Deuxième méthode

Elle consiste à évaluer la « *surface plancher* » par le produit de l'emprise bâti par le nombre de niveaux. Cette dernière information par la colonne « *hauteur* » disponible dans le tableau de données du fichier « BT_TOPO » fourni par LVMT.

Dès lors, en utilisant la quantité prédéterminée d'énergie solaire possible à obtenir, on calcule la différence entre l'usage d'énergie et le gisement solaire possible à utiliser pour produire énergie.

Le fichier BD_TOPO développé par LVMT comprend les données d'une commune choisie tels que le numéro, l'emplacement de l'immeuble, la fonction principale du bâtiment, son volume et sa hauteur.

Notons aussi que cette base de données indique la hauteur du bâti et non le nombre de niveaux. Dès lors, pour reconstruire cette information, nous sommes partis de l'hypothèse d'une hauteur de 4 mètres. Elle correspond à une moyenne informelle entre les 2,5-3 mètres classiques pour le résidentiel, au plus 3,5 mètres pour les autres programmes et usages. Par conséquent, le chiffre utilisé dans la formule suivante, ne donne qu'une valeur approximative qui peut différer de la réalité :

$$nombre\ d'étages = 1 + [Hauteur] / 4$$

La poursuite de l'analyse s'effectue alors selon la même méthode que la première. La donnée de l'emprise bâtie permet toutefois d'estimer l'offre potentielle.

Nous pouvons dès lors établir des comparaisons cartographiques entre offre et demande. Il s'avère que le bilan est toujours négatif. Ce résultat est pour partie la conséquence :

1. D'un gisement solaire mesuré en Ile-de-France ;
2. Du rendement relatif des panneaux ;
3. De la proportion de toitures *solarisables* ;
4. Mais surtout de la densité de bâti[74] ;
5. Et d'une demande spécifique importante[75].

[74] Et donc du rapport faible entre surface de toiture et surface de planches à l'aplomb

[75] Les 200kWh par m² et par an de demande.

Conclusions et remarques

La méthode utilisée a adopté un certain nombre de généralisations visant à sa simplification afin de dégager quelques premiers enseignements. Citons notamment l'absence de distinction entre logement individuel et collectif. L'analyse faite par les étudiants de l'ENPC en collaboration avec LVMT montre que la quantité moyenne d'énergie consommée par ménage est plus faible dans Paris intra-muros que sur sa périphérie.

Deuxièmement, imprécision sur l'usage des bâtiments : les énergies consommées dépendent directement de l'usage. Pour obtenir un résultat précis, il faudrait décrire la consommation d'énergie de chaque bâtiment individuellement, ce qui est difficile et physiquement impossible dans le cadre d'un projet de recherche, d'où les données approximatives.

Pour effectuer l'analyse finale, il faudrait ajouter les surfaces au sol de tous les bâtiments pour chaque commune séparément, puis créer un fichier similaire à «Communes » dans la première analyse, et remplir l'élément manquant là, qui est la surface au sol.

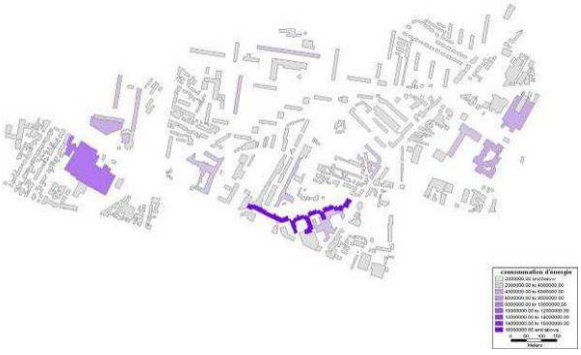
De cette façon, on obtiendrait la performance moyenne d'énergie solaire en considérant les panneaux photovoltaïques sur les toitures dans la commune. Le modèle obtenu servira à la modélisation de la production, de la consommation et de la distribution de l'énergie dans la commune. La méthode est fastidieuse. Les calculs se dupliquent et il faut les exécuter séparément pour chaque commune. Leur nombre, 1301 en Île-de-France, leur analyse faite avec cette méthode « mécanique » ne répond pas aux objectifs de l'étude.

Autres imprécisions, celle des bases de données et du logiciel *Transcad*. Au moment de l'entrée dans la base de données, chaque bâtiment doit être subordonné à une catégorie d'usage. En général, il y a peu des bâtiments accomplissant une seule fonction. Les usages multiples ne sont pas pris en compte par *Transcad*. A partir d'enregistrement dans la base des données, le bâtiment figure sur une seule fonction, car le logiciel ne rend pas possible de qualifier plusieurs fonctions de bâtiment à la fois. Sa fonction supplémentaire est complètement ignorée et exclu d'analyse, qui affecte l'exactitude et la véracité des résultats. On a dû suivre cette simplification.

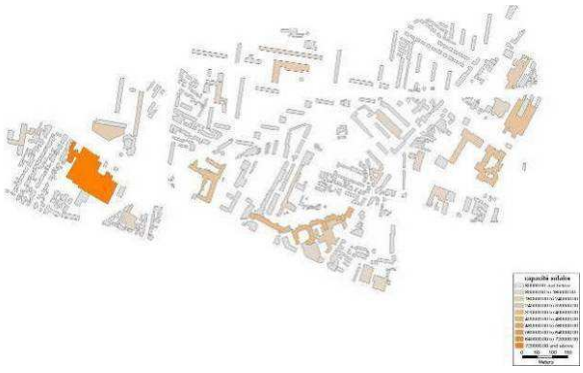
Conclusion intermédiaire

L'INSEE est engagé dans les statistiques de la population, aucune institution ne mène des recherches similaires sur les caractéristiques, les propriétés et la qualité de l'aménagement, d'où le manque de données telles que : la surface au sol, le volume de bâtiment et de ses fonctions, notamment la consommation d'énergie, en particulier liées à la consommation de l'énergie grise.

Peut-être en raison de la prévalence de la question des énergies renouvelables et l'autosuffisance énergétique, dans un avenir il apparaîtra un organisme analogue à l'INSEE, qui s'occupera de l'état et la qualité de l'aménagement. Le fonctionnement de tel organisme permettra ainsi une meilleure gestion de la politique énergétique du pays.



Consommation d'énergie des bâtiments



Offre solaire

L'exemple du Parc des Portes de Paris

Préparer les données pour l'outil Reforme

En parallèle de l'analyse *géonergique* relatée dans la section précédente, nous avons également préparé la collection de données nécessaires à la documentation de l'outil *Reforme.* Sur la base de la partition à cinq agents énergétiques (Terre ↔ Europe ↔ France ↔ Paris ↔ Parc des Portes de Paris), nous avons notamment documenter l'histoire énergétique pour ces cinq agents sur la base de quatre des cinq pas de temps prévu par l'outil *Reforme* : 1750, 1850, 1950 et 2000.

Un point important de notre recherche consistait également à outiller les problématiques énergétiques dans un rapport global à local. Dès lors, nous souhaitons définir un territoire d'expérimentation faisant le lien entre l'échelle globale, l'échelle continental, l'échelle nationale, l'échelle métropolitaine (ou territoriale) pour finir sur l'échelle du projet urbain (ou architectural).

Icade et le Parc des Portes de Paris

Pour mener à bien cet objectif, nous nous sommes mis en relation avec l'opérateur Icade, promoteur et foncière. Ce dernier opère en particulier sur le Parc des Portes de Paris, à la lisière de la frontière parisienne.

Ce site, anciennement les Magasins Généraux de Paris (EMGP), a vu le jour en 1866 à Aubervilliers, sur de vastes terrains disponibles en bordure nord-est de la capitale. Sa situation privilégiée et son accessibilité (raccordement au chemin de fer industriel, présence du canal) sont à l'origine du développement de cette nouvelle fonction de stockage des matières premières agricoles et industrielles, nécessaire à l'industrialisation et à l'urbanisation. Les EMGP n'ont cessé de s'agrandir jusque dans les années 1950, puis ils sont restés longtemps désaffectés suite à la vague de désindustrialisation des années 60 à 70.

Aujourd'hui, le site est devenu le Parc des Portes de Paris et appartient à Icade. Il concentre une grosse activité média avec des studios de télévisions, un pôle textile lié à l'activité de commerce de gros, ainsi que diverses autres activités (bureaux, entrepôts,…).

Icade a décidé de lancer un projet de reconversion du parc pour en faire un écoquartier d'affaires. La reconquête de cette enclave urbaine a été amorcée dans le secteur par des réalisations récentes telles que le bâtiment 270, premier bâtiment HQE en 2005, et le parc du Millénaire avec les immeubles de bureaux en 2007, puis le centre commercial inauguré en avril 2011.

Par ailleurs, le site s'inscrit dans une dynamique de mutation urbaine à plus large échelle sur Plaine Commune et de Paris Nord Est. Il est toutefois toujours fortement marqué par son passé industriel, dans sa structure urbaine, avec son maillage structuré par l'ancienne trame ferroviaire, mais aussi dans son architecture puisqu' il y a très peu de bâtiments neufs et que les bâtiments réhabilités ou reconstruits conservent leur identité industrielle.

Définition du périmètre d'étude et approvisionnement énergétique

Le périmètre d'étude concerne un foncier d'environ 70 hectares. Le site du Parc des Portes de Paris est actuellement approvisionné par différentes sources d'énergie. Dans le cadre du recensement des données ayant servi à implémenter l'outil *Reforme,* nous rappelons ci-dessous la nature des vecteurs secondaires énergétiques desservant le Parc des Portes de Paris

Réseau électrique basse et moyenne tension. Naturellement le site a besoin d'être relié au réseau d'électricité français pour assurer les besoins énergétiques de chaque bâtiment (éclairage, climatisation …) mais aussi ceux liés à l'activité économique de chaque locataire (électricité spécifique).

Réseau de gaz. Le réseau de gaz du parc est relativement dense et s'étend sur tout le site puisqu'une grande partie des bâtiments est chauffé au gaz. Par ailleurs, les chaufferies délivrant de la chaleur sur les petits réseaux de chaleur locaux utilisent en majorité du gaz comme combustible.

Réseaux de chaleur locaux. Trois réseaux de chaleur urbains sont recensés sur le site.

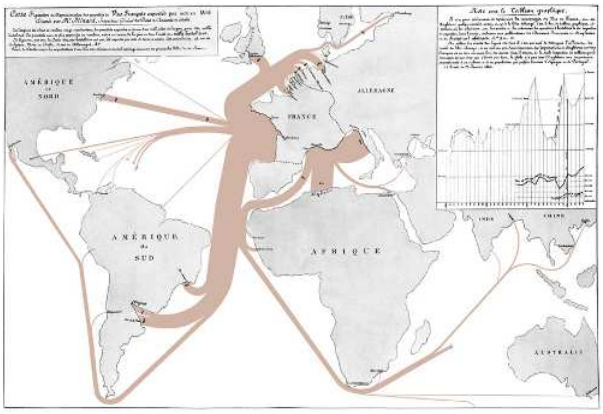
Vue aérienne du Parc des Portes de Paris (source Icade)

L'outil de visualisation Reforme

Introduction

Comment transmettre les notions de flux d'énergie, de la densité de la *demande* et de l'*offre* ou de l'exploitation des *stocks de long terme* à un grand public ? Les modèles d'énergie sont fortement basés sur les concepts de flux et d'échanges qui varient sur le temps et dans l'espace.

Cette structure, qui peut être difficile à expliquer en raison de sa complexité et de son articulation sur différentes variables, peut néanmoins être décrite idéalement par une représentation visuelle. Cette section détaille les intentions ayant concourues au développement de l'outil *Reforme*.



Carte des exportations françaises de vins par la mer en 186. Une représentation graphique spatiale d'échanges de flux de matière. Charles Joseph Minard, Tableaux Graphiques et Cartes Figuratives de Minard, 1845-1869 (source Bibliothèque de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées)

Etat de l'art des représentations

Les diagrammes de Sankey spatialisés

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.

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.

Une histoire et une géographie des énergies

L'ambition initiale de notre projet était similaire : tester les synchronisations des territoires avec les repères emblématiques de l'Histoire des énergies : *bassins versants* essentiellement dévolus à la production de biomasse et de nutriments avant la première révolution industrielle, apparition du charbon et des premières dendrites de ponction énergétique à l'échelle régionale, puis apparition du pétrole et du gaz dans une interaction planétaire.

Nous invitons le lecteur à consulter la section dédiée en annexe qui illustre plusieurs références d'outils de visualisation et de représentation du métabolisme de l'énergie.

Début de formalisation

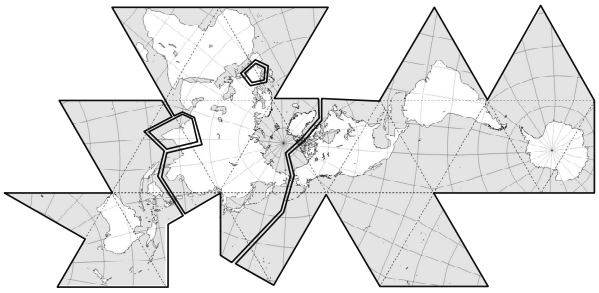
Le principe fondamental

Par notre outil, nous souhaitons analyser la dynamique énergétique d'un territoire donné. Selon les principes de la dynamique des systèmes, il s'agira de modéliser les flux énergétique le traversant tout en intégrant les variations de son stock. Dans la deuxième section de cette recherche, la *Formalisation*, nous donnerons un cadre formel de définition mathématique à la partition spatiale comme à l'incrément de temps considéré.

Dans les paragraphes suivants, et plus généralement dans les *Représentations*, nous nous attacherons davantage à donner une lecture intuitive et facilement partageable par le plus grand nombre. Par certains aspects, la *Formalisation* fournit le canevas théorique aux expérimentations visuelles des *Représentations*.

A titre d'exemple, un arbre situé au sein du territoire analysé transforme une partie de l'énergie solaire en la convertissant en biomasse. La production locale de cette biomasse participe donc à l'élévation du *stock* énergétique.

Quelque soit sa dimension, la partition spatiale correspond à une vue en plan, à une découpe dans le plan au sein d'une carte de territoire.



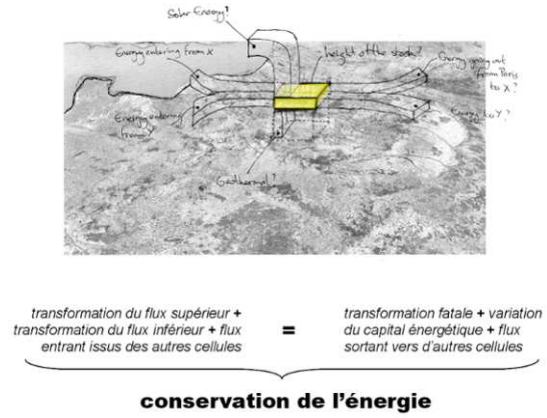
Un exemple de partition sur la carte « Dymaxion », créée par Richard Buckminster Fuller en 1954. La projection de Fuller est la projection cartographique d'une carte sur la surface d'un polyèdre.

Comptabilité énergétique de la partition

Un élément de la partition synthétise les flux entrants et sortants, ainsi que la quantification du stockage de la surface terrestre jusqu'aux profondeurs correspondants à des *stockages énergétiques de long terme*. Pour les hydrocarbures par exemple, ces stocks sont le fruit d'une transformation locale issue de la biomasse. Les territoires conservent une « mémoire » de la production solaire passée. Dans la suite de la recherche, nous détaillerons une typologie des différents vecteurs énergétiques notamment ceux correspondant au « solaire ancien ».

La partition spatiale doit pouvoir mesurer l'extraction des ressources énergétiques fossiles autant que l'extraction des matières fissiles (et un jour peut-être les gisements locaux d'énergie grise[76]). A titre d'exemple, le chaînage entre l'extraction de sables bitumeux en Alberta puis leur transfert, constitue une diminution du *stock* énergétique de l'aire spatiale située à l'aplomb des différents lieux d'extraction et de la situation en plan des *stocks* de solaire ancien.

En première approche, la partition spatiale –ou l'agent énergétique- est donc défini dans son arase supérieure par l'enveloppe de sa topographie et de son bâti. Son arase inférieure est située à environ 4000 mètres, limite inférieure de stockage du solaire ancien[77].



Rappel de l'équation de bilan : consommation interne à la partition + variation du stock énergétique = flux entrants – flux sortant

[76] Par exemple une carrière de pierre ou une extraction de minerai. La consolidation de l'énergie grise (ou incorporée) ne sera toutefois pas comptabilisée au terme de cette recherche. L'énergie incorporée correspond davantage à une « cristallisation » de transformation d'énergie qu'à une quantité d'énergie « liquide » au sens comptable du terme. Cette thématique est plus largement analysée dans la *Formalisation*.

[77] Ou tout au moins accessible avec les technologies actuelles de forage et d'extraction.

Des transformateurs de qualités énergétique

Agent énergétique

Chaque territoire est un « agent énergétique ». Il n'est ni consommateur, ni producteur : chaque agent est un transformateur d'énergie[78]. Le premier principe de la thermodynamique nous enseigne que le bilan des intrants, sortants et que la variation du stock doit préserver les lois de conservation de l'énergie.

Décomposition vectorielle de l'énergie

Dans la deuxième partie de notre recherche, la *Formalisation*, nous développerons plus avant les bilans énergétiques et entropiques à l'échelle de l'agent étudié. Nous introduirons notamment une décomposition vectorielle de la donnée énergique selon ses deux composantes, *exergie* et *anergie*.

Quels bassins versants énergétiques ?

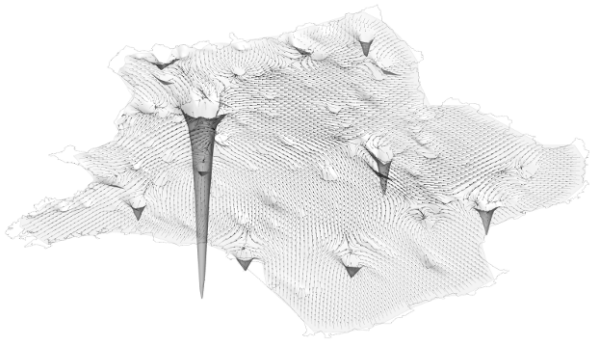
De fait, un indicateur important de l'activité énergétique d'un agent correspond à la somme des émissions totales de chaleur fatale[79]. La *demande* se mesurera en aval du diagramme de Sankey : à droite ou en bas du diagramme.

A ce titre, villes et centrales électriques thermiques sont assez peu différentes : les aires urbaines consomment avec intensité une multitude d'énergies finales (électricité, essence, fuel, biomasse pour l'alimentation, …). Pour rappel, une centrale thermique émet environ deux fois plus de chaleur que le vecteur électrique final produit. Dans les deux cas, il y a transformation des qualités énergétiques :

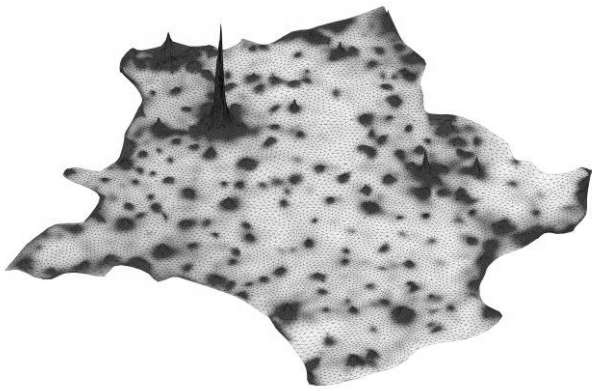
- Pour la ville, une transformation importante d'énergie et en général de « bonne qualité » (avec un bon taux d'exergie[80] au sens où nous le développons par la suite) ;
- Pour la centrale de production, un « filtrage » du contenu d'exergie d'un vecteur intrant à destination du vecteur secondaire, en amont en général des besoins métropolitains et industriels.

Dans ces deux cas, les agents (ou les partitions spatiales) sont donc des transformateurs énergétiques. Ils ne font que transformer la qualité de l'énergie et agissent sur le bilan entropique.

Dans la terminologie des *bassins versants*, ce sont des *puits* : ils transforment de l'énergie tout en consommant de l'exergie. La balance énergétique extérieure de ces territoires sera négative.



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. Ce travail préalable sert de base à l'exploration des Métamorphoses, troisième partie de ce rapport.



Une autre représentation élaborée dans le cadre des Métamorphoses.

[78] Voir une fonction mathématique au sens de celle décrite dans la deuxième partie, la *Formalisation*.
[79] Ou de transformation d'exergie en anergie.

[80] Nous verrons comme résultats des modèles (*d,e*) dans la *Formalisation* que le taux d'exergie de la demande serait compris entre 15% et 30% en fonction de la nature des équipements (bâti et automobile) et des conditions de densité urbaine et d'emprise individuelle dans le bâti.

Equation de bilan

Mesure de la transformation fatale

La transformation de flux au sein de l'agent énergétique engendrera la production de chaleur. A moins que celle-ci ne soit canalisée (par exemple réchauffement du cours d'eau en aval de tours de refroidissement de centrales thermiques), l'essentiel de cette chaleur fatale sera très largement réémise vers le ciel : sous la forme de radiations et d'échanges convectifs avec l'atmosphère.

A titre d'exemple, la consommation d'essence d'une automobile située produira *in fine* la création d'une chaleur fatale pour l'essentiel dissipée par les gaz d'échappement et la transformation en basse chaleur de toutes les parties en mouvement.

Mesurer la production néguentropique[81] ?

L'ordinateur idéal consomme une énergie négligeable pour une transformation et une production importante d'information[82]. Dans un autre registre, les états mesurent l'évolution de leur intensité énergétique : la consommation d'énergie nécessaire à la production de richesses. La mesure de la consommation interne constituera sans doute et dans un deuxième temps le dénominateur nécessaire à la compréhension de l'efficacité du territoire analysé.

La solarisation en question

Rappelons que le flux constant de rayonnement solaire sur la terre est de l'ordre de 80 000TW alors que la consommation de combustible fossile correspond à une puissance moyenne de 15TW[83].

Nous verrons dans la *Formalisation* comment scénariser de façon locale et contextuelle la solarisation progressive d'un territoire. Cette section donnera des outils pour effectuer des modèles.

Situation géographie et climat

Chaque partition spatiale est soumise à différentes énergies potentiellement captables, qui sont pour la plupart issus de l'énergie solaire récente, situées à l'aplomb de la définition géométrique de son contour. Un territoire d'un hectare est par exemple exposé à des gisements solaires annuels différents selon qu'il soit localisé à Helsinki ou à Tanger.

Il en va de même pour le vent, le courant des cours d'eau et de la mer et d'une multitude d'énergie de flux potentiellement captables, toutes étant dérivées du flux solaire incident. La constitution d'hydrocarbures sur un territoire correspond dans ce cas à la patiente accumulation de l'énergie issue du solaire[84].

[81] La néguentropie est le contraire de l'entropie.
[82] A titre d'illustration, l'entropie d'un tableau parfaitement lisse et blanc est maximale et ne contient aucune information visible. Si on y ajoute un point coloré, l'entropie diminue, et une information a été ajoutée. Ceci illustre pourquoi, à la naissance de la théorie de l'information, la quantité d'information contenue dans un système était appelée « néguentropie ». Tout système isolé, siège d'une agitation aléatoire, tend spontanément à s'homogénéiser de manière irréversible. C'est pourquoi la notion d'entropie, telle qu'elle est définie par la physique statistique, a été utilisée en théorie de l'information par Claude Shannon au début des années 1950 pour mesurer la perte d'information.

[83] Meadows, *Les Limites de la Croissance,* p159.
[84] Transformation chimique de la biomasse en hydrocarbures à haute densité énergétique.

Présentation de l'outil

Les pas de temps

L'outil *Reforme* s'attache à décrire de façon visuelle, les échanges d'énergie entre plusieurs territoires sur cinq pas de temps : 1750, 1850, 1950, 2000 et 2050. Ces dates décrivent les évolutions-clés suivantes.

En 1750, la description énergétique des territoires est pour l'essentiel gouvernée par l'*offre* et par une *demande* énergétique faible (effet de consommation individuelle limitée et d'une population bien moins importante qu'aujourd'hui).

En 1850, une partie du monde a entamé l'évolution de son mix d'intrants primaires par l'extraction et l'exploitation du charbon. Elle correspond au premier temps de *dé-solarisation* d'une partie des territoires et des populations. Nous avons rappelé dans la partie précédente, que sur le territoire parisien dès 1850, le mix primaire était équilibré entre le bois de chauffe et le charbon : un mix donc d'*offre* et de ponction sur le *stock*.

En 1950, diversification des mix primaires et exploitation massive des *stocks* sur une grande partie de la surface planétaire. La démographie croît intensément tout comme la *demande* individuelle : la dynamique de *déstockage du solaire ancien* s'accentue (charbon, pétrole et gaz).

En 2000, le monde est urbain pour moitié. La demande énergétique individuelle continue de croître ; la démographie n'est pas stabilisée dans de nombreuses régions. La déplétion de certains *stocks* commence à être critique, alors que la demande globale ne cesse de croître. La *dé-solarisation* planétaire est quasiment achevée.

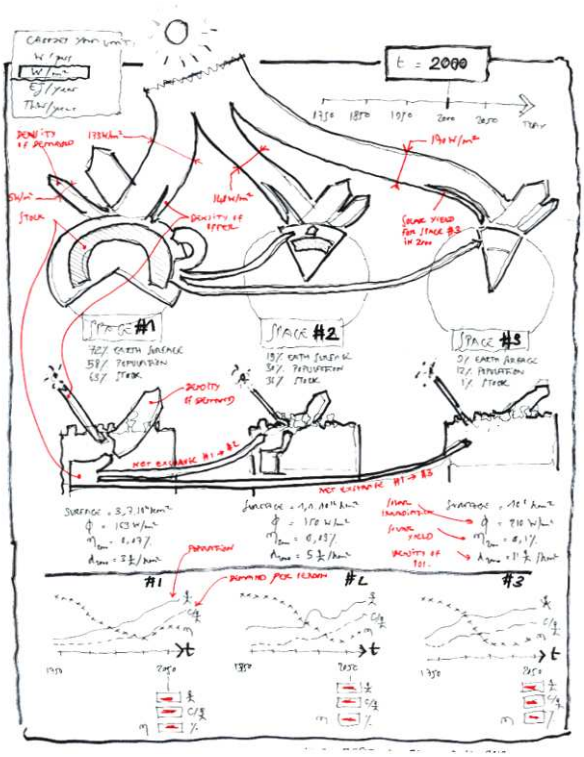
Enfin 2050, testons les sursauts. L'outil *Reforme* a pour objet de proposer des simulations prospectives pour *l'atterrissage vers le régime permanent,* en fabriquant dans un même mouvement des scénarios globaux et locaux de convergence entre *demande* et *offre* via un contrôle de la demande (démographie couplée à la demande individuelle) et l'accroissement du degré de *solarisation* des territoires.

A plus long terme, les scénarios *Reforme* présentés dans les *Métamorphoses,* présentent plusieurs prospectives à l'échelle planétaire jusqu'à échéance 2250. Les diagrammes présentés récapitulent alors les évolutions-clés sur presque cinq cents ans. Le *régime transitoire* des énergies fossiles aura alors sans doute eu ce pas de temps terrestre.

Les partitions spatiales

L'outil *Reforme* propose deux cadres d'analyse spatiale associés dans le premier cas à une partition fixe de la planète selon cinq territoires, et dans le second en laissant l'utilisateur interagir avec l'ensemble du système.

C'est un pas en avant dans la compréhension du modèle puisque l'utilisateur a un rôle actif dans la configuration et la possibilité d'explorer différents sous-ensembles du schéma général. Les deux modules s'appuient sur le même modèle de visualisation.



Croquis intentionnel pour le tableau de bord du site Reforme

Le site Reforme

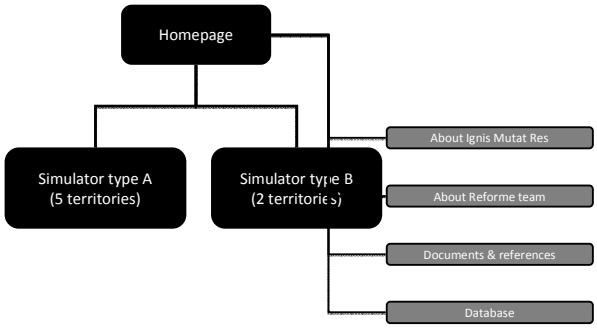
La page d'accueil de Reforme

Le site est accessible à l'adresse suivante : imr.densitydesign.org ou solar-reforme.org. La page d'accueil comprend les logos des institutionnels à l'origine du programme de recherche *Ignis Mutat Res* et comporte plusieurs liens :

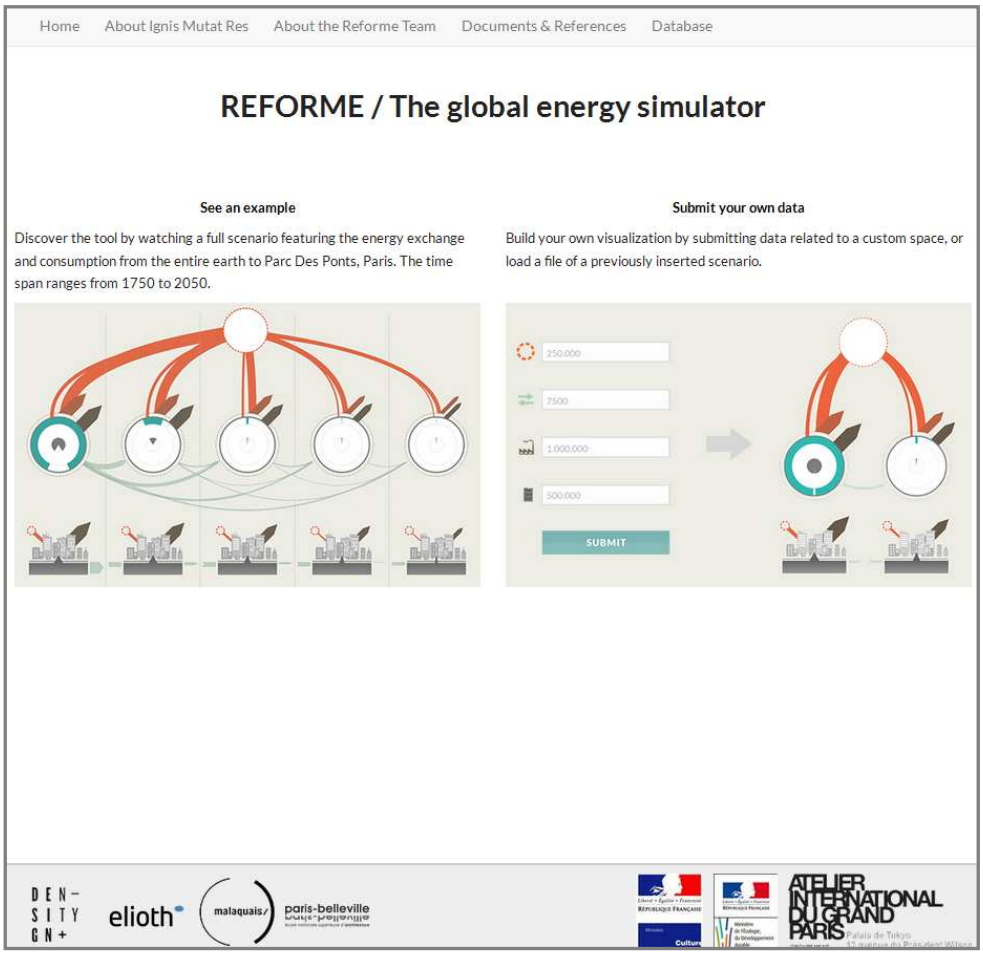
- Vers une description et les liens du programme de recherche *Ignis Mutat Res* ;
- Vers le descriptif du projet *Reforme* ;
- Vers le mode administrateur de la plateforme permettant la mise à jour des données et leur connexion via différentes bases de données disponibles en ligne.

Le mode administrateur

Un volet d'administration de la plateforme permet la mise à jour des données entre agents énergétiques.



La structure du site Reforme



Page d'accueil de l'outil Reforme

Les simulateurs

Le diagramme de Sankey en partie haute

La page d'accueil propose la bifurcation vers deux options du simulateur énergétique global (version à 5 agents ou version utilisateur). Chaque page permet alors de mesurer la dynamique des échanges entre agents ainsi que les niveaux de solarisation, comme l'évolution des *stocks* comme encore la dynamique des *demandes* énergétiques.

Graphiques de la partie haute

La première partie de la représentation sont les cercles alignés horizontalement. Chaque cercle est un nœud du schéma de Sankey, avec donc des flux d'énergie entrant et sortant. A l'intérieur, chaque cercle possède deux arcs.

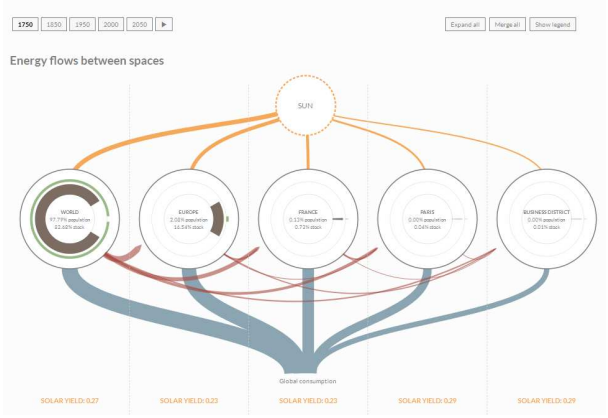
L'arc intérieur gris foncé décrit deux valeurs des réserves d'énergie: sa quantité S_p par rapport au total mondial pour l'année en cours (défini par l'angle de l'arc), et sa variation au cours du temps S_t (défini par la hauteur de l'arc). Des correspondances similaires sont utilisées pour la population située dans les cercles verts à l'extérieur: P_p est le pourcentage de la population par rapport au total mondial tandis que P_s représente son évolution dans le temps.

Le débit O provenant du soleil représente l'offre, c'est à dire l'énergie solaire effectivement exploitée par la cible. Notez que ce n'est qu'une partie minimale du rayonnement solaire global. Le débit D qui s'échappe du cercle représente la demande, c'est à dire la quantité d'énergie nécessaire pour le territoire. La somme de tous les flux de la demande est la consommation mondiale d'énergie.

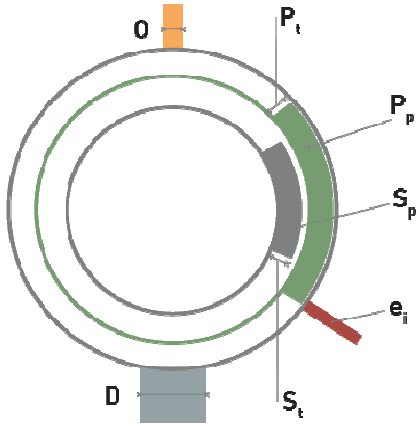
Enfin, les arcs rouges e_i représentent les échanges nets d'énergie entre les territoires. Il est à noter que toutes les données sur l'énergie présentées ci-avant (demande, offre, réserves et échanges) peuvent être présentées soient comme des valeurs absolues (mesurées en Joules) soient comme des valeurs relatives en les divisant par la population ou la surface de chaque territoire.

En survolant ou cliquant sur un arc ou un flux, l'utilisateur pourra visualiser la valeur dans une fenêtre *pop-up*. Cliquer ou survoler un territoire, par contre, l'amènera à fusionner avec son territoire parent le plus à gauche (par exemple, cliquer sur le Parc des Portes de Paris aura pour résultat de le fusionner avec Paris). Si un point est déjà regroupé, le fait de cliquer dessus provoquera sa dilatation et révélera les territoires précédemment fusionnés.

Les boutons *"merge all"* (tout fusionner) et *"expand all"* (tout étendre) permettent à l'utilisateur de rassembler l'ensemble des territoires en un seul territoire (de cette manière il voit le schéma relatif au monde entier). Il peut réinitialiser la représentation à ses valeurs par défaut, c'est-à-dire tous les territoires visibles en cliquant sur *"expand all"*.



Vue du simulateur (partie haute). Offre, stocks, échanges et demandes entre cinq territoires en 1750.



Détail d'un territoire dans le diagramme de Sankey

Graphiques de la bande centrale

La deuxième partie - en dessous des cercles - se focalise sur les territoires simples, montrant les détails de leurs quantités d'énergie entrants et sortants. Chaque territoire est représenté par une illustration de ville; une fois de plus les vecteurs ***D*** et ***O*** sont présentés, indiquant l'offre et la demande du territoire (ou de leur densité). Les échangés sont également représentés, mais dans cette section, ils sont regroupés en deux flèches principales: E_{in} (échanges entrants) et E_{out} (échanges sortants).

Sous l'illustration, l'utilisateur pourra trouver des informations visuelles sur les réserves d'énergie du territoire. La zone gris clair S_{tot} représente la valeur maximale des réserves dans le temps tandis que S_a représente sa valeur actuelle : $S_u = O - D$

L'interaction est similaire à celle de la section précédente: en déplaçant le pointeur au-dessus de d'une zone, l'utilisateur peut lire sa valeur qui apparaît dans une fenêtre pop-up; en cliquant sur un territoire, le territoire fusionne avec son parent le plus à gauche, et le dégroupage se fait comme décrit précédemment.

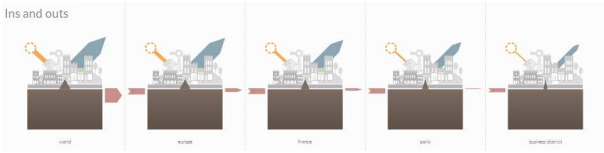
Graphiques de la bande basse

Dans la troisième et dernière partie, pour chaque agent, un graphique temporel récapitule les tendances sur les 5 pas de temps pour les données suivantes :

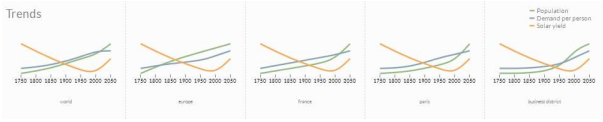
1. Population ;
2. Demande d'énergie individuelle ;
3. Solarisation du territoire.

Le but de cette section est d'aider l'utilisateur à trouver des liens entre les tendances des valeurs indiquées dans les sections précédentes au fil du temps. La corrélation entre la population, le rendement solaire et la variation des réserves d'énergie est clairement visible, comme les courbes de chaque variable sont dessinés un même graphique. La *Formalisation* fera une part importante à la description des méthodes d'évaluation de la solarisation équivalente.

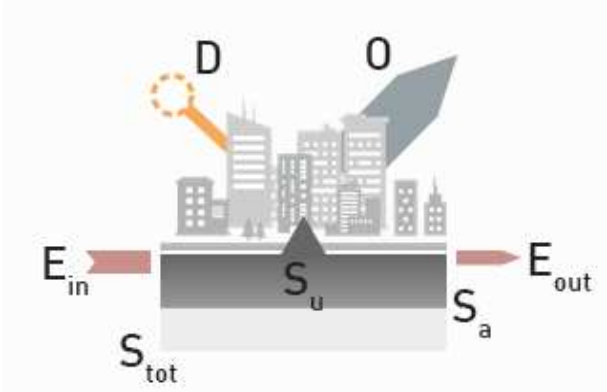
Il est à noter que la ligne graphique en ordonnée est purement qualitative, les échelles des valeurs variables ne sont pas respectées. La représentation sert uniquement de comparaison entre les tendances, pour mieux comprendre comment la variation d'un variable pourrait influencer les autres. L'année 2050 permet de simuler les conséquences sur les flux et les stocks de chaque agent énergétique en fonction de la scénarisation de sa démographie, de son rendement énergétique solaire et de la consommation d'énergie.



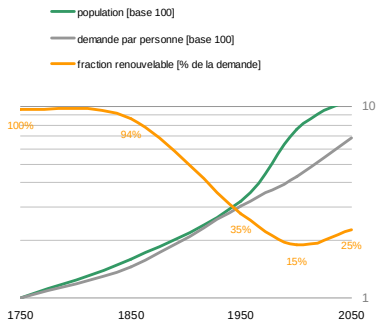
Vue du simulateur (partie médiane). Offre, stocks, échanges et demandes entre cinq territoires en 1750 et en coupe..



Vue du simulateur (partie basse). Evolutions tendancielles sur 300 ans pour chaque territoire.



Détail des entrées et sorties d'un territoire



Comparaison avec les données de population mondiale, de demande énergétique individuelle par personne (les données sont comparées en valeur relative par rapport aux valeurs de 1750) et pourcentage d'origine renouvelable de la demande globale (rapport entre offre et demande, échelle linéaire). Extrait de scénario Reforme.

Visualisation des données de l'utilisateur

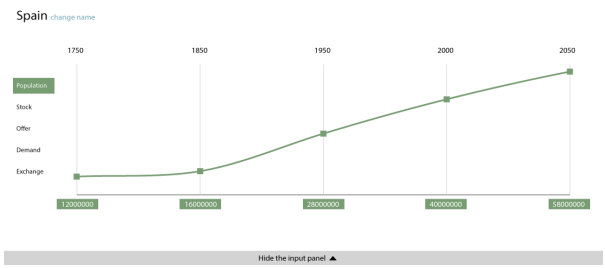
Comme évoqué précédemment, un second module de la plateforme permet à l'utilisateur de construire sa propre visualisation en insérant des données dans un espace personnalisé. Cette caractéristique est importante non seulement pour obtenir une compréhension plus complète du modèle, mais pour voir comment il s'adapte à un environnement avec lequel l'utilisateur est déjà familiarisé.

En étudiant les sorties visuelles résultant des données personnelles, on découvre de nouvelles perspectives et des problèmes sous-jacents à son territoire (quelle est la quantité d'énergie nécessaire pour répondre aux besoins de ma ville? A quelle hauteur mon pays est-il dépendant sur l'importation d'énergie venant de l'étranger ? Etc.)

La procédure pour la saisie des données est assurée par un ensemble de graphiques interactifs. Chaque graphique est lié à une variable du modèle (offre, demande, stock, etc.), et son évolution dans le temps est déterminée par 5 étapes principales, correspondant aux années prises en compte par la recherche (1750, 1850, 1950, 2000, 2050).

En déplaçant la poignée d'une variable donnée sur un temps donné, l'utilisateur modifie automatiquement sa valeur dans le modèle. Ce changement se reflète en temps réel dans la visualisation, qui est une instance personnalisée de celle présentée dans la section précédente. Le résultat final est donc construit étape par étape, et peut être modifié à tout moment.

Lorsque l'on compare ce système avec le remplissage d'un formulaire simple - qui est la norme pour sur le web - cette interface graphique fournit une méthode d'entrées plus attrayante et plus directe. Cette approche est préférable lorsqu'il s'agit d'utilisateurs non expérimentés, car la vitesse et la facilité d'utilisation sont aussi importantes que la précision et la fiabilité.



Visualisation des données saisies pour l'utilisateur

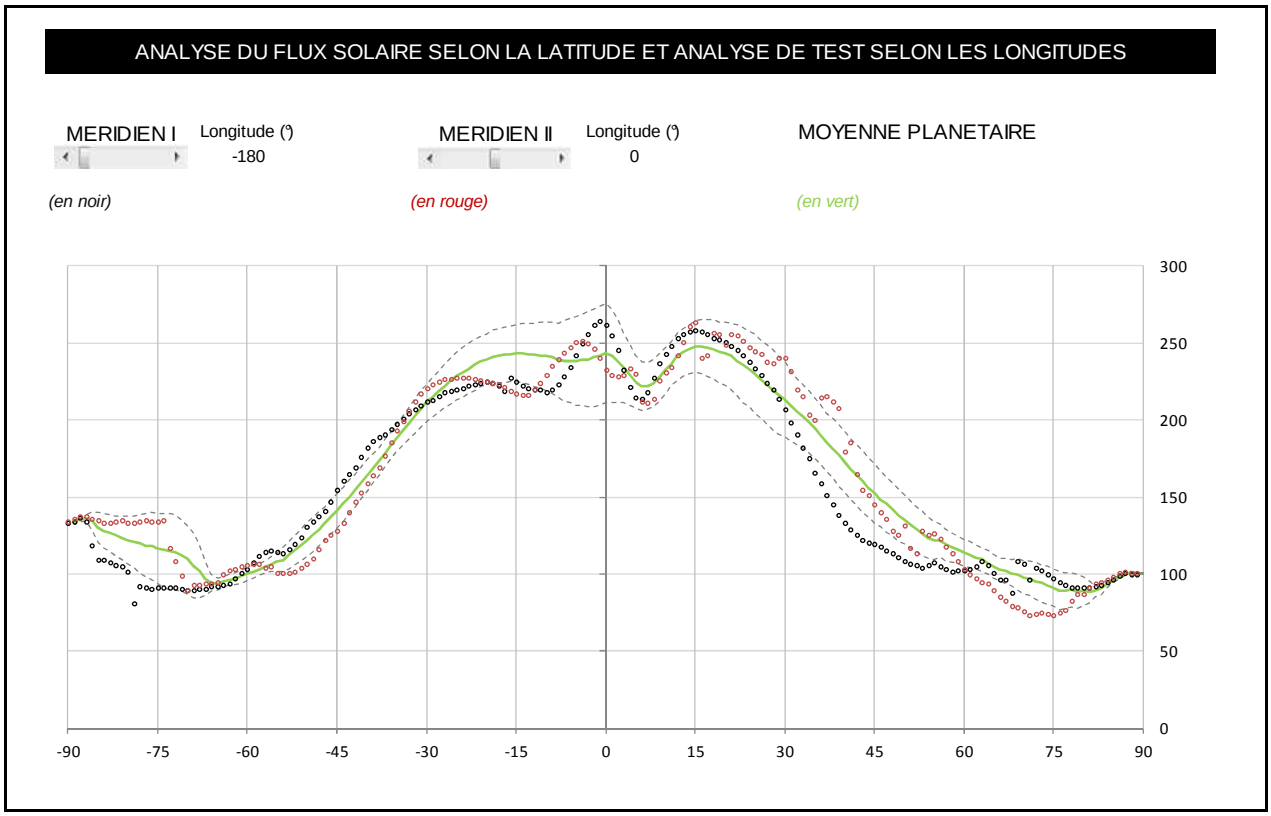
Technologie du site Reforme

Le simulateur Reforme a été conçu comme une plateforme web fortement axées sur la partie utilisateur. Le besoin de visualisations et d'interactions complexes a été réalisable grâce à un usage de *JavaScript* et en particulier de la bibliothèque *d3.js* qui a été utilisée pour les principales vues, tandis que la bibliothèque *angular.js* a été choisi pour gérer les données sous-jacentes de chaque vue. Afin de rendre l'application utilisable à partir d'une tablette et répondre aux différentes tailles d'écran, nous avons utilisé le *framework CSS Bootstrap*.

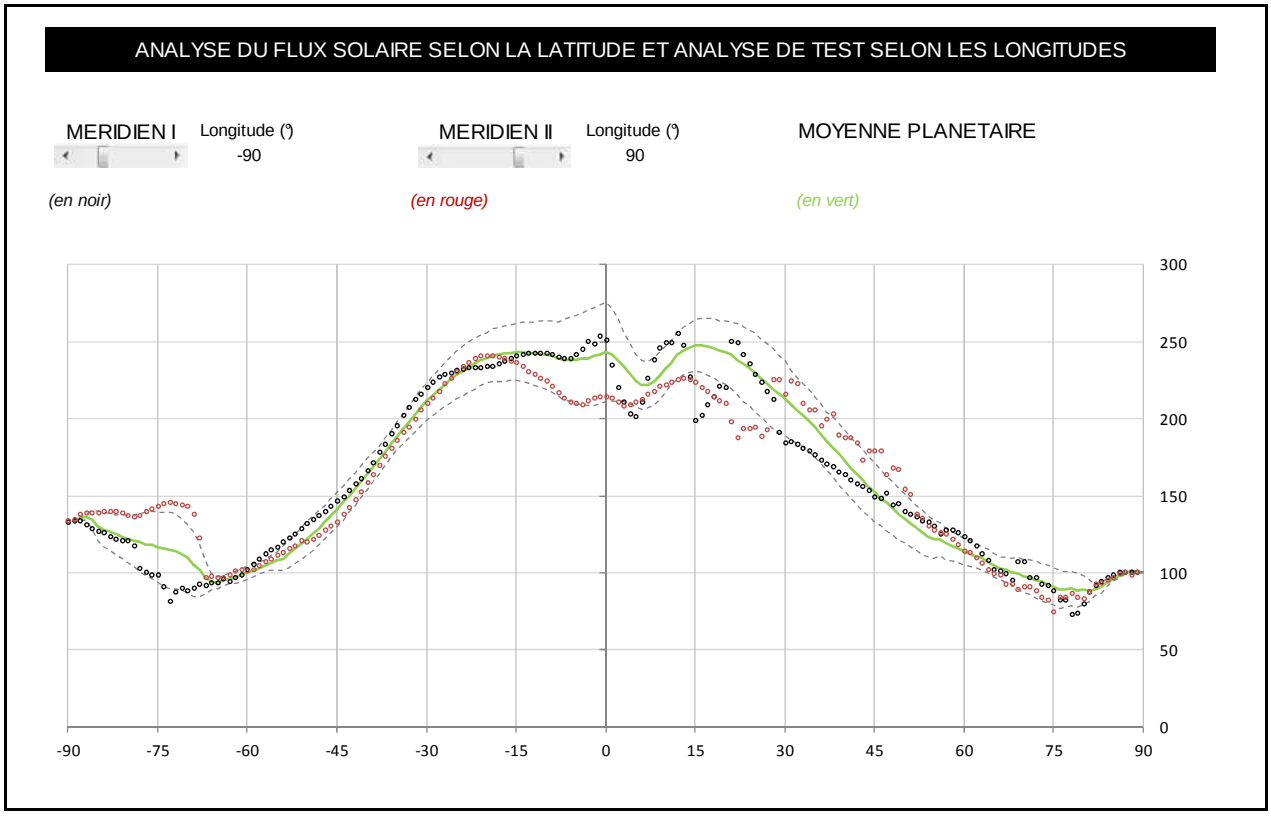
Conclusion intermédiaire

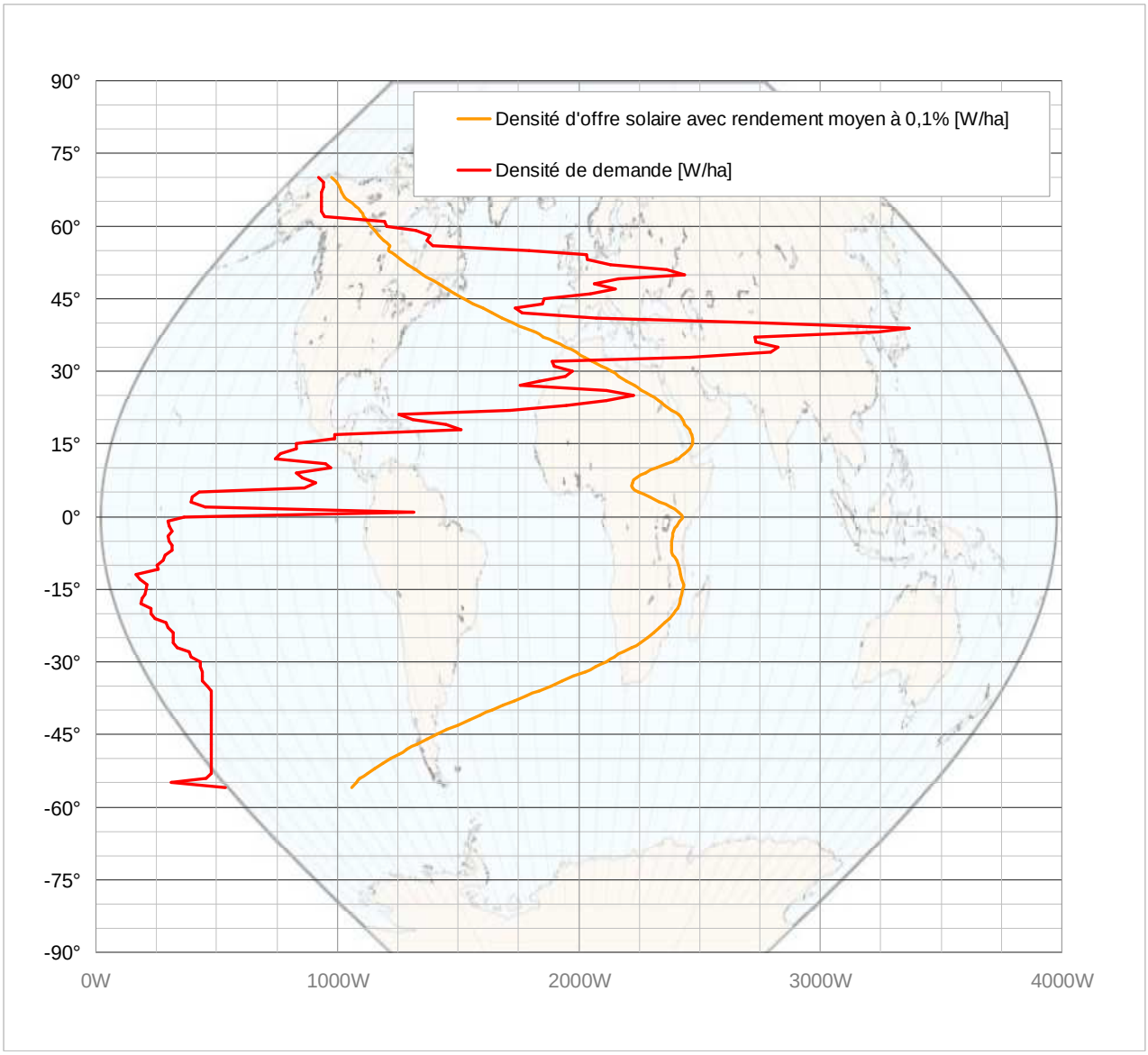
La documentation de la densité permet d'évaluer la quantité d'énergie solaire par individu. En effet, à une situation géographique donnée (et donc à une insolation annuelle caractéristique), plus la densité est faible, plus la quantité de territoire et donc la quantité d'énergie solaire reçue est importante.

L'utilisateur testera alors l'interrelation entre niveau de solarisation à atteindre, situation géographique, densité et demande d'énergie individuelle. L'utilisateur pourra alors simuler les scénarios d'autonomie énergétique partielle ou totale des territoires et préfigurer ainsi des trajectoires de *dé-mondialisation énergétique* en limitant les distances caractéristiques d'échange entre agents, a fortiori s'ils sont issus des stocks !

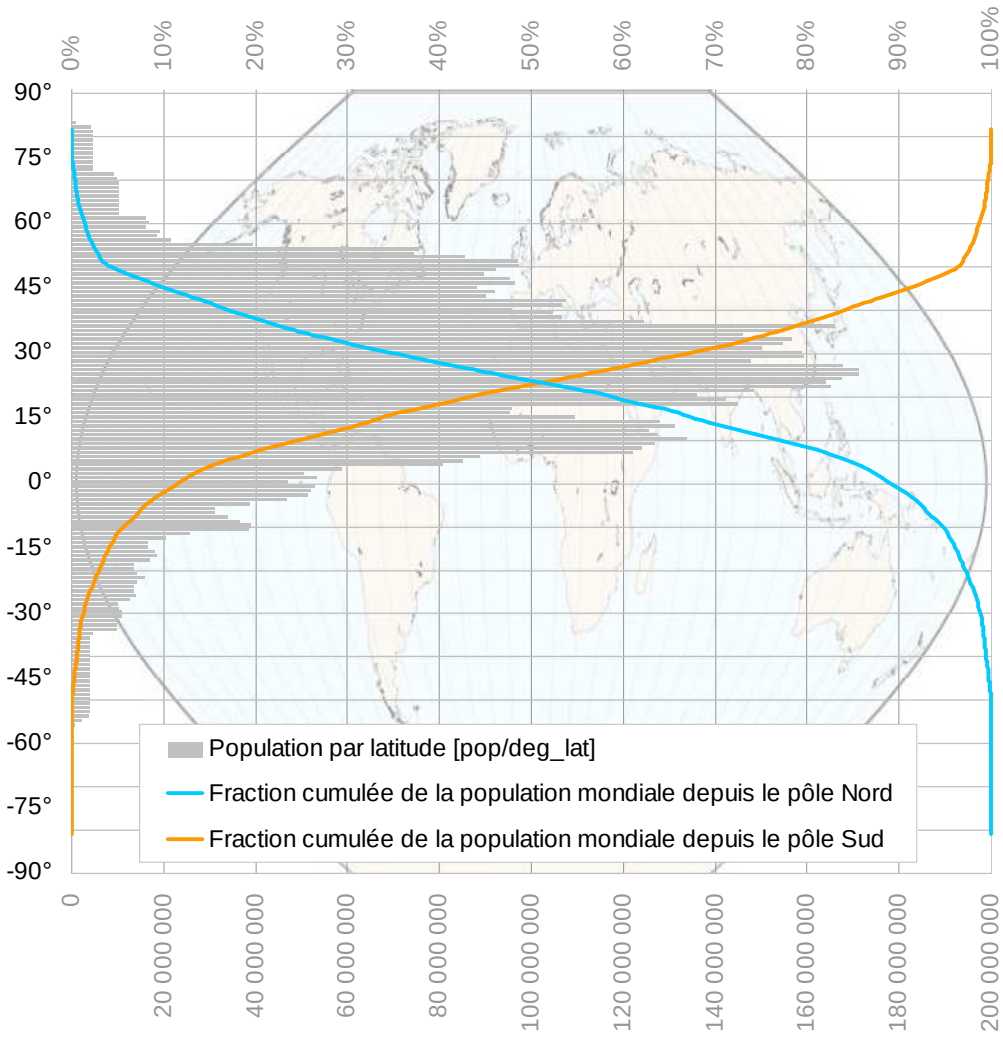


Extrait des analyses effectuées pour analyser la corrélation entre latitude et gisement solaire horizontale.

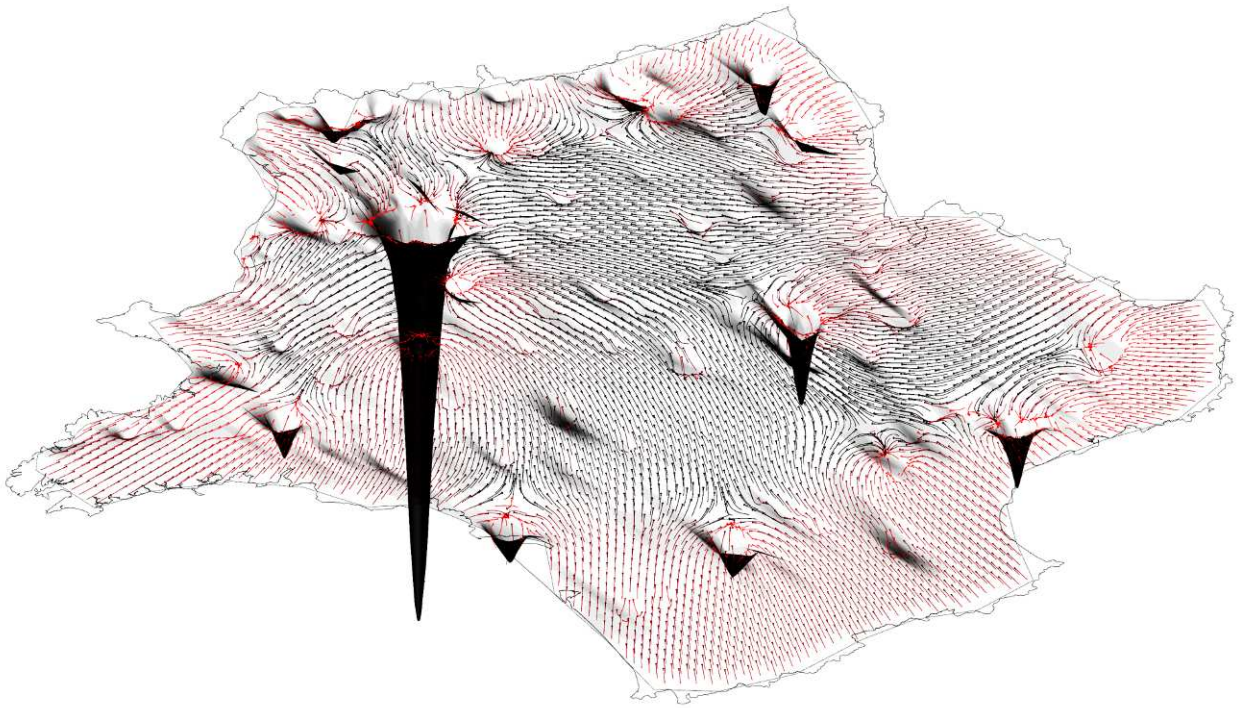




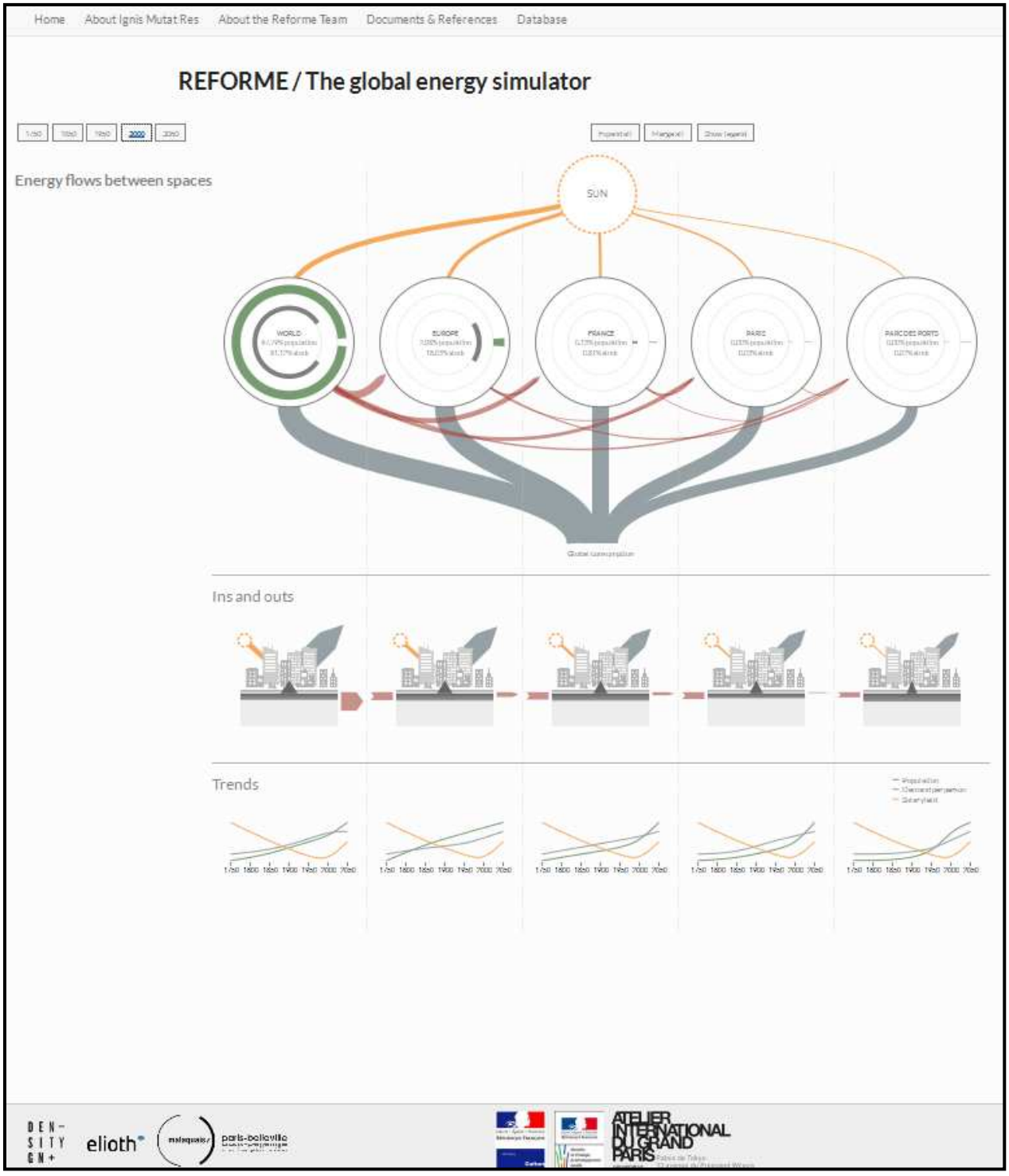
Graphique récapitulatif de corrélation entre offre solaire moyenne potentielle selon la latitude en Watt par hectare (et avec l'hypothèse d'un rendement moyen de solarisation à 0,1%) comparée à la densité de demande en Watt par hectare. Sur la base des données 2009, les territoires en deçà de 32°N seraient excédentaires en offre tandis que les latitudes plus septentrionales seraient débitrices.



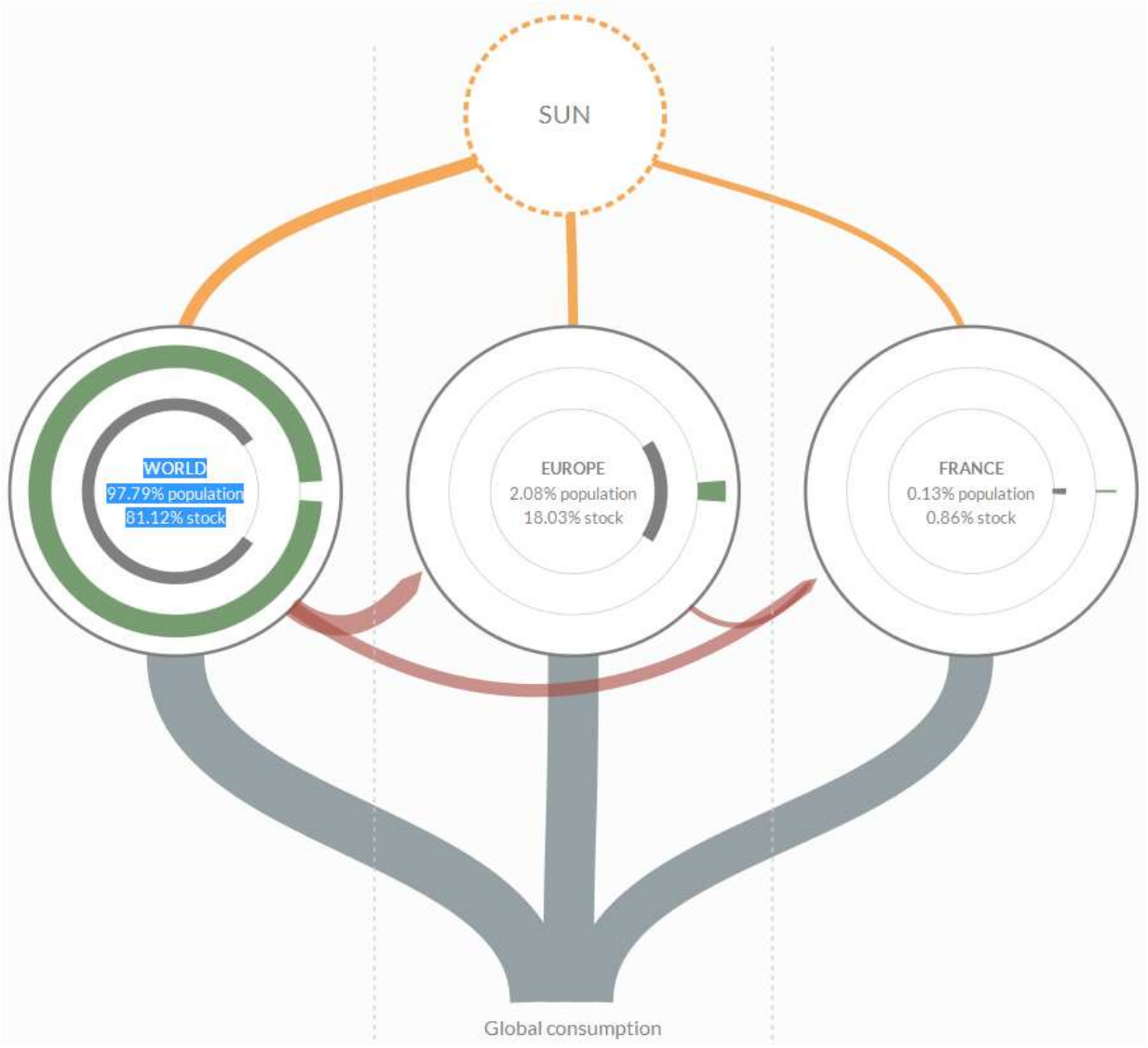
Histogramme et courbes de population cumulée en fonction de la latitude. On note la part de population mondiale vivant au-dessus de 30°N est inférieure à 35% ; que celle vivant au-dessus de 45°N est inférieure à 10%. Environ 60% de l'humanité vit entre 30°S et 30°N.



Une représentation des densités de demande énergétique à l'échelle française.



Outil numérique Reforme (accessible à solar-reforme.org)
Simulateur des cinq territoires.



Zoom sur l'outil numérique Reforme (accessible à solar-reforme.org)
L'offre en partie haute, les stocks en partie médiane et la demande en partie basse.

Vue aérienne de Shanghaï (source Cities from the sky, Fubiz)

Partie 2. La Formalisation

« *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.* »

Nicholas Georgescu-Roegen[85]

« Celui qui croit qu'une croissance exponentielle peut continuer dans un monde fini est soit un fou soit un économiste. »[86]

Kenneth Boulding, 1966

Energies de la grande échelle

Un va-et-vient entre formalisation et représentation

Rappelons en premier lieu que le travail de collecte et d'ordonnancement des données nécessaires aux *Représentations* a supposé au préalable des recherches sur les méthodes de classement et de consolidation des transformations énergétiques territoriales. A ce titre, une importante partie descriptive de la première partie est issue du formalisme développée dans cette partie.

La *Formalisation* est consacrée à l'édification des objets mathématiques, à la définition des champs de variables pertinents pour tenter de décrire les prospectives urbaines énergétiques. L'objectif consiste à fournir des outils de calcul et de prospective permettant d'incrémenter la « partie cachée » des *Représentations*. En miroir, les *Représentations* fournissent le canevas graphique, une « rémanence visuelle » qui accompagne le développement abstrait du formalisme mathématique développé dans la présente partie et dans ses annexes.

Dimensionner la permanence énergétique

Par son déploiement, la *Formalisation* documente les interrogations centrales de *Reforme*. Quelles seraient les conditions de sobriété qui permettraient de tendre vers la l'équilibre entre *offre* et *demande* ? Comment refonder une politique de « remembrement énergétique » permettant d'associer de façon connexe des territoires afin de maximiser autonomie et robustesse ? Quelles sont les inductions typologiques et formelles de l'objectif de *permanence énergétique* ?

La fin des stocks : comment équilibrer demande et offre ? Décrire la trajectoire de la permanence énergétique.

[85] *La décroissance* (1979), 2ème édition, 1995
[86] Cité par François Roddier dans *Thermodynamique de l'évolution.*

Mathématiques de la grande échelle

L'autre enjeu associé à la *Formalisation* part du constat d'un champ descriptif plutôt réduit permettant de caractériser mathématiquement les phénomènes urbains[87] : champs théoriques disparates, caractérisation de la performance énergétique essentiellement sous l'angle de celle du bâti, absence de réflexions globales sur les stratégies d'implémentation de *l'offre* énergétique dans le paysage urbain…

A l'instar des unités de la physique entièrement décrites par le produit des puissances de matière-espace-temps-température[88], quelles sont les unités fondamentales de l'urbain ? La question énergétique semble parfois trop rapidement se résumer au paramètre de la densité.

Nonobstant, la qualité des travaux terminologiques sur ce point[89], cette recherche est aussi l'occasion de reposer les bases de nouvelles variables, comme de tester l'homéomorphisme du formalisme thermodynamique (variables intensives et extensives) au champ urbain. Le développement complet de cette réflexion est situé en annexe.

Un résultat important de notre recherche consiste à mettre en évidence que les morphologies urbaines ont sans doute un impact supérieure sur l'*offre* énergétique potentielle que sur la *demande* énergétique. La dernière partie de notre recherche, les *Métamorphoses*, développe cette thèse notamment au travers du concept des *Infrastructures Solaires Urbaines.*

L'exemple de David Mac Kay : mesurer et scénariser la convergence offre-demande du territoire britannique

Dans sa magnifique somme, *L'énergie durable, pas que du vent*[90], le physicien David Mac Kay s'est livré à l'écriture d'un scénario didactique permettant d'analyser les leviers culturels, techniques et politiques visant à faire converger la diminution de la *demande* vers une *offre* accrue, et ce, à l'échelle du territoire britannique.

Nous invitons urgemment le lecteur à lire sinon à consulter cette « bible » largement documentée sur la pluralité des questions énergétiques. Avec rigueur et humour, Mac Kay décrit et quantifie de façon générique les capacités techniques pour assurer le mix global de l'*offre.*

Ce livre fournira un précieux relais au lecteur qui souhaiterait approfondir la question des mesures relatives à l'*offre*, au *stock* et à la *demande* dans la suite de cette partie.

Le physicien David Mac Kay (source Wikipedia)

[87] Nous invitons le lecteur à consulter l'abondante bibliographie qui fait état notamment des travaux de Serge Salat ou de Mindjid Maïzia
[88] Cohen-Tannoudji G., Spiro M., *La Matière-espace-temps, la logique des particules élémentaires*, Fayard, 1986.
[89] Fouchier V., *Les densités urbaines et le développement durable, le cas de l'Ile-de-France et des villes nouvelles*, Edition du SGVN, Décembre 1997

[90] Disponible en libre téléchargement sur le web et en plusieurs langues

Mesurer l'énergie

Préambule

Cette partie s'attache à décrire les champs de variable relatifs à notre trilogie d'analyse : *offre, stocks* et *demande.* Avant de développer ces trois temps, nous explicitons ci-après la nature des mesures de l'énergie qui seront communes aux trois analyses successives. Nous invitons aussi le lecteur à consulter les annexes pour de plus larges explications pour le cadre mathématiques sous-jacent.

Rappels de thermodynamique

Premier principe

Le premier principe rappelle la conservation de l'énergie : le bilan énergétique d'un système fermé se conserve. La variation de l'énergie totale d'un système isolé est égale à la somme des quantités d'énergie échangées avec son environnement. L'énergie peut être échangée sous forme de travail W ou de chaleur Q.

$$\Delta E = W + Q$$

Rappelons que les bilans d'énergie des agents énergétiques exhibés dans les *Représentations* respectent et décrivent l'équilibre de ce bilan : les intrants énergétiques réclamés par un territoire sous forme de sa *demande* sont inéluctablement transformés en chaleur fatale[91].

Deuxième principe

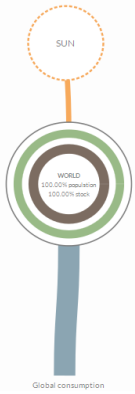
La température fait irruption dans le deuxième principe pour davantage préciser les capacités d'usage sous forme de travail, de potentiel chimique et de chaleur. Le second principe procède à une hiérarchisation de l'énergie en évoquant les irréversibilités inhérentes à toute évolution.

Il postule l'existence d'une fonction d'état qui rend compte de ces irréversibilités. Cette fonction est appelée entropie et est notée S. L'entropie d'un système isolé ou fermé augmente toujours[92].

$$\frac{dS}{dt} \geq 0$$

La non-équivalence entre les vecteurs

Au cours des paragraphes précédents, nous avons eu l'occasion d'évoquer la question de la liquidité ou encore de qualité des vecteurs énergétiques. A titre d'exemple, un parpaing est bien moins « liquide » qu'une quantité équivalente d'énergie investie dans la production d'électricité. A l'inverse, le premier se conserve et se stocke bien plus facilement que le second. Pour ce qui concerne la qualité des vecteurs énergétiques, on peut assurément avoir davantage d'usages possibles avec un litre d'essence qu'avec une quantité équivalente d'énergie sous forme de chaleur à basse température.



Un extrait de l'outil Reforme. Visualisation d'un bilan énergétique terrestre : la demande globale (« global consumption ») est assurée par une fraction de l'énergie solaire (« sun ») valorisée ainsi que par la ponction sur les stocks (la couronne marron diminue progressivement en épaisseur au fil du temps)

[91] Et à terme en « anergie pure ».

[92] De plus larges développements seront effectués pour ce paragraphe, notamment avec l'introduction du troisième principe et du principe de MaxEP pour « *Maximum Entropy Production* », cher à l'astrophysicien François Roddier et évoqué dans son ouvrage *Thermodynamique de l'évolution.*

La qualité énergétique en question

L'apparition du deuxième principe

L'énergie est une donnée complexe : préciser sa quantité ne suffit pas. Nous avons développé un mode de représentation formelle pour préciser la qualité de l'énergie (étroitement associée à l'exergie, capacité que l'énergie à être convertie en travail). Sans développer plus largement, nous pressentons qu'un kWh d'électricité permet davantage « d'actions » qu'un kWh de chaleur à faible température.

Par analogie, la chaleur est le receveur énergétique universel (d'un point de sanguin, son rhésus serait alors AB+) tandis que l'électricité s'apparente au donneur universel (rhésus O-). De fait, l'électricité est absolument nécessaire pour l'énergie mécanique comme pour le « travail informationnelle » (cybernétique). Néanmoins, n'y-a-t-il lieu de requestionner l'omniprésence de ce donneur universel dans nos vies ?

A titre d'exemple, les besoins en basse et moyenne chaleur pour la cuisson et le nettoyage ne réclament pas la qualité énergétique de l'électricité. Pourquoi ne pas développer plus largement les cuissons et lavages solaires ? Gardons la « qualité électrique » pour les « bons rhésus de demande ». En effet, le taux d'exergie maximum réclamé pour nos besoins de chaleur domestiques correspond à une cuisson à 250°C dans un four, soit un taux inférieur à 25%. Pour la plupart de nos autres demandes, comme pour l'eau chaude sanitaire, le taux d'exergie est en général inférieur à 10%[93].

La fin de cette partie fera état de ce souci d'adéquation[94] entre *offre* et *demande*, tant par la quantité d'énergie que par sa qualité[95]. Elle est fondamentale pour décrire la trajectoire de la *permanence énergétique*. Il en sera largement question au terme de la cette partie.

Une introduction à l'exergie

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. 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.

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. L'énergie peut être décomposée en deux parties.

- Une composante « utile » : l'exergie
- Une composante « inutile » ou « indisponible » : l'anergie.

$$\textit{énergie} = \textit{exergie} + \textit{anergie}$$

[93] En effet, cela correspond à peu près au taux d'exergie pour un écart de température d'une cinquantaine de degrés.
[94] Voir de colinéarité au sens vectoriel de la représentation choisie.
[95] Pouvant être associée à une température équivalente.

La décomposition fondamentale

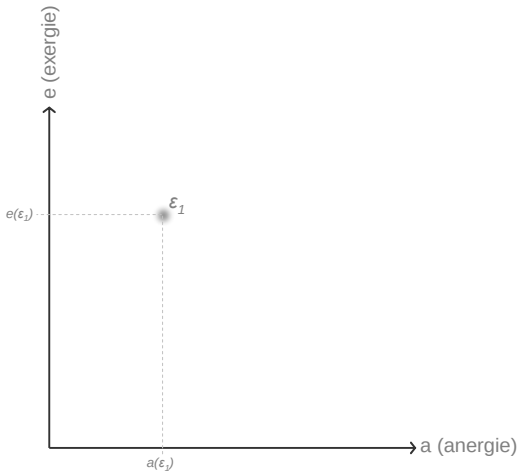
Dans le cadre de *Reforme,* nous faisons le parti de « vectoriser » la donnée énergétique selon les composantes précitées. L'instruction de l'état de l'art sur cette question n'a dans l'immédiat pas révélé de formulation équivalente. Elle nous semble néanmoins fortement utile pour décrire le caractère multidimensionnel de la donnée énergétique.

Aussi, le développement de l'espace vectoriel associé nous semble fournir un cadre analytique puissant pour décrire les phénomènes énergétiques. Nous invitons le lecteur curieux de ce formalisme à parcourir les annexes associées à l'ensemble de ce développement. Elle constitue à nos yeux un point important des avancées de notre travail de recherche.

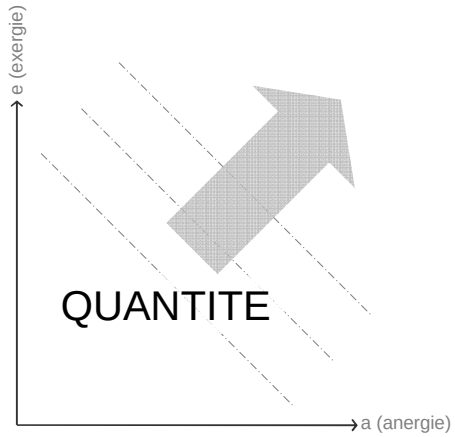
Lorsque nous serons susceptibles d'obtenir cette information, toute valeur énergétique sera décomposée de façon unique en sa somme *a* d'anergie et *e* d'exergie. Dans la suite de nos travaux, la donnée énergétique devient dès lors bidimensionnelle et elle s'écrit alors $\underline{\varepsilon}$, [96] le « vecteur-énergie ».

Cette représentation permet alors de décrire toute donnée énergétique en permettant à la fois de renseigner sa *quantité* et sa *qualité.*

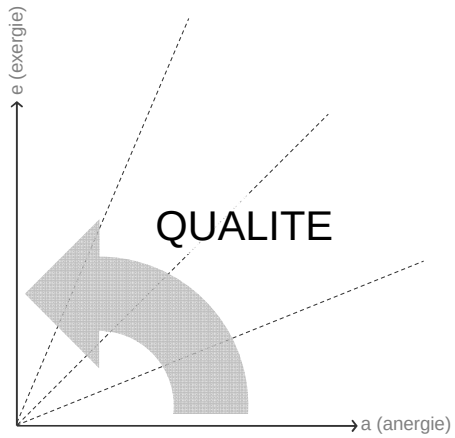
$$\underline{\varepsilon} = (a, e)$$



L'espace bidimensionnel de représentation d'une donnée énergétique : décomposition selon l'exergie et l'anergie



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=mx

[96] La barre inférieure mentionne une donnée vectorielle.

Quelles variables pour définir l'urbain ?

Thermodynamique de ville et des territoires

Reforme et l'espace urbain

Le territoire urbain et la question architecturale est une thématique centrale de *Reforme*. Nous souhaitons en effet interroger les espaces artificialisés et bâtis dans leurs capacités et leurs limites pour à la fois contrôler la *demande*, permettre la robustesse d'approvisionnement comme la synchronisation possible de la *demande* et de l'*offre* par l'implantation de *stocks* de court et moyen et terme comme enfin tester les possibilités offertes pour augmenter l'*offre*.

Initiation du formalisme mathématique

Par correspondance, et dans le cadre du système ouvert que constitue la ville[97], nous pouvons de façon analogue caractériser les grandeurs suivantes :

- Des *variables extensives* comme l'aire urbaine, la population, la consommation d'énergie, …
- Des *variables intensives* comme le taux de croissance démographique, la densité urbaine, le coefficient d'emprise au sol, la température caractéristique de la dissipation d'énergie, …

Tachons aussi de garder en tête que les villes constituent des « condensats d'énergies incorporées » de multiples natures : le bâti, les infrastructures, les vecteurs de mobilité, les équipements et objets ainsi que les humains habitant la sphère urbaine. Les villes sont en quelque sorte les sédiments de dissipations énergétiques du passé.

Cadre spatial et temporel

L'espace

Dans le cadre macroscopique de la modélisation urbaine, il s'agit de définir l'étendu spatial du système analysé. L'analyse géographique sait proposer des cadres méthodologiques rigoureux et précis. Pour notre recherche, il s'agit d'offrir une cohérence avec la cartographie des gisements énergétiques tels que précédemment évoqués dans les *Représentations*.

Lorsqu'un périmètre territorial est déterminé (qui peut par exemple correspondre aux frontières administratives d'une aire communale), la surface mesurée correspond à la surface projetée du périmètre sur la géode terrestre. Le flux solaire annuel est en effet le critère de mesure et d'équivalence. On en déduit que la surface topographique du territoire étudié sera forcément supérieure ou égal à la surface du territoire telle que défini ici.

On considérera les données spatiales comme indépendante du temps.

Pour un territoire donné, une fois ses singularités régularisées[98], il possèdera en tout point un vecteur normal. On notera A, sa surface territoriale définit par :

$$A = \iint \vec{n}.\vec{z}\,dS$$

Avec :

- $\vec{n}$, vecteur normal à la surface de référence,
- $\vec{z}$, vecteur normal à la géode terrestre.

La surface A des territoires vallonnés et montagneux correspondra alors à leur projection verticale.

Cette valeur sera aussi notée « m^2_{sol} ».

[97] En tant que système dissipatif tel que défini par Roddier, *Thermodynamique de l'évolution*.

[98] L'ensemble des points de discontinuités géométriques de l'espace naturel et artificiel.

Le temps

Le temps de référence sera mesuré depuis le barycentre de l'espace étudié. L'intervalle de temps de l'analyse sera très souvent *a minima* annuel. Par convention, nous noterons :

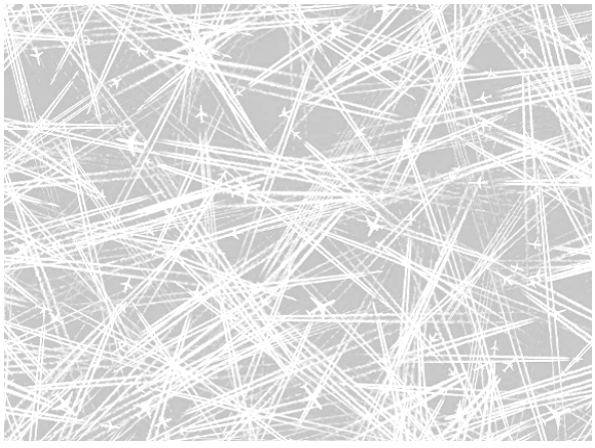
$$T = [t_1, t_2]$$

Et par extension, la durée de la mesure :

$$T = t_2 - t_1$$

Dans la suite de nos travaux, la plupart des données énergétiques seront mesurées en Watt, pour lisser l'impact temporel. De façon implicite néanmoins, et sauf mention contraire, les valeurs en Watt correspondront à une moyenne annuelle.

La variable « temps » a un grand impact sur les *stocks* énergétiques, et notamment pour l'un des « moins liquides » d'entre eux, l'énergie grise (ou incorporée). La compensation de la dépréciation de l'énergie incorporée (en conséquence directe du second principe de la thermodynamique) correspond à une *charge énergétique* directement imputable à la flèche du temps. Le maintient de l'intégrité de la complexité réclame dès lors un produit énergétique. A contrario, le temps peut également engendrer une valeur associée à des processus physico-chimiques engendrant une complexification de la structure. De façon certes anecdotique, nous pouvons penser au vieillissement du vin et de spiritueux.



Tracés aériens (crédit Chris Jordan)

Variables extensives

En thermodynamique, une grandeur extensive est un paramètre, caractérisant un système physique, qui est proportionnel à la taille de ce système. De manière générale, on dit d'une variable qu'elle est extensive lorsque la somme des valeurs de cette grandeur pour deux systèmes disjoints est égale à la valeur de la grandeur pour la réunion des systèmes.

La population : comment compter le flux « d'habité » ?

La population sera mesurée selon le taux d'occupation réel. À titre d'exemple, si l'espace étudié correspond à l'îlot de mon immeuble, je me compterai alors comme une fraction d'habitant en fonction de ma présence moyenne effective dans le lieu. En fonction de la période de temps de comptage, un habitant correspondra à une présence complète sur l'espace de référence A_k analysé. Pour ce qui concerne l'îlot de mon immeuble de bureau, mon taux d'habitation sera alors de l'ordre de 0,35.

$$P_T = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} dt.n_{individus}(t)$$

Dans la suite de nos travaux, lorsque la période de mesure « *T* » ne sera pas précisée, la valeur de population (et ses dérivés spatiales associées comme la densité) sera implicitement une moyenne annuelle.

Comme rappelé en introduction de ce rapport, la terminologie de demande énergétique est associée à la présence humaine. Rappelons aussi la fameuse formule IPAT[99] propre à décrire les impacts sur l'environnement :

Impact = Population x Abondance x Technologie

Si l'impact évalué ici est la consommation mondiale d'exergie dévolue aux activités humaines, nous pouvons alors traduire les termes de la façon suivante :

- L' « *Abondance* » correspond alors à la somme des besoins finaux d'énergie par individu et traduit alors une « culture » de la consommation.
- La « *Technologie* » correspond dans ce cas au rapport typique entre besoins finaux et consommation d'exergie nécessaire.

[99] Cette relation fut initiée par Barry Commoner, Paul R. Ehrlich et John Holdren dans les années 70.

En fonction de la typologie des taux de présence et des usages programmatiques associés, les consommations de la population peuvent varier.
La liste ci-dessous décrit une première typologie du mix de la *demande énergétique* associé aux individus :

- Besoins alimentaires pour assurer ses fonctions métaboliques ;
- Besoins de consommation de biens courants (et les demandes énergétiques amont qu'ils réclament pour leur constitution) pour se vêtir, se soigner, se divertir, ...
- Besoins énergétiques pour maintenir les conditions de santé et de confort de notre température corporelle ;
- Besoins de s'éclairer en accord avec les différentes activités humaines ;
- Et besoins d'énergie pour se déplacer ainsi que ceux afférents aux transports des biens et services précités.

En aval de l'individu –et vu alors en tant qu'agent ou transformateur énergétique-, celui-ci est alors capable d'*offrir* la typologie suivante d'*offre* énergétique :

- Le travail physique. Il s'agit de prendre ici en compte l'énergie mécanique qui peut être déployé par un humain dans le cadre d'une fonction de production[100] ;
- L'émission de chaleur fatale. Cela comprend l'émission de chaleur sensible et latente par le corps humain qui peut éventuellement être utilisé comme un intrant énergétique ;
- Les déchets organiques ;
- Etc.

L'emprise bâtie

De façon générale, sera considérée comme « emprise bâtie » tout ce qui possède un toit, qui créé une ombre et une protection partielle à la pluie. Une serre sera donc comprise dans cette définition. Il en sera de même pour une ombrière de parking voire pour une centrale photovoltaïque au sol.

Dès lors que le sol comprend une construction à son aplomb permettant le passage de personnes, on ne considérera que cette surface de sol comme emprise bâtie. Nous verrons dans la suite de l'étude l'intérêt de cette définition.

La *demande énergétique* associée à l'emprise bâtie sera essentiellement associée à la préparation préalable du sol pour recevoir le bâti (terrassements, réseaux, …)

Cette valeur sera notée « $m^2_{emprise}$ »

L'emprise non bâtie

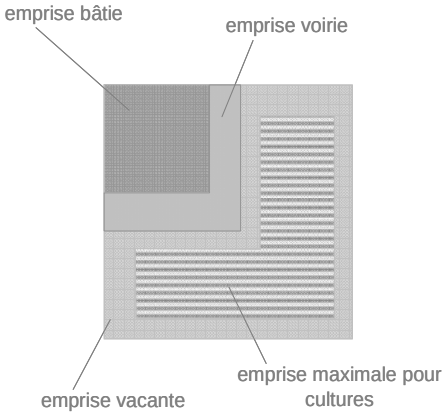
A contrario, le sol non bâti comprendra :

- les sols y compris les plans d'eau de toutes surfaces ;
- les surfaces artificielles ou partiellement transformées (voiries, décharges à l'air libre, carrières, ...).

Les productions énergétiques potentielles (ou les *offres*) de ce type de sol seront essentiellement de type chimique : production de biomasse, production alimentaire halieutique, transformation chimique sous l'action de fermentation, etc.

Ce type de sol pourra également avoir un impact sur la *demande* de chaud et de froid par son action microclimatique (albédo, évapotranspiration,...). La production d'électricité pourra être engendrée dans ce type d'espace par la présence de cours d'eau ou les situations urbaines en zone côtière : hydroélectricité, énergie marémotrice, énergies marines, …Mais aussi de gisement éolien intéressant du fait de la planéité et de la rugosité faible

Cette valeur correspondra alors à « $m^2_{sol} - m^2_{emprise}$ »



Prorata de surface urbaine et typologie des espaces de production énergétique potentielle

[100] Rappelons-nous les « esclaves énergétiques » décrits par Mc Neill puis repris par Jancovici pour relater l'explosion du support énergétique offert par les énergies fossiles.

Le bâti

Dans notre étude, les surfaces considérées comme bâties seront les suivantes :

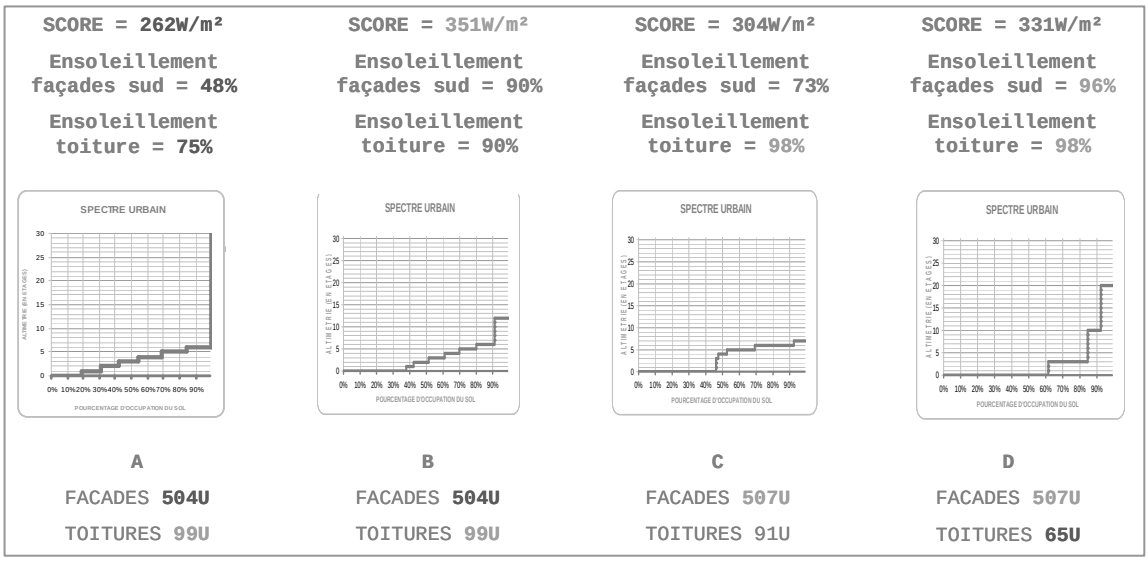
- Les logements et hébergements divers ;
- Les commerces ;
- Les bureaux et les espaces de service ;
- Les équipements publics ;
- Les locaux industriels et agricoles.

La *demande* en énergie dans le bâti sera fonction des usages et de son intensité. Elle sera aussi fonction du mix programmatique. Elle comprendra chaud et froid (à différentes intensités et températures), éclairage artificiel, électricité. Elle induit également consommation d'énergie grise (ou énergie incorporée) fonction également du mix programmatique (par exemple le mobilier pour le logement et les matériaux nécessaire à la maintenance, les intrants nécessaires en amont d'un process industriel, les engrais d'un process agricole etc.) et de la culture des usages.

A contrario, le bâti, comme « transformateurs énergétiques artificiels »[101], offre aussi des capacités particulières de production associée à la transformation des *offres renouvelables* suivantes :

- L'électricité, via par exemple la production photovoltaïque ou éolienne.
- La chaleur, par le solaire thermique, le solaire passif[102] ou encore la production géothermique.
- Le froid, par une climatisation solaire (à absorption ou encore une pompe à chaleur animée en amont par du solaire photovoltaïque).
- L'énergie incorporée par une production locale de biomasse ou par tout autre procédé[103].
- La biomasse, par exemple via des serres agricoles.

Cette valeur sera notée « $m^2_{bâti}$ »



Un extrait de résultats des « Villes Solaires Aléatoires », R.Ménard avec le développement de la notion de « spectre urbain » comme raffinement de caractérisation morphologique au-delà du coefficient d'occupation des sols et de densité bâtie.

[101] Au sens de l'espace des fonctions agissants sur E, pseudo-espace vectoriel de description de la donnée énergétique en anergie et exergie. Se reporter à l'annexe pour plus de détails.
[102] Le solaire passif peut toutefois également être analysé comme réducteur de demande que composante d'une offre solaire.
[103] Le splendide exemple du *Solar Sinter* ou encore les façades à algue, « algoculture » développées par l'agence d'architecture X'Tu.

Variables intensives

Une grandeur intensive est le contraire d'une variable extensive : elle ne dépend pas de la taille de systèmes. Elle peut être par exemple le rapport entre deux valeurs extensives. Nous traitons dans ce paragraphe des relations canoniques liant les variables intensives du bâti à celle de l'usage.

Variables de contenu

Les variables de contenu sont directement associées à l'usage et à la pratique de la ville par ces habitants. Notons que ces paramètres sont également transposables à d'autres mesures que celle de l'humain (animaux, végétaux, …).

A titre d'exemple, citons : population, mortalité, taux d'emploi, nombre de véhicules, densité urbaine… De façon triviale, le tableau ci-après résume deux variables essentielles de contenu que nous introduisons, d et e.

Densité urbaine	$d = \frac{n_{individus}}{m^2_{sol}}$	pers.ha^{-1} (ou pers.km^{-2})
Emprise spatiale dans le bâti par individu	$e = \frac{m^2_{bâti}}{n_{individus}}$	m².pers^{-1}

Définition de la densité

Cette quantité mesure la densité d'occupation de la surface urbaine. La densité est une mesure instantanée ou moyennée. A un instant donné, sur une aire urbaine de dimension donnée, nous associons alors :

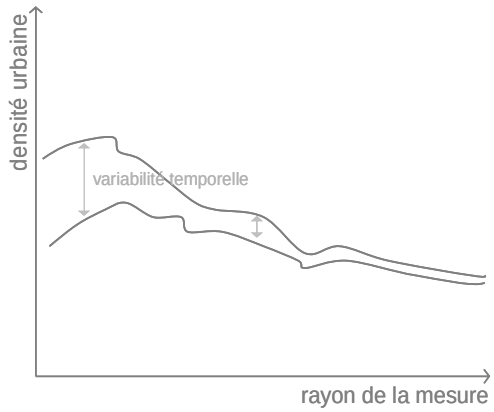
$$d(t) = \frac{n_{individus}(t)}{m^2_{sol}}$$

Or, en fonction des usages de l'aire urbaine et surtout de sa dimension, cette quantité possède une variation temporelle.[104] Plus l'aire de référence est importante[105], plus cette quantité est stable dans le temps. Dans la suite de cette partie, nous considérerons que la densité urbaine correspond à une moyenne annuelle de la présence des individus sur le territoire. A partir de la définition de la population donnée par :

$$P_T = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} dt.n_{individus}(t)$$

Nous définirons la densité de l'acteur k par :

$$d_k = \frac{P_T}{A_k}$$



Allure de la variation temporelle de la densité en fonction de la taille caractéristique de la surface de référence. Plus le rayon de la mesure est faible, plus la fluctuation temporelle de la densité est a priori importante (comparaison par exemple entre la mesure de l'occupation et donc de la densité d'un immeuble résidentielle comparée à la densité à une échelle métropolitaine).

[104] On en déduira les différences par rapport à la densité humaine telle que définie par Fouchier, 1997.
[105] i.e. rayon de la mesure est croissant.

Définition de l'emprise spatiale par individu

Cette quantité mesure la densité d'occupation du volume bâti. A l'instar de la densité, cette quantité est également variable dans le temps en fonction des taux d'occupation des différents programmes et de la cyclicité des usages selon les programmes : présence dans les bureaux en journée, occupation élevée des logements pendant la nuit à titre d'exemple.

Nous supposerons que la population P_T qui habite « en moyenne » l'aire urbaine A_k pratique de façon équivalente le volume bâti[106]. Dès lors, nous définissons la quantité suivante :

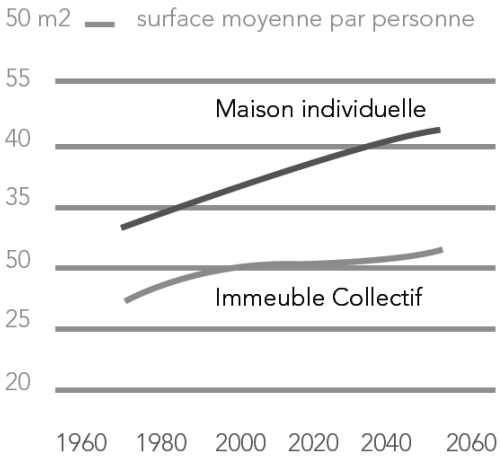
$$e_k = \frac{m^2_{bâti}}{P_T}$$

Cette définition est également liée à la définition des mètres-carrés bâtis. Dans la suite de cette étude, les mètres-carrés bâtis correspondront à toute surface couverte, située au-dessus du sol et parcourable par un individu. A titre d'exemple, les couvertures de hangar, canopées de parking ainsi que centrale photovoltaïque au sol : toute construction susceptible d'engendre de l'ombre au sol.

Variables de contenant

Les variables de contenant caractérisent l'espace capable des usages. Densité bâtie, coefficient d'emprise au sol : ces variables synthétisent une partie de l'information sur la géométrie des volumes habitables.

Coefficient d'emprise au sol (CES)	$c = \frac{m^2_{emprise}}{m^2_{sol}}$	Sans Unités
Hauteur moyenne du bâti (nombre moyen d'étage)	$h = \frac{m^2_{bâti}}{m^2_{emprise}}$	S.U.
Densité bâtie (DB)	$c.h = \frac{m^2_{bâti}}{m^2_{sol}}$	S.U.



Evolution des surfaces habitables en France d'après Prospective des consommations d'énergie et des émissions de CO2 dans l'habitat : les gisements offerts par les pompes à chaleur, Mindjid Maizia, cahier du clip, n° 18 – janvier 2007

[106] Cette hypothèse est nécessaire pour préserver l'égalité fondamentale de l'urbain.

Une égalité canonique

Relation entre contenu et contenant

Retenons alors que les variables précédentes sont alors liées de façon triviale par cette égalité fondamentale :

$$\frac{m^2_{emprise}}{m^2_{sol}} \cdot \frac{m^2_{bâti}}{m^2_{emprise}} \cdot \frac{n_{individus}}{m^2_{bâti}} \cdot \frac{m^2_{sol}}{n_{individus}} \equiv 1$$

Cette égalité peut également s'écrire de la façon suivante :

$$\frac{m^2_{emprise}}{m^2_{sol}} \cdot \frac{m^2_{bâti}}{m^2_{emprise}} \equiv \frac{m^2_{bâti}}{n_{individus}} \cdot \frac{n_{individus}}{m^2_{sol}}$$

Nous pouvons donc en déduire la dépendance des quatre variables qui doivent vérifier la relation suivante.

$$c.h = d.e$$

En d'autres termes, la caractérisation de trois paramètres permet de décrire la quatrième variable. Nous pouvons dès lors explorer l'espace des quatre paramètres en choisissant trois des quatre variables décrites précédemment.

Township en Afrique du Sud.

Comment retranscrire et caractériser c,h,d et e ?

Une hypothèse c~90%, h~1. Dès lors d.e~0,9. Si l'emprise individuelle dans l'espace construit est de 15m² par personne, la densité serait alors de 600 personnes à l'hectare (photo RM)

L'équation de Kaya

Cette relation algébrique triviale rappelle l'équation de Kaya[107]. Cette dernière indique que le niveau total d'émissions de gaz à effet de serre (ou d'équivalent CO_2) peut s'exprimer comme le produit de quatre facteurs : la population, le produit intérieur brut par habitant, l'intensité énergétique par unité de PIB produite et l'intensité d'émission de CO_2 par unité d'énergie consommée.

$$CO_2 = POP.\frac{PIB}{POP}.\frac{ENERGIE}{PIB}.\frac{CO_2}{ENERGIE}$$

L'équation de l'urbain et enseignements triviaux

Nous écrivons ci-dessous de façon différente l'égalité fondamentale :

$$n_{individus} = \frac{m^2_{emprise}}{m^2_{sol}}.\frac{m^2_{bâti}}{m^2_{emprise}}.\frac{n_{individus}}{m^2_{bâti}}.m^2_{sol}$$

En prenant exemple sur la forme vulgarisée de l'équation de Kaya, elle peut également s'écrire ainsi :

$$POP = SOL.\frac{EMPRISE}{SOL}.\frac{BATI}{EMPRISE}.\frac{POP}{BATI}$$

Si la population étudiée sur un sol de surface donnée est croissante (resp. décroissante), cela suppose qu'*a minima* l'un des trois ratios ci-haut augmente (resp. diminue) :

- Soit le coefficient d'emprise au sol augmente (resp. diminue) et cela peut notamment correspondre à un agrandissement (resp une réduction) de la tâche urbaine et une artificialisation croissante des sols (dynamique d'étalement urbain) ;
- Soit le nombre moyen de niveaux du bâti augmente (resp. diminue) : on assiste alors à une densification (resp. dédensification) des morphologies existantes ;
- Il est enfin possible que la population puisse croître (resp. décroître) sans nécessairement de modifications des deux autres ratios. Cela peut être le cas si l'intensité moyenne d'usage augmente (resp. diminue). Concernant ce dernier paramètre, les statistiques montrent que pour l'usage résidentiel, il évolue tendanciellement depuis la Seconde Guerre[108].

[107] L'équation de Kaya a été développée par Yoichi Kaya, un économiste de l'énergie japonais, dans son ouvrage *Environment, Energy, and Economy : strategies for sustainability*

[108] Référence de Maïzia dans le Cahier du Clip.

Evidemment ces trois tendances peuvent se combiner. La population peut notamment augmenter (resp. diminuer) parce qu'à la fois l'emprise bâtie augmente (resp. diminuer) et parce que le nombre moyen de niveaux construits augmente (resp. décroît)

Dynamique d'évolution

En différentiant l'égalité précédente, nous pouvons retenir au premier ordre la loi suivante de dynamique d'évolution:

$$\frac{\Delta c}{c} + \frac{\Delta h}{h} \cong \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta d}{d}$$

Si l'on souhaite remplacer les deux termes de gauche par la densité bâtie- en concaténant le coefficient d'emprise au sol avec la hauteur moyenne bâtie-, on peut alors écrire la loi d'évolution de la façon suivante :

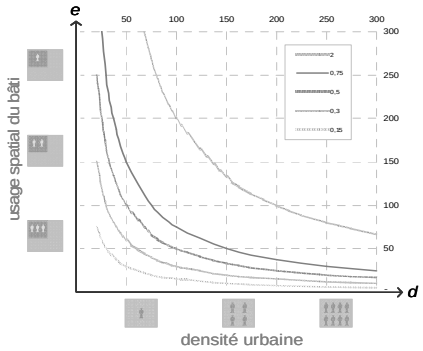
$$\frac{\Delta DB}{DB} \cong \frac{\Delta e}{e} + \frac{\Delta d}{d}$$

Diagrammes de représentation

Quelques enseignements préliminaires

On remarque de l'égalité précédente qu'une augmentation du volume habitable (i.e. augmentation de la densité bâtie) n'entraîne pas nécessairement une augmentation de la densité urbaine : si l'empreinte spatiale diminue dans une proportion relative équivalente à l'augmentation de la densité bâtie, alors la variation de la densité de contenu (i.e. densité urbaine) est nulle.

Enoncé différemment, l'augmentation continue de l'emprise spatiale suppose de continuer à construire pour préserver la densité urbaine. Cette situation est emblématique de la plupart des villes développées ou en émergence[109].



Espace du contenu (diagramme d,e)

[109] A développer. Graphique pour la France, données pour Shanghaï etc.

Diagramme d'usage et courbes d'iso-contenant

Le diagramme ci-dessous propose une représentation de l'usage, à la fois comme rapporté à l'aire urbaine de référence ainsi que rapporté à l'espace bâti. De l'égalité de référence entre contenant et contenu urbain, nous traçons sur ce diagramme des « courbes d'iso-contenant », matérialisant plusieurs hyperboles de densité bâtie.

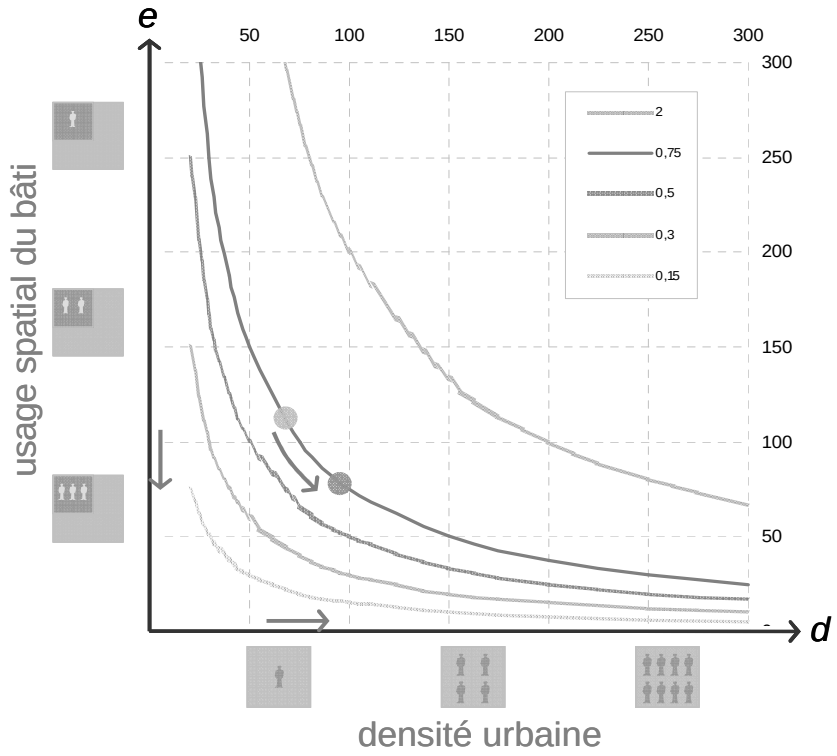
Exemple d'une dynamique d'intensification de l'usage du bâti

Pour cet exemple, on considère que la mutation urbaine s'effectue à « iso-contenant ». La dynamique d'évolution s'effectue à densité bâtie constante (nous sommes dans cette expérience sur une courbe *c.h=DB=3*). L'intensité de l'usage du bâti est encouragée, dès lors la densité urbaine augmente.

Diagramme de contenant et courbes d'iso-usages

De façon duale, nous définissons le diagramme représentant le contenant urbain, matérialisant à fois la proportion d'espace dévolue au bâti (c), et la hauteur caractéristique du tissu bâti en nombre de niveau moyen (h).

De l'égalité de référence entre contenant et contenu urbain, nous traçons sur ce diagramme des courbes d'iso-contenu, matérialisant plusieurs hyperboles d'intensité d'usage (d.e). Retenons que le diagramme de contenant propose également le cadre de représentation des spectres urbains, notion abordée dans une section suivante.



Visualisation d'une dynamique urbaine dans l'espace du contenu (diagramme d.e)

Fonctions d'offre et de demande

Variables d'état

A partir ce point d'avancement, nous allons à présent tacher de caractériser la *demande* puis l'*offre* d'un territoire *k* donné à partir des variables *c,h, d* et *e* précédemment définies et décrites. Au sein de la description de chacune des variables, nous tacherons également d'introduire les enjeux en terme :

- de *demande* énergétique et ainsi commencer à instruire la donnée[110] $\langle k|\underline{D}\rangle$
- de l'*offre* énergétique, et dans ce cas, il s'agit de renseigner les potentialités de conversion en produit énergétique issu des formes solaires[111] et des formes géothermiques[112], $\langle k|\underline{S}\rangle+\langle k|\underline{G}\rangle$

Matrice offre-demande

Le tableau ci-contre propose une toute première typologie des interrelations liant chacun des quatre variables intensives retenues vis-à-vis de l'*offre* et de la *demande* d'énergie à toute échelle spatiale.

L'ensemble de notre recherche analyse et quantifie un territoire, et non les individus. Dès lors, l'identification de l'*offre* et de la *demande* en énergie s'effectuera en unités énergétiques rapportées à l'espace.

Pour ce qui concerne l'*offre* énergétique, et notamment la capacité d'un territoire à convertir les gisements potentiels, le principe de cette quantification ne pose aucun problème. La question de la consolidation du mix énergétique fera l'objet d'une discussion ultérieure.

A l'inverse, pour ce qui concerne la *demande* d'énergie, celle-ci est davantage proportionnelle à la population qu'à la quantité d'espace : un espace vidé de population sur une période de temps suffisante n'appelle de demande d'énergie. Dès lors, dans la suite de l'étude, il s'agira de prêter attention aux cartes de *demande* énergétique établies soit en consommation à la surface, soit en consommation à l'habitant[113].

	Offre *Produits énergétiques*	Demande *Charges énergétiques*
Contenu	2ème ordre	oui
Contenant	oui	2ème ordre

Tableau pour identification des impacts sur offre et demande en énergie selon les quatre variables intensives de référence : nous retenons une diagonalisation associant contenu et demande tandis que contenant s'associe davantage à l'offre énergétique.

		Impacts sur la densité d'offre énergétique (en W/m²)	Impacts sur la densité de demande énergétique (en W/pers)
d	Densité urbaine	Amont[114] Déchets à valoriser	Mobilité Chauffage et froid[115]
e	Emprise dans le bâti par individu	Negligeable[116]	Chauffage et froid Eclairage artificiel Construction de bâtiments Exploitation de bâtiments[117]
c	Coefficient d'emprise au sol	Alimentation Biomasse Solaire Géothermie	Construction d'infrastructure
h	Hauteur moyenne bâti	Solaire Eolien	Construction de bâtiments Exploitation de bâtiments

Tableau pour identification des impacts sur offre et demande en énergie selon les quatre variables intensives de référence : nous retenons une diagonalisation associant contenu et demande tandis que contenant s'associe davantage à l'offre énergétique.

[110] On pourra se reporter aux annexes pour davantage d'explications sur l'introduction de la notation en « bra-khet ».
[111] Le solaire et ses dérivés voire dans certains cas singuliers, l'énergie marémotrice (pour mémoire !).
[112] Le gisement géothermique.
[113] L'une se traduisant facilement en l'autre en multipliant (resp. divisant) par la densité.

[114] Toutefois, la présence d'une population importante sur un territoire donnée (ie densité importante) favorise la demande et concomitamment investissements (capital) et quantité de travail pour la mise en place et l'exploitation de l'offre énergétique renouvelable.
[115] Mais sans doute au deuxième ordre, la corrélation d'une compacité croissante avec une densité plus élevée n'étant pas si évidente.
[116] Hormis éventuellement la valorisation de chaleur fatale émise par les activités anthropiques ou la valorisation des sortants sous forme d'énergie grise.
[117] Notamment besoins de consommables mobiliers

Cartographier offre et demande

Choix de parti

A partir des matrices évoquées précédemment, nous formulons les hypothèses suivantes :

$$\begin{cases} Offre \approx fonction(c,h) \\ Demande \approx fonction(d,e) \end{cases}$$

Retenons aussi que l'*offre* correspond à des *produits énergétiques* tandis que la *demande* correspond à des *charges énergétiques*[118]. L'offre est un intrant et vient de gauche dans le diagramme de Sankey ; la demande est un exutoire et sort par la droite du diagramme de Sankey.

La différence entre *produits* et charges, le compte de résultat énergétique intérieur[119], sera évalué sur la période de temps T et sur l'espace $\mathcal{A}_k$ et nous tenterons alors de le décrire de la façon suivante :

$$\underline{\varepsilon} \equiv offre - demande \equiv \underline{f}(c,h,e,d)$$

Formalisation dans l'espace anergie-exergie

Par commodité, nous retiendrons en effet la définition suivante :

$$\underline{\varepsilon} = \left\langle k \middle| \underline{B}^{\text{int}} \right\rangle = \langle k| \underline{S}\rangle + \langle k| \underline{G}\rangle - \langle k| \underline{D}\rangle$$

Dans ce qui vient, nous ferons l'hypothèse suivante :

$$\underline{\varepsilon} \approx \underline{g}(c,h) - \underline{h}(e,d)$$

Avec :

$$\begin{cases} \underline{g}(c,h) \approx \langle k| \underline{S}\rangle + \langle k| \underline{G}\rangle \\ \underline{h}(e,d) \approx \langle k| \underline{D}\rangle \end{cases}$$

Hypothèse de la neutralité totale

Dans ce le cas de figure où la balance énergétique intérieure est nulle, l'équation de bilan énergétique devient alors :

$$\Delta\langle k|\underline{M}k\rangle = \langle k|\underline{M}|1\rangle - \langle 1|\underline{M}|k\rangle$$

La variation du *stock* énergétique de l'acteur k ne devient plus que dépendante de la différence entre intrant et sortant, soit de la balance énergétique extérieure.

Cas du territoire positif et en autarcie énergétique

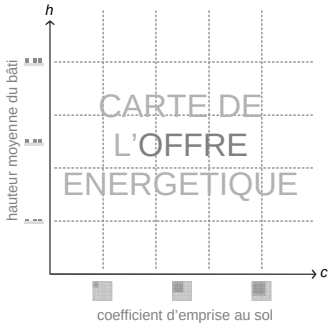
Un territoire en autarcie énergétique n'échange aucune énergie avec les autres. Si il est parallèlement positif, cette situation correspond alors à :

$$\begin{cases} E(\underline{\varepsilon}) > 0 \\ \langle k|\underline{M}|l\rangle = \langle 1|\underline{M}|l\rangle = \underline{0} \quad \forall l \end{cases}$$

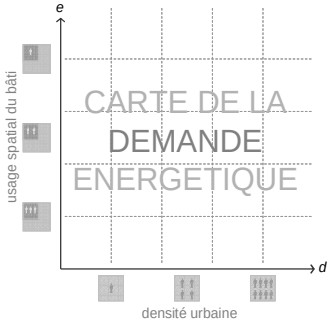
Nous en déduisons alors que :

$$E(\underline{m}_k) = E\left[\Delta\langle k|\underline{M}|k\rangle\right] > 0$$

Le territoire k augmente alors ses actifs énergétiques et ses *stocks* sont donc en croissance.



Espace de l'offre énergétique (diagramme c,h)



Espace de la demande énergétique (diagramme d,e) : des espaces duaux à explorer.

[118] En 2009, David Mac Kay dans *Without the hot air* a livré ses estimations pour le Royaume-Uni. Nous reprendrons quelques ratios qu'il a pu identifier.

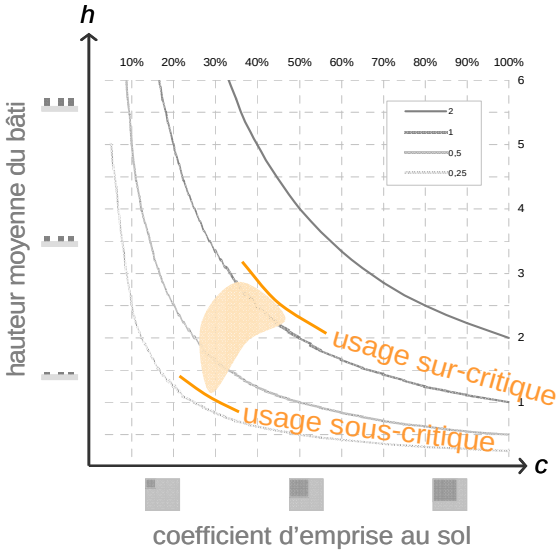
[119] Ou encore balance énergétique intérieure.

Zones de fonctionnement

Usages sous-critiques et sur-critiques

Le diagramme ci-dessous présente une situation de production constante de densité exergique[120], compatible avec une situation donnée de morphologie urbaine.

La relation d'interdépendance entre contenu et contenant urbain met dès lors en exergue en fonction des iso-courbes d'usages[121] des situations sous-critiques[122] et sur-critiques[123] tangentes à cette espace de production. En deçà du paramètre sous-critique, on ne trouvera aucun point de fonctionnement, et donc pas de capacité d'autosuffisance exergique du territoire testé.

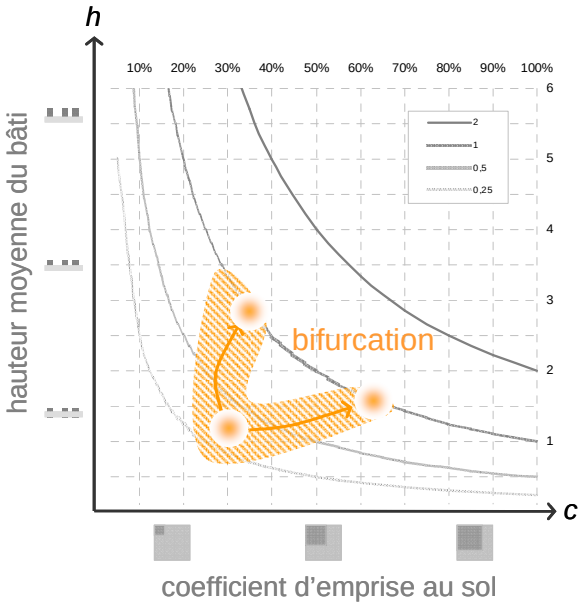


Exemple de situations sous-critiques et sur-critiques d'un espace de production.

Points de bifurcation

En fonction de la géométrie de l'espace de production et des critères attendus de conservation des qualités de production énergétique, la dynamique d'évolution de la morphologie urbaine peut voire apparaître des bifurcations, par exemple dans le cas d'une évolution des usages urbains.

Dans le diagramme ci-dessous, la préservation du productible dans le cas où le paramètre *d.e* venait à augmenter suppose deux évolutions distinctes de la forme urbaine. En suivant une analogie thermodynamique, cette transition rappelle les bifurcations de changement de phase.



Exemple de bifurcation.

[120] Rendement constant de production exergique annuel.
[121] i.e. de contenu en densité urbaine, d, et intensité d'usage du bâti, e.
[122] Ce cas correspond à l'iso-courbe tangente à l'espace de production pour le paramètre *e.d=c.h* le plus faible.
[123] Ce cas correspond à l'iso-courbe tangente à l'espace de production pour le paramètre *e.d=c.h* le plus élevé.

Mesurer la demande

Introduction

Etats des lieux

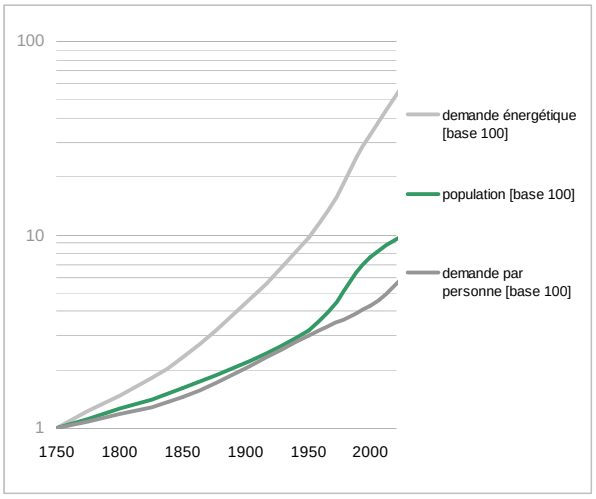
Comment quantifier la demande à différentes échelles ? Comment déterminer ce qui est de l'ordre individuel (une variable intensive : la consommation individuelle et les stratégies de sobriété et d'efficacité qui peuvent y être associé) et de l'autre ce qui dépend du nombre (la variable extensive de la population) ? Le graphique ci-dessous rappelle les évolutions tendancielles depuis près de trois siècles. Un double mouvement :

- Une demande individuelle qui a été multipliée par près de six depuis une quinzaine de génération ;
- La population qui a été multipliée par dix depuis 1750 ;

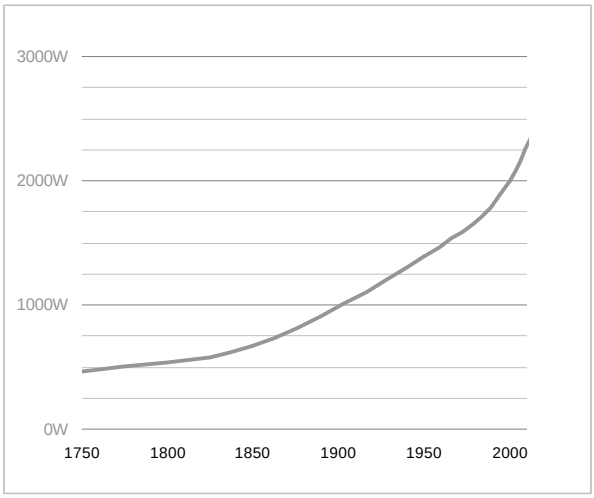
Et dès lors, une demande globale environ cinquante fois supérieure à celle de nos aïeux à la fin du 18ème siècle.

Dans la suite de cette section, nous ferons une large part à l'identification de la demande individuelle tant en quantité que en qualité en utilisant la *formalisation* de notre espace de représentation de l'énergie

Nous utiliserons également une quantification de la demande selon le flux moyen de la demande primaire en Watt par individu.



Courbe d'évolution en base 100 de la demande énergétique mondiale depuis le début de la grande mutation en 1750 et le début de l'exploitation des énergies fossiles. La double amplification de la demande globale, produit de l'évolution démographique et de la croissance de la demande énergétique individuelle.



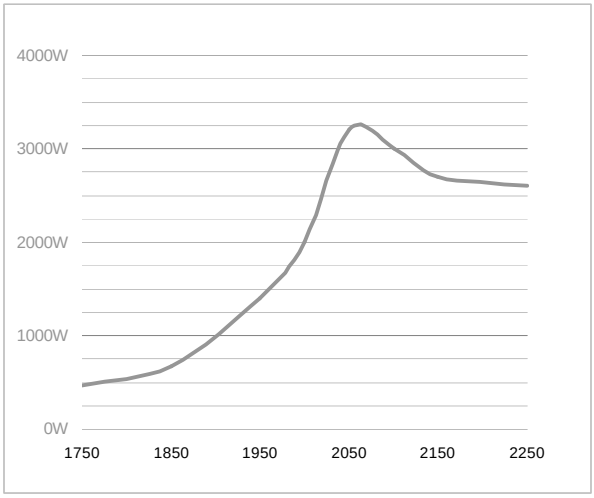
Courbe d'évolution de la demande énergétique individuelle depuis 1750 : le passage progressif d'une demande 500W par terrien à plus de 2000W au début du 21ème siècle. Un « autre facteur 4 » en deux siècles…

Le scénario « Reforme 7 » de la demande

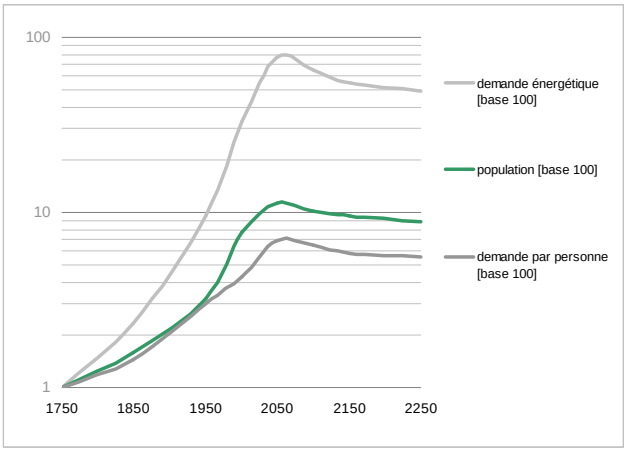
Au terme de cette recherche, dans la dernière partie, *Les Métamorphoses*, nous présentons plusieurs scénarios globaux de *solarisation terrestre* et de convergence entre *offre* et *demande* énergétique. Selon ce scénario médian, la population mondiale entame une longue transition démographique jusqu'à stabiliser la démographie à environ 7 milliards d'individu dans environ 200 ans (le maximum étant atteint autour des années 2050 à environ 9 milliards d'individu).

Concomitamment, la demande individuelle se stabilise et s'uniformise pour se tendre vers une valeur d'environ 2500W par terrien à horizon 2200.

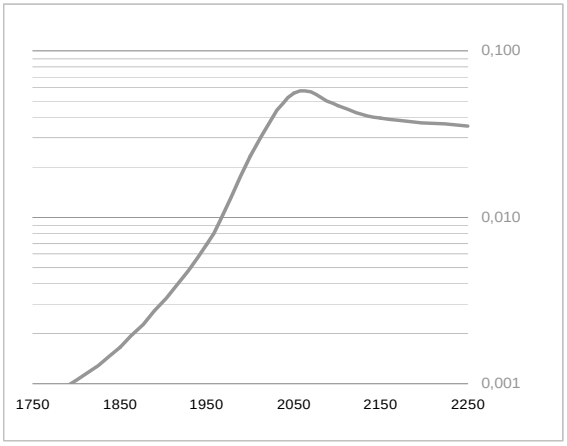
Selon ce scénario, le pic de demande globale est atteint au cours ce siècle pour atteindre environ 22 000 MTep par an en 2050, soit environ 30TW.



Courbe d'évolution et scénario de stabilisation de la demande individuelle primaire à moins de 3500W par personne. Décroissance puis stabilisation de la demande individuelle post-2050 suite globalisation de démarches de sobriété et d'efficacité.



Vue générale du scénario de demande énergétique selon la trajectoire « Reforme 7 » avec 7 milliards de terriens à horizon 2250. Les deux autres scénarios, « Reforme 4 » et « Reforme 10 » décrivent des trajectoires avec respectivement 4 et 10 milliards d'habitants sur Terre.



Courbe d'évolution et scénario de stabilisation de densité de la demande énergétique mondiale (en W/m²). Rapport entre la demande énergétique primaire et la surface totale du globe. Il est probable que la densité de demande reste inférieure à 0,1W/m². Rappelons que le flux moyen d'irradiation terrestre est de 169W/m².

Une stratégie d'efficacité et de sobriété : la Société à 2000 Watt

Historique

Cette démarche, initiée en Suisse, consiste à définir les stratégies urbaines et les transformations des usages permettant de diviser par environ trois la consommation primaire d'énergie par individu[124]. Voici pour rappel, quelques jalons historiques concernant la mise en place de cette démarche :

1994, Les jours de l'énergie PSI Kesselring & Winter
1998, ETH-Conseil Stratégie de soutenabilité
2001, Fondation de Novatlantis
2004, « Techniquement faisable ! » Livre blanc
2008, Vote à Zürich: 76% de oui
2013, Antennes d/i/f

Vision

La société à 2000 Watt projette une vision à long terme à l'horizon 2050-2100 de 2000 W d'énergie primaire et à une tonne de CO_2 par personne, partout dans le monde. Concernant la demande primaire, ce scénario est plus volontariste que ceux décrits dans les *Métamorphoses*.

Elle représente un énorme défi en termes d'innovation à tous les niveaux : social (comportements), sociétal (conditions cadre), technique (technologie) et elle mise sur la qualité au lieu de quantité.

Implémentation au niveau des cantons

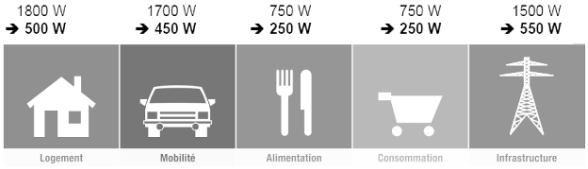
- Ancré dans les stratégies énergétiques cantonales : objectifs de la société à 4000 W en 2030 (Fribourg, Bern) ;
- Inscrit dans le »s lois cantonales sur l'énergie : objectifs de la société à 2000 W en 2050 (Neuchâtel) ;
- Inscrit dans les programmes de législature : objectifs de la société à 2000 W (Vaud).

Objectifs fondamentaux

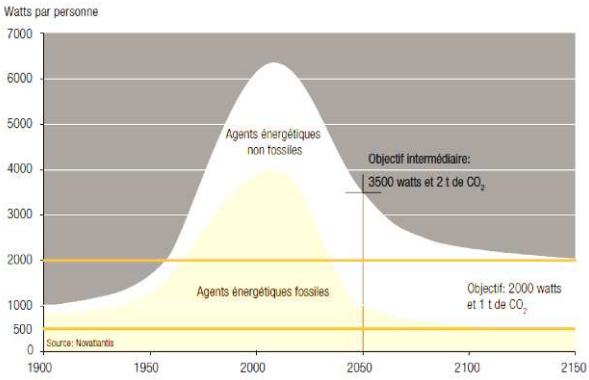
- 3 fois moins d'utilisation d'énergie primaire ;
- 8 fois moins d'émissions de CO_2 ;
- et ceci pour tous et dans tous les domaines.

Outils disponibles

- Pour un territoire : outil *Région énergie*
- Pour un bâtiment : *Cahier technique SIA 2040*
- Pour les quartiers: Labellisation *Quartier Société 2000W*



Description par la Société à 2000W des postes de demande énergétique et des stratégies de réduction



Société à 2000W : le chemin de la décroissance énergétique.

	Suisse en 2014	Société à 2000W	
logement	1 800 W	500 W	-72%
mobilité	1 700 W	450 W	-74%
alimentation	750 W	250 W	-67%
consommation	750 W	250 W	-67%
infrastructure	1 500 W	550 W	-63%
somme de la demande	**6 500 W**	**2 000 W**	-69%

Tableau récapitulatif de réduction de la demande par postes énergétiques. La suite de la Formalisation décrit la demande selon un autre ordonnancement

[124] En 2009, la consommation moyenne d'énergie primaire était d'environ 5500W par Français et 5700W par citoyen helvète. Comme premier ordre de grandeur, 2000W c'est environ la quantité d'énergie solaire moyenne reçue par 10 à 15m² de la surface du globe. Au niveau de l'Equateur, ce sera de l'ordre de 10m² tandis qu'à hautes latitudes, ce sera plutôt de l'ordre de 20m².

Modèle à l'échelle du bâti

Rappelons donc l'hypothèse de la *demande* énergétique individuelle telle que formulée précédemment :

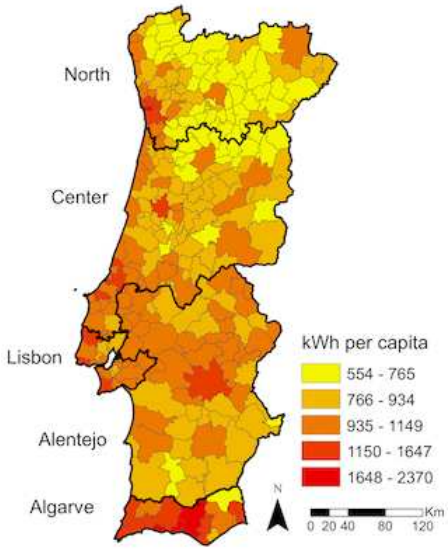
$$Demande \approx fonction(d, e)$$

Retenons aussi que cette demande (par exemple exprimée par un flux moyen de demande par individu, en W par personne)sera aussi fonction d'une multitude de paramètres : sociologique, culturelle, technologique, climatique ainsi qu'évidemment le niveau de vie[125].

Dès lors, l'enjeu de cette partie consiste ainsi à décrire une ébauche de modèle de formulation de la *demande* individuelle comme fonction :

- de la densité de population (mesurée à l'échelle urbaine),
- de l'emprise individuelle bâtie,
- et du climat.

Les paramètres sociétaux et technologiques seront ensuite des coefficients différents à affecter à la formulation générale, notamment la question du niveau de vie (voir la dernière partie les *Métamorphoses,* la partie dédiée à l'analyse en France et les résultats de *demande* énergétique par quintile de revenus des ménages).



Un exemple de cartographie de la demande finale en électricité au Portugal en 2005-2006 (source Urban Metabolism Research[126])

[125] Référence au Clip n°22, Nouvelles représentations de l'énergie.

[126] http://projects.urbmet.org/pages/ElectricityPortugal/index.php

Assouvir nos besoins croissants d'électricité. Un exemple de « filtre exergique », la centrale nucléaire de Nogent-sur-Seine. Deux tranches de 1360MW électriques installés. Le dégagement de chaleur fatale, lié au cycle thermodynamique, est alors de l'ordre de 5000MW (soit environ la chaleur émisses par 70 millions de Français !) (Photo : R.Ménard, prise lors de la visite avec les étudiants du DPEA Architecture post-carbone en septembre 2013)

Une typologie des besoins

L'électricité

Description

L'électricité est une énergie intermédiaire ou finale fortement répandue. Elle est un vecteur énergétique extrêmement « liquide » au sens de la diversité potentielle de ses utilisations. L'électricité constitue un excellent vecteur secondaire avant transformation :

- en énergie mécanique (pour les transformations de la matière dans l'industrie par exemple ou pour permettre la mobilité des biens et des personnes),
- en chaleur (pour les fours à micro-ondes par exemple, pour les convecteurs électriques, pour les cumulus pour eau chaude sanitaire ou encore l'énergie mécanique nécessaire au cycle thermodynamique d'une pompe à chaleur,
- en énergie chimique au cours d'une électrolyse par exemple,
- en lumière,
- ou encore comme intrant fondamental pour les processus informatiques et communicationnels.

Le stockage

La question du stockage de l'électricité reste toutefois au cœur des enjeux et défis technologiques de ce siècle, notamment sur le développement de la mobilité individuelle électrique tout comme la gestion du stockage à court et moyen terme afin d'assurer la synchronisation entre offre et demande électrique, lié notamment à l'intermittence de production des énergies renouvelables.

Variables affectant la demande

La demande d'électricité individuelle est alors affectée par les trois variables précédemment décrites. Sans doute de la façon la plus importante par *e,* l'emprise individuelle bâtie ; puis par le climat (qui affecte notamment la demande climatique) et enfin pour les besoins en mobilité gouvernés notamment par *d,* la densité.

Type de demande

- Contenu exergique ~100%
- Ordre de grandeur des besoins spécifiques résidentiels. En France, la consommation du secteur résidentiel pour les besoins spécifiques était de 69,4TWh en 2006[127]. Soit une consommation individuelle légèrement supérieure à 1000 kWh d'électricité par an.

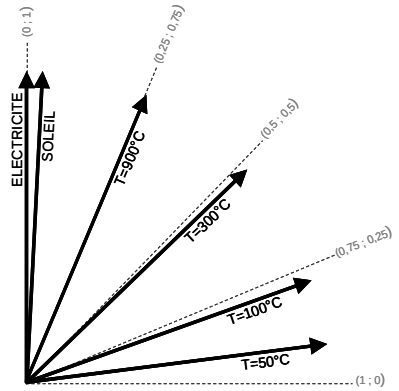
[127] Source DGEMP / Observatoire de l'énergie

La chaleur

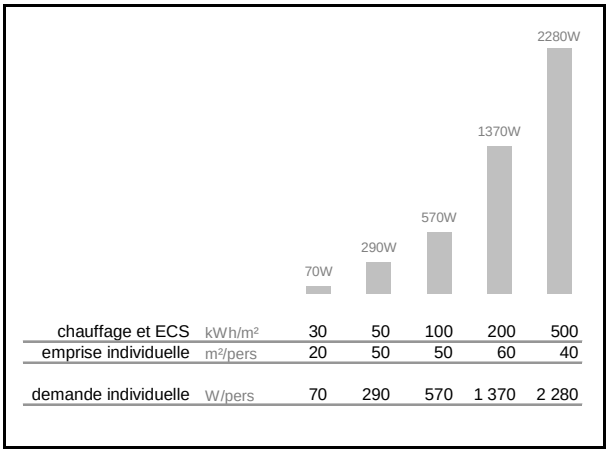
La chaleur est l'énergie utile requise pour le bien-être de nos logements, pour chauffer nos fourneaux ou encore au cœur d'un certain nombre de processus industriels (la papeterie, la métallurgie et la cimenterie par exemple).

L'intensité de la chaleur est mesurée par la température. La qualité et la diversité des usages pouvant être réalisé à partir de la chaleur est éminemment fonction de la température de la source relativement au milieu ambiant.

La demande de chaleur est d'abord gouvernée par l'emprise bâtie individuelle (*e*) et le climat. La densité urbaine (*d*) impacte sans doute avec une corrélation faible la compacité typique du bâti.



Variation de la qualité de la chaleur en fonction de la température (base 300K). Graphique de représentation en anergie-exergie.



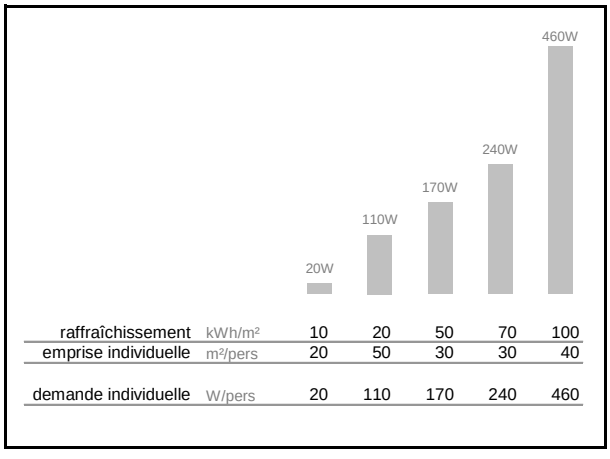
Variation de la quantité de chaleur selon différentes efficacités du bâti et de l'emprise individuelle. Nota : cette estimation ne prend pas en compte les besoins associés à la cuisson.

Le froid

La demande de froid est nécessaire pour le stockage des aliments. La plupart de nos réfrigérateurs exploitent le vecteur électrique, puis l'usage d'une machine thermique pour produire du froid tout en évacuant du chaud dans nos logis. Il en est de même sur les lieux de commerce pour l'entreposage et la commercialisation de nos denrées alimentaires.

Pour le contrôle climatique de nos espaces de vie, l'implémentation de dispositifs de rafraîchissement et de climatisation tant à se généraliser pour nos bureaux et nos commerces, voire pour le résidentiel. La demande de froid est aussi présente dans nos moyens de mobilité, en général très exposée au rayonnement solaire par leurs transparences (songeons notamment aux automobiles contemporaines). Retenons cependant que la chaleur fatale engendrée par la production de froid est très peu valorisée.

La demande de froid est d'abord gouvernée par l'emprise bâtie individuelle (*e*) et le climat. La densité urbaine agit sans doute avec une corrélation faible tant sur la compacité que l'exposition solaire du bâti que sur les surfaces vitrées exposées.



Une gamme d'estimation des besoins de rafraîchissement en demande finale de froid selon la situation climatique, la nature du parc et l'emprise individuelle.

Demande de chaud et de froid dans l'espace E

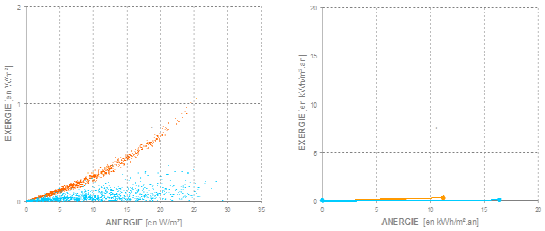
Introduction

Dans le cadre de *Reforme,* nous avons aussi taché d'évaluer la nature de la qualité énergétique réclamé pour les besoins climatiques du bâti. Sur la base d'une évolution du logiciel *Clim'elioth*, nous avons testé pour plusieurs programme et plusieurs climats le couple (*anergie, exergie*).

Les courbes paraboliques montrées dans les quelques exemples sont logiques dans la mesure où la quantité de besoins croît linéaire avec l'écart à la température extérieure, tandis que la qualité y superpose une intensité dû à l'écart.

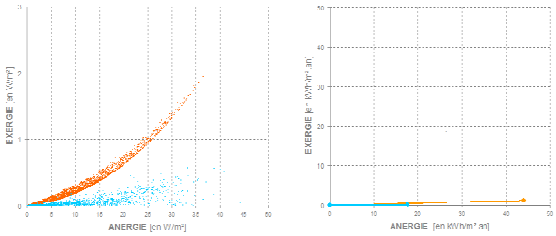
Exemple pour un logement à Mexico

Exergie froid 0,51%
Exergie chaud 2,64%



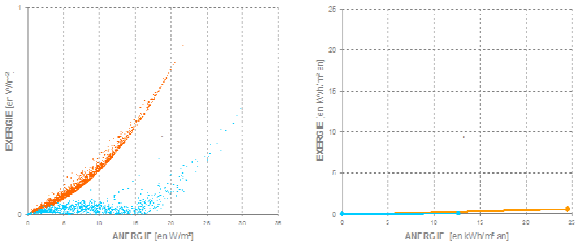
Exemple pour un logement à Santiago

Exergie froid 0,55%
Exergie chaud 2,86%



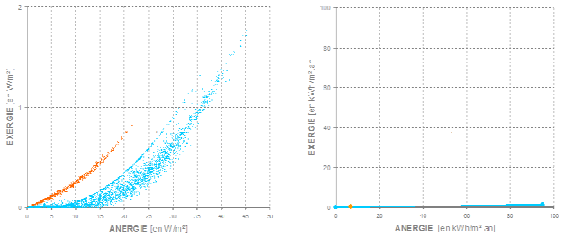
Exemple pour un logement à Lisbonne

Exergie froid 0,41%
Exergie chaud 2,27%



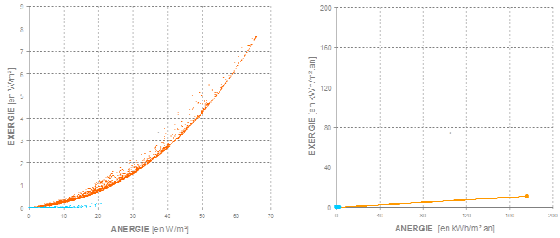
Exemple pour un logement à New Delhi

Exergie froid 1,38%
Exergie chaud 2,55%



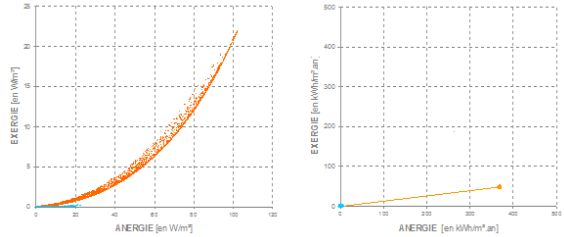
Exemple pour un logement à Moscou

Exergie froid 0,29%
Exergie chaud 5,75%



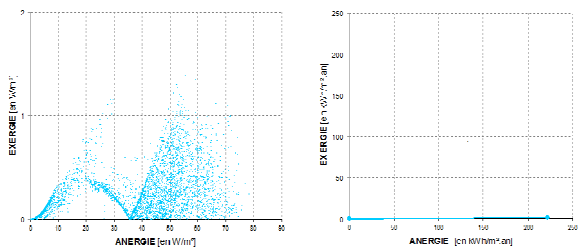
Exemple pour un logement à Yakoutsk

Exergie froid 0,32%
Exergie chaud 11,74%



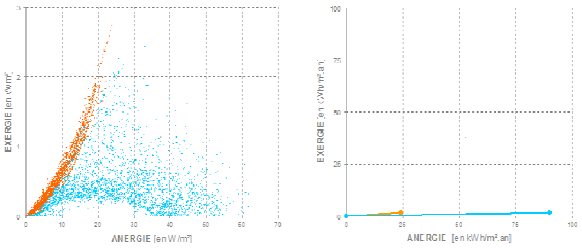
Exemple pour un bureau à Bombay

Exergie froid 0,72%
Exergie chaud _



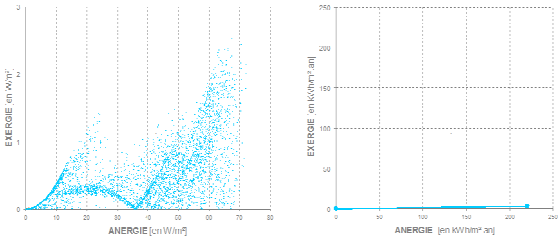
Exemple pour un bureau à Séoul

Exergie froid 1,64%
Exergie chaud 6,13%



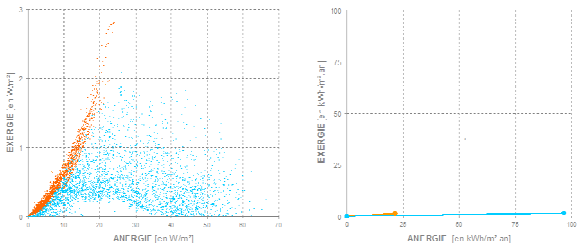
Exemple pour un bureau à Dubaï

Exergie froid 1,40%
Exergie chaud 2,51%



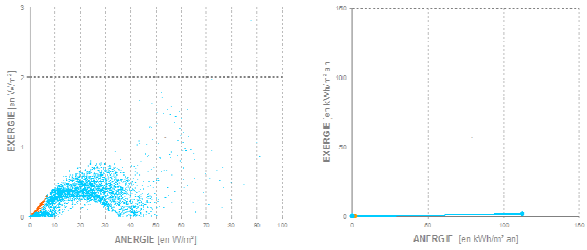
Exemple pour un bureau à New-York

Exergie froid 1,67%
Exergie chaud 5,94%



Exemple pour un bureau à Sydney

Exergie froid 1,43%
Exergie chaud 3,11%



Enseignements

Cette analyse permet d'évaluer les valeurs min-max de la demande exergique associée au contrôle climatique du bâti. Retenons :

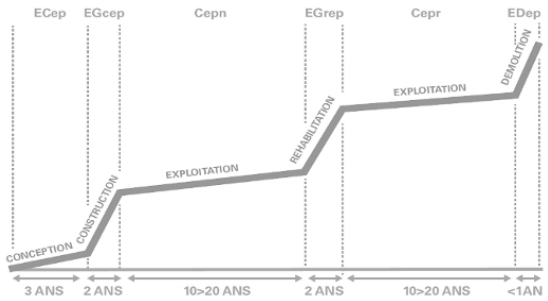
Pour les besoins en chauffage	<12%
Pour les besoins en rafraîchissement	<2%

Les matières transformées

Nous consommons aussi une énergie moins visible : celles des artefacts, des matières transformées et des produits de consommation. L'énergie nécessaire à la transformation de la matière pour la production d'objets, pour l'édification du bâti et es infrastructures est évidemment consolidée à l'échelle planétaire. Sur des partitions plus réduites, l'import-export de marchandises transfère de façon moins lisible de l'énergie *incorporée* d'une partition à une autre[128].

L'estimation relative à l'énergie incorporée fait l'objet d'un développement dédié dans notre recherche ; en particulier sur la méthodologie de la « démolition sélective ». Pour notre modèle (*d, e)*, nous considérons toutefois que cette *demande* est d'abord contrôlée par l'emprise individuelle dans le bâti et donc la variable *e*. Retenons également que la variable de contenant *h* peut aussi avoir un impact sur cette grandeur : monter plus haut coûte a priori davantage constructivement sans que la pérennité soit nécessairement augmentée.

L'énergie incorporée (ou énergie grise) représente une partie non négligeable de l'énergie totale employée pour habiter. Rappelons les ordres de grandeur suivant[129] : environ 1000 kWh_{EP} par m^2_{utile} pour un logement individuel, 1500 à 2000 pour un immeuble de bureaux et de l'ordre de 3000 à 4000 pour une tour. Face à l'objectif d'une consommation annuelle réglementaire de l'ordre de 50 kWh_{EP} pour une unité de surface sensiblement différente, on voit que cette « ordonnée à l'origine constructive » peut représenter jusqu'à une cinquantaine d'années d'usage.

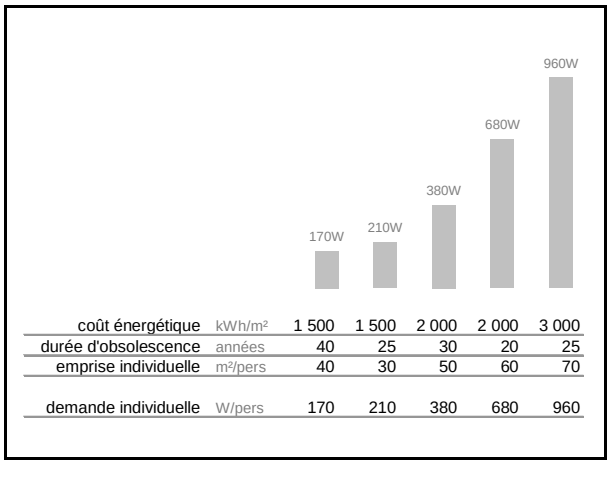


Représentation de la consommation en énergie primaire d'un bâtiment à différentes phases de son cycle de vie[130].

Exprimé en coût énergétique individuel, l'amortissement de cette énergie incorporée est alors fonction : des coûts énergétiques constructifs associées à l'édification, à la transformation et au maintient en usage du bâti ; de la durée d'obsolescence du bâti considéré ; et enfin de l'emprise d'usage individuelle.

Dans le tableau ci-dessous, nous indiquons une plage d'ordre de grandeur de la contribution de notre consommation de bâti sur la structuration de la demande individuelle.

Pour parvenir à limiter ce coût énergétique, il s'agit de jouer à la fois sur la densité d'usage et la bonne péréquation entre coût énergétique de la construction comparée à la durée de vie possible de ce mode constructif.



coût énergétique	kWh/m²	1 500	1 500	2 000	2 000	3 000
durée d'obsolescence	années	40	25	30	20	25
emprise individuelle	m²/pers	40	30	50	60	70
demande individuelle	W/pers	170	210	380	680	960

Quelques valeurs de demande individuelle associée à l'énergie incorporée.

[128] Pour plus d'informations sur cette question, se reporter à l'article de *P. Pourouchottamin, C. Barbier, L. Chancel, M. Colombier, Nouvelles représentations de l'énergie, Cahier du Club d'Ingénierie Prospective et Environnement, avril 2013*

[129] Sidler O., *Analyse de la consommation énergétique des tours*, Enertech, août 2008

[130] Guide d'interactions énergie-climat, enveloppes. Elioth, 2011

L'alimentation

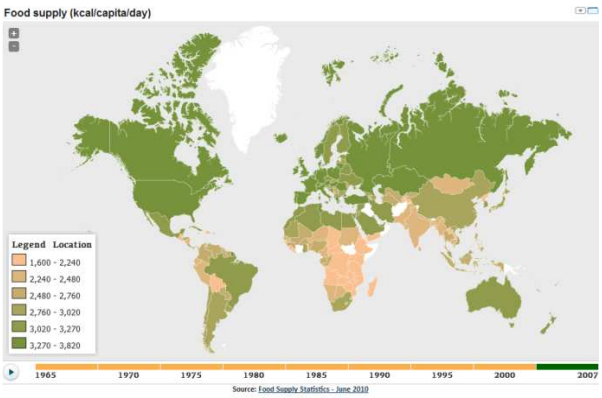
L'alimentation est l'énergie fondamentale du vivant. Dans le règne animal et plus spécifiquement chez l'homme contemporain, les besoins caloriques sont aujourd'hui fortement variables selon les géographies.

Retenons pour première valeur 2500kcal par jour et par personne : les besoins alimentaires correspondent à un flux intrants nets d'environ 120W.

Cependant, les énergies nécessaires en amont à nos « vecteurs secondaires nutritifs » -et qui correspondent à la globalité des coûts énergétiques nécessaires à la culture, à l'élevage, au conditionnement, au transport et au stockage- réclament une emprise globale primaire bien plus importantes.

La *Société à 2000W* évalue cette demande individuelle à environ 750W par personne[131] sous nos latitudes, mais elle comprend l'ensemble des coûts énergétiques en amont de la demande finale alimentaire (transport, transformation, logistique, stockage, …).

Nous considérerons que la demande en alimentation est d'abord un paramètre sociétal et culturel avant d'être modulé par les paramètres urbains (*d* et *e*) voire le climat.



Carte de la demande individuelle alimentaire (source : Food Supply Statistics, juin 2010, représenté sur knoema.com)

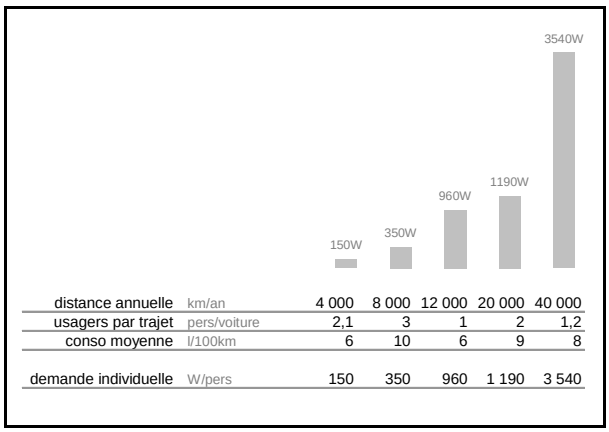
Les mobilités

Les demandes énergétiques nécessaires à nos mobilités sont aujourd'hui pour l'essentiel assurées par les combustibles fossiles (hormis pour les transports collectifs électrifiés). Retenons néanmoins que la demande utile de la mobilité correspond à de l'énergie motrice. Les frictions mécaniques et aérodynamiques engendrées par le mouvement réclament une force motrice pour être compensées et permettre le déplacement.

La demande utile de la mobilité correspond donc à un « très haut niveau exergique », comparable à celui fournit par l'électricité. A ce titre, rappelons que les moteurs thermiques sont uniquement exploités pour fournir une énergie mécanique avec la toise de rendement du cycle de Carnot. Nos voitures[132] sont des centrales de « filtrage » de l'exergie contenue dans les combustibles fossiles au même titre que nos centrales de production électrique.

La demande énergétique associée aux besoins de mobilité semble d'abord gouverné par la densité urbaine *d*. Nous évaluerons aussi cette demande selon sa qualité ultime nécessaire finale, à savoir de l'exergie pure.

Cette approche aura tendance à réduire la quantité nécessaire de près du tiers étant entendu que la plupart des déplacements contemporains sont assurés par des machines thermiques.



distance annuelle	km/an	4 000	8 000	12 000	20 000	40 000
usagers par trajet	pers/voiture	2,1	3	1	2	1,2
conso moyenne	l/100km	6	10	6	9	8
demande individuelle	W/pers	150	350	960	1 190	3 540

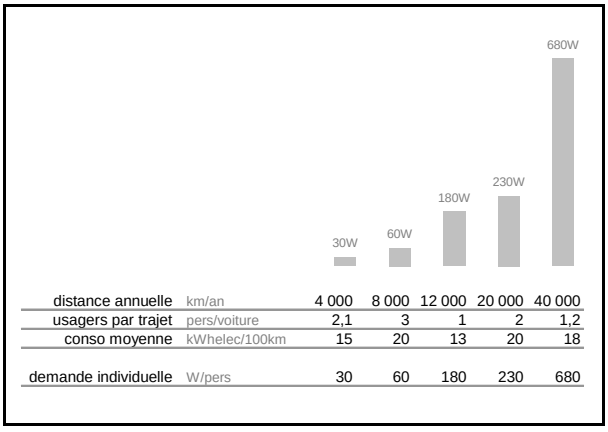
Une gamme d'estimations des besoins en mobilité automobile sur la base d'un parc thermique. Toutefois, la quantité pourrait largement être diminuée du fait de la qualité énergétique attendue de la demande de mobilité : 100% exergie.

[131] En énergie primaire.

[132] Mais évidemment aussi camions, bus, avions et certains transports ferroviaires.

Pour donner un exemple, une voiture électrique illustre assez bien la quantification de l'exergie nécessaire à des besoins individuels. Sur la base d'un ménage de trois personnes effectuant annuellement 20 000 kilomètres, la demande électrique globale du ménage est alors d'environ[133] 3 000kWh soit 1 000kWh par individu et donc un flux moyen d'environ 115W par personne (avec un taux d'exergie de 100%).

Pour un moteur thermique, le filtrage exergique moyen est de l'ordre de 20 à 25% : la demande énergétique individuelle serait alors de l'ordre de 500W par personne. Dans le cadre de la *Société à 2000W*, l'objectif visé est de 450W par personne (en partant de 1700W aujourd'hui).



distance annuelle	km/an	4 000	8 000	12 000	20 000	40 000
usagers par trajet	pers/voiture	2,1	3	1	2	1,2
conso moyenne	kWhelec/100km	15	20	13	20	18
demande individuelle	W/pers	30	60	180	230	680

La même gamme d'usage mais avec un parc électrique. La demande primaire est alors à hauteur teneur exergique. Le rapport de 1 à 5 entre les deux tableaux correspond peu ou prou à l'écart de rendement thermodynamique du moteur thermique dans un usage automobile (rendement moyen de l'ordre de 20%)

[133] Sur la base d'une consommation moyenne de 15kWh d'électricité pour effectuer 100 kilomètres.

Modèle pour la mobilité

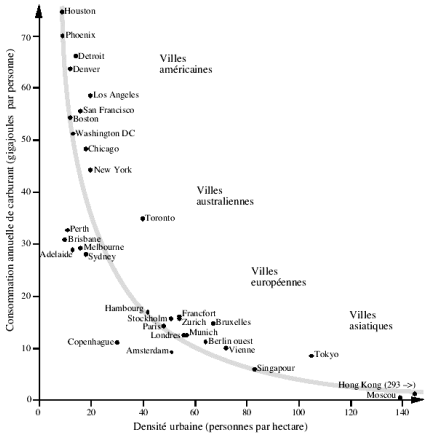
La dépendance en densité pour la voiture

Newman et Kenworthy en 1989

Il y a vingt ans, les chercheurs australiens Newman et Kenworthy[134] mettaient en évidence la relation entre densité urbaine[135] et consommation d'énergie due à l'usage individuelle de l'automobile. Issue de relevés dans les grandes métropoles mondiales, cette corrélation révélait qu'à densité croissante, la consommation de carburant se réduisait.

Ce très net comportement asymptotique[136] a été largement popularisé depuis une trentaine d'années ; cette *courbe-logo* vaut en général comme slogan introductif des atouts écologiques, sinon énergétiques de la ville compacte. En miroir, cette étude quantifiait une composante du ravage automobile associé à l'étalement urbain. Fouchier a poursuivi ce travail à l'échelle de l'Ile de France dans son ouvrage[137] en prenant pour référence plusieurs villes nouvelles.

Au-delà du travail sur la définition rigoureuse de contenant et contenu urbain de Fouchier[138], la corrélation francilienne révélait un comportement identique à celui exhibé plusieurs années auparavant, par les chercheurs australiens.



Source : Kenworthy et Newman, 1989. Densité nette de population en abscisse et consommation d'énergie en ordonnée

Densité et cake aux raisins

Pour vulgariser l'inflation cosmique *post Big Bang*, les astrophysiciens emploient fréquemment l'image du pudding[139] (ou du cake aux raisins) : galaxies et objets stellaires s'éloignent finalement comme les raisins emportés par le gonflement du gâteau au cours de sa cuisson. Il en va de même avec la densité urbaine[140] : plus la ville est lâche, plus la distance moyenne me séparant de mes *congénères-raisins* augmente.

Première loi

Soit a , cette distance caractéristique : elle correspond à la longueur du côté du carré si l'espace était redistribué de façon équivalente entre tous ses usagers en cellule de territoire identique. On établit trivialement que :

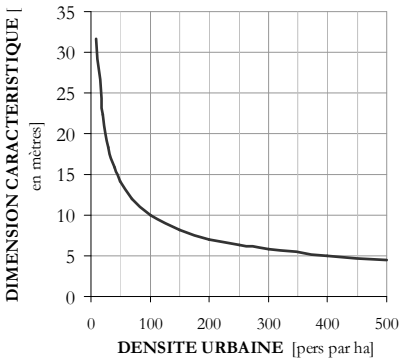
$$a \equiv \frac{100}{\sqrt{d}}$$

Et a est alors exprimé en mètres. Si la densité d'activité est de 100 personnes par hectare, la distance caractéristique me séparant de mon citoyen-mitoyen est alors de 10 mètres[141].

Ebauche de loi-puissance

Cette distance caractéristique séparant deux individus (ou deux usages de la ville) semble donc à même de fournir l'échelle caractéristique de tout déplacement et donc la somme temporelle de ces déplacements individuels. Selon ce raisonnement, il n'est donc pas absurde de supposer que : $\alpha \approx -.5$

Cette approche fait également fi de la non-invariance d'échelle de la ville et plus spécifiquement de ces réseaux de transport (et des conséquences sur les choix modaux)[142]



Relation entre densité urbaine et distance moyenne entre habitants

[134] Newman, P. and Kenworthy, J. , *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook*, Brookfield, Gower Publishing, 1989
[135] Nombre d'habitants et d'emplois rapporté à la surface nette urbaine.
[136] Egalement sur comportement des distances parcourus en transport commun, Vincent Fouchier
[137] Vincent Fouchier, Les densités urbaines et le développement durable, le cas de l'Ile-de-France et des villes nouvelles, Edition du SGVN, décembre 1997
[138] Il conviendra notamment d'appliquer la rigueur de ses définitions dans l'appréciation des productibles urbains.

[139] Stephen Hawking dans *Une brève histoire du temps*, 1988
[140] Il s'agit dans cette approche de densité brute plutôt que de densité nette.
[141] En faisant « descendre » tous les habitants de leurs étages !
[142] On pourra regarder les travaux de Serge Salut sur cette question.

Expression des besoins en distance

Dans leur article de 1995, Newman et Kenworthy palliaient cette difficulté, pour mettre en évidence la distance parcourue en moyenne par les usagers. La loi-puissance de corrélation était alors la suivante :

$$L(d) \equiv L\left(d/d_0\right)^{\alpha} \equiv 105866 d^{-0,6612}$$

Avec $\alpha \equiv -0,6612$, cet exposant n'est pas très éloigné du coefficient théorique de -0,5 évalué dans la partie précédente[143]..

Extrapolation de l'article de 1995

On définit alors la densité d_0, telle que $L(d_0)$ corresponde à une distance annuelle de 10000km. On a :

$$\begin{cases} d_0 \equiv 36 \text{ pers/ha} \\ L(d) \equiv 10000\left(d/36\right)^{-0,6612} \end{cases}$$

Pour cette densité d_0, la maille a_0 est alors :

$$a_0 \equiv \frac{100}{\sqrt{d_0}} \sim 17 \text{ mètres}$$

En reprenant la corrélation théorique, on en déduit[144] :

$$L \approx 10000.\sqrt{\frac{d_0}{d}} \equiv 10000.\frac{a}{a_0} \approx 6.10^5.a$$

Ainsi la distance moyenne caractéristique parcourue annuelle est de l'ordre de 600 000 fois la cellule caractéristique d'occupation du territoire.

Rapporté à la journée, ce coefficient d'échelle est alors d'environ 1 600 : cela correspond à un parcours quotidien effectuant le tour d'un carré de 400 par 400 cellules ou un aller-retour visitant 800 cellules.

Conclusion pour le modèle de mobilité

Dans la suite de l'étude, on se basera alors sur la loi-puissance dans la définition de la distance moyenne annuelle parcourue. Dans un souci de simplification, si l'on suppose :

$$\varepsilon^{MOB} \approx K\mu^{-\frac{2}{3}} \equiv L.c.\left(\frac{d_0}{d}\right)^{\frac{2}{3}} \equiv 10000.c.\left(\frac{36}{d}\right)^{\frac{2}{3}}$$

[143] On pourrait notamment une dimension fractale virtuelle associée à l'usage des voiries automobiles : elle serait alors de l'ordre de 1,32 (corrélation entre L et a)

[144] En « forçant » l'exposant α à -0,5.

Le modèle (d,e) de la demande

Choix des variables intensives

L'ambition de la *Formalisation* consiste à proposer des modèles de description de l'*offre* et de la *demande* selon les quatre variables de l'urbain prédéfinis. Selon le formalisme décrit plus amplement en annexe, il s'agit de caractériser de définir une fonction *h* telle que :

$$\langle k \,|\, \underline{D} \rangle \approx \underline{h}(e,d)$$

Expression de la demande individuelle

Suite aux hypothèses et aux descriptions précédents, nous tacherons de quantifier la demande individuelle finale avec la formule :

$$\langle k \,|\, \underline{D} \rangle \approx \underline{D_1} + \underline{D_2}.e + \underline{D_3}.d^{-0,66}$$

Avec :

$\underline{D_1}$

Ce terme recouvre les besoins constants individuels et sera fonction de la situation culturelle, sociologique et technologique. Cela comprend notamment les besoins électriques spécifiques à l'échelle du bâti (pour l'informatique, la cuisson, la conservation des aliments, etc.), la part de mobilité indépendante (ou faiblement dépendante) de la densité, les besoins en alimentation, mais également besoins en eau chaude sanitaire. Une partie de l'énergie incorporée –indépendante de la surface d'emprise bâtie individuelle – peut également être intégré dans ce coefficient. Ce terme recouvre aussi sans aucun doute une expression du pouvoir d'achat. Ce sera d'ailleurs sur cette hypothèse que la cartographie de la *demande* nationale sera effectuée au terme des *Métamorphoses*.

$\underline{D_2}$

Cette demande est étroitement associée aux besoins principaux du bâti : contrôle climatique, besoins de ventilation, besoins d'éclairage artificiel mais également amortissement de l'énergie incorporée (tant immobilière que mobilière). Le contenu qualitatif (au sens du taux d'exergie) sera alors fonction de l'efficacité du bâti mais également de sa situation climatique

$\underline{D_3}$

Le besoin en mobilité correspond essentiellement à de l'exergie pure. Le coefficient pourra être fonction des données de niveau de vie notamment, de la caractérisation de l'efficacité énergétique du moyen de mobilité comme de l'intensité de son usage (nombre de personnes transportées en moyenne).

Expression de la densité de demande

Rapportée en densité spatiale de demande (exprimée par exemple en W/m²), la relation s'écrira alors :

$$d.\langle k|\underline{D}\rangle \approx \underline{D_1}.d + \underline{D_2}.e.d + \underline{D_3}.d^{0,33}$$

Demande énergétique (en W/m²)		
d	Densité urbaine	1. Consommation globale : alimentation, besoins de chaud et de froid, biens et services[145], mobilité, etc. 2. Impacts[146] sur la consommation associée aux mobilités 3. Impacts sur la consommation de biens courants[147]
e	Emprise dans le bâti par individu	1. Consommations associées à l'exploitation des bâtiments 2. Consommations associées à la construction et la maintenance des bâtiments 3. Impact sur les consommations globales en tant qu'indicateur de niveau de vie
c	[illegible]	1. Consommations associées à l'exploitation des infrastructures 2. Consommations associées à la construction et la maintenance des infrastructures
h	[illegible]	1. Effets de deuxième ordre sur les consommations associées à la construction et la maintenance des bâtiments 2. Effets de deuxième ordre sur les consommations associées à l'exploitation des bâtiments

Quelques scénarios (d,e)

Sur la base de ce modèle, nous allons décrire dans les pages qui suivent quatre scénarios distincts permettant d'évaluer la sensibilité :

- De la demande individuelle
- De la qualité de la demande énergétique finale
- De la densité de demande

Pour un couple de variable (d,e) donnée. Nous indiquerons à chaque fois pour mémoire la valeur de densité bâtie moyenne correspondante.

[145] Consommation d'énergie incorporée liée à la durée de vie des biens de consommation courant. Consommation également d'électricité spécifique pour les besoins de communication par exemple.
[146] Rapporté dans ce cas à la consommation à la personne. Pensons en particulier à la fameuse courbe de Newman et Kenworthy liant densité urbaine et consommation de carburant associée à l'usage de la voiture. Cette question est d'ailleurs abordée dans la section suivante.
[147] Effet sociologique et usages engendrés par des effets de densité. Exemple : taux de motorisation décroissant en fonction de la densité et effet induit sur la consommation d'énergie incorporée.

Scénario 1, situation française contemporaine

Les hypothèses d'équipements et les spécifications sont rappelées dans le tableau ci-dessous. La demande maximale atteint 6700W par individu pour une faible densité (20 personnes par hectare) et une très forte dilution de l'usage dans le bâti (90m² par individu).

Réciproquement, à haute densité (250 personnes par hectare) et donc une situation de très forte contrainte sur la somme des usages bâti (logement, travail et usage des équipements communs) à 30m² par individu, la demande descend alors 2300W par personne, toute chose étant égale par ailleurs. On notera que pour une emprise nominale[148] de 60m² par personne, la densité porte un écart relatif de 2000W. A iso-densité, on remarquera l'impact très important de l'emprise bâtie individuelle.

Pour ce scénario, il apparaît qu'avec des paramètres d'équipement standards (tant pour le bâti que pour l'automobilité), la densité de demande – sur cette fraction du périmètre globale – peut atteindre plus 70W/m² lorsque l'emprise d'usage dans le bâti devient importante et que la densité est élevée. Cette densité de demande devient alors comparable au gisement solaire horizontale (rappelons-nous en moyenne de 170W/m²) sur la surface du monde.

A cette intensité de la demande, il devient alors difficile d'espérer une autonomie énergétique du territoire considéré : il réclamerait en effet un rendement moyen de conversion d'environ 30%. Nous noterons qu'en moyenne la *qualité* de la demande énergétique n'est pas très élevée et de l'ordre de 15% : sans doute du fait du poids de la demande de chauffage et d'un parc automobile essentiellement thermique.

Hypothèses (avec taux d'exergie en %)

bâti

chauffage ou froid	250 kWh/m².an	3%
ECS	15 kWh/j.pers	15%
électricité spécifique*	1500 kWh/pers.an	100%

* sommes des demandes pour le résidentiel, le tertiaire et le commerce

alimentation

alimentation	500 W/pers	15%

automobilité

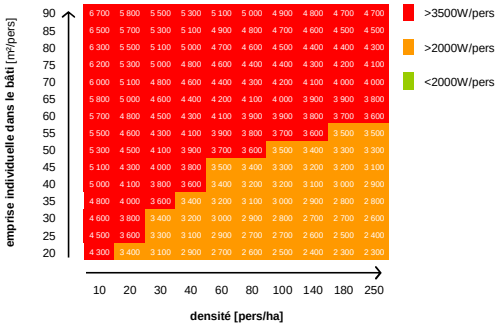
parc thermique	@ 99%	7,5 l/100km	20%
parc électrique	@ 1%	15 kWh/100km	100%

énergie incorporée bâti

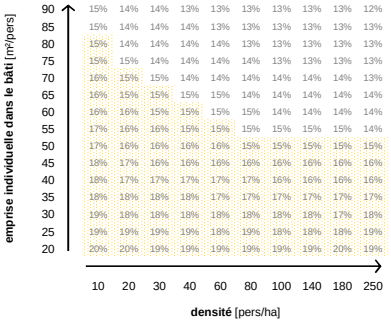
énergie incorporée	1500 kWh/m²	20%
obsolescence bâti	30 années	

Résultats à l'échelle individuelle | diagrammes (*d,e*)

Demande énergétique par personne [W/pers]

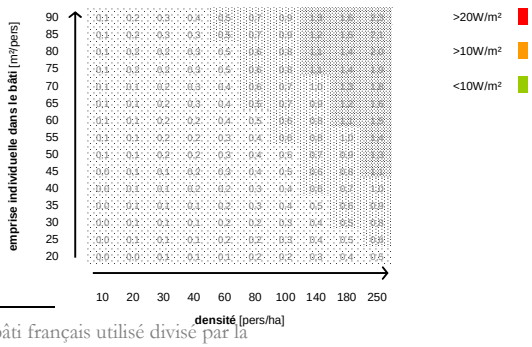


Taux d'exergie [%]

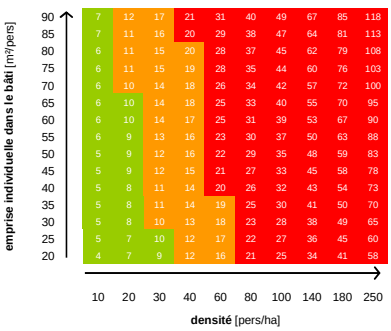


Résultats en espace pour les territoires | diagrammes (*d,e*)

Densité bâtie



Densité de demande énergétique [W/m²]



[148] Correspondant à la somme du parc bâti français utilisé divisé par la population.

Scénario 2, transition énergétique légère

Par rapport au scénario précédent (scénario 1), on considère ici que l'efficacité du parc bâti a sensiblement évolué (~ -20% de demande spécifique) ; les usages électriques spécifiques ont aussi légèrement diminué tandis que le parc automobile est devenu en moyenne légèrement plus efficace : la consommation moyenne est passé de 7,5 litres à 6,5 litres aux 100 kilomètres.

Dans ce cas de figure, la demande maximale est réduite d'environ 1kW par rapport au scénario précédent. La sensibilité à la densité a également diminué puisque l'écart est passé de 2kW à environ 1,5kW sur toutes les lignes du tableau entre la densité minimale de 10 pers/ha jusqu'à la valeur maximale de 250 pers/ha.

On retiendra par exemple que pour le couple (*d,e*)=(200,60), soit peu ou prou les paramètres parisiens contemporains, la *demande* serait alors d'environ 3000W par personne tandis que la densité de demande serait alors de près de 60W/m².

On remarquera enfin que la qualité de la demande énergétique a peu varié : elle reste comprise entre 15 et 20% en fonction principalement de l'emprise individuelle dans le bâti.

Hypothèses (avec taux d'exergie en %)

bâti

chauffage ou froid	200 kWh/m².an	3%
ECS	10 kWh/j.pers	15%
électricité spécifique*	1300 kWh/pers.an	100%

* sommes des demandes pour le résidentiel, le tertiare et le commerce

alimentation

alimentation	500 W/pers	15%

automobilité

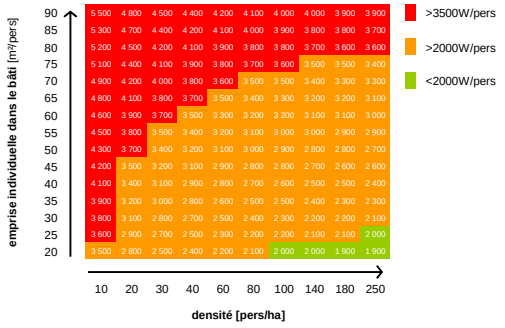
parc thermique	@ 90%	6,5 l/100km		20%
parc électrique	@ 10%	15 kWh/100km		100%

énergie incorporée bâti

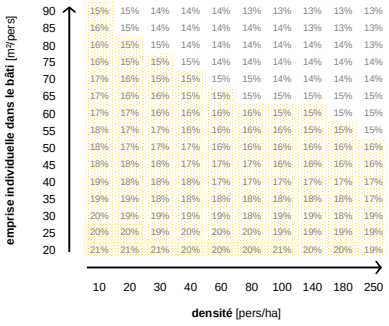
énergie incorporée	1500 kWh/m²	20%
obsolescence bâti	30 années	

Résultats à l'échelle individuelle | diagrammes (*d,e*)

Demande énergétique par personne [W/pers]

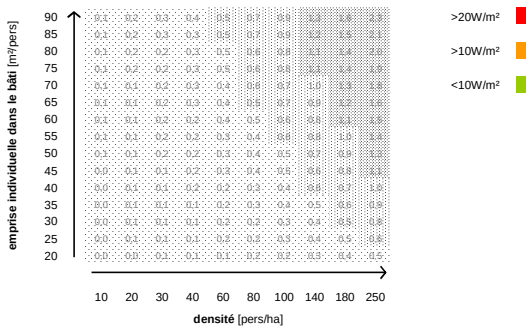


Taux d'exergie [%]

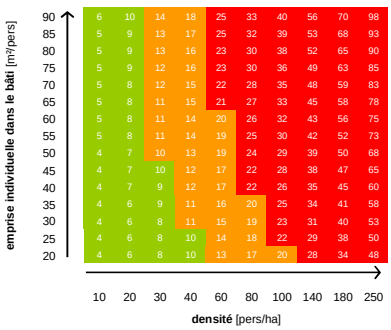


Résultats en espace pour les territoires | diagrammes (*d,e*)

Densité bâtie



Densité de demande énergétique [W/m²]



Scénario 3, réhabilitation importante et mobilité électrique

Ce scénario présente une version augmentée des paramètres d'efficacité et de sobriété déjà enclenchés dans le scénario 2 : la demande de chauffage dans le bâti a diminué et est passée en moyenne à 150kWh/m².an. 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.

Les démarches de sobriété ont emboîté le pas : la demande en électricité spécifique a diminué sur l'ensemble des besoins bâtis[149] ; la demande primaire associée aux besoins alimentaires a également partiellement réduite.

Dans ce scénario, et pour une densité urbaine importante et à haute densité d'usage dans le bâti, il semble possible de contenir la demande individuelle autour de 2000W.

Mais de façon corollaire, les horizons de territoire autonome en énergie semble être davantage l'apanage de densités urbaines inférieures à 30 personnes par hectare (densité de demande inférieure à 10W/m²). Et dans ce cas de figure, la densité bâtie serait alors au maximum de l'ordre de 0,2.

Hypothèses (avec taux d'exergie en %)

bâti

chauffage ou froid	150 kWh/m².an	3%
ECS	10 kWh/j.pers	15%
électricité spécifique*	1000 kWh/pers.an	100%

* sommes des demandes pour le résidentiel, le tertiaire et le commerce

alimentation

alimentation	400 W/pers	15%

automobilité

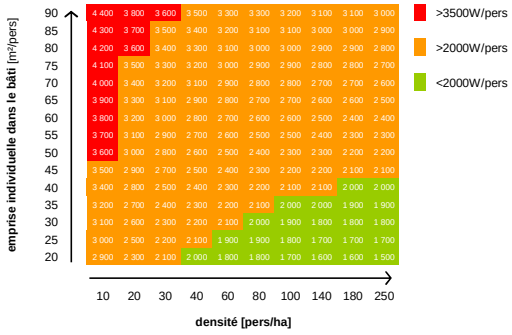
parc thermique	@ 80%	6 l/100km	20%
parc électrique	@ 20%	15 kWh/100km	100%

énergie incorporée bâti

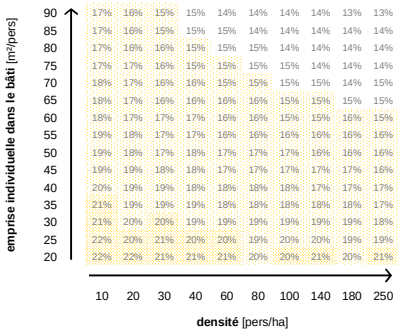
énergie incorporée	1500 kWh/m²	20%
obsolescence bâti	40 années	

Résultats à l'échelle individuelle | diagrammes (*d,e*)

Demande énergétique par personne [W/pers]

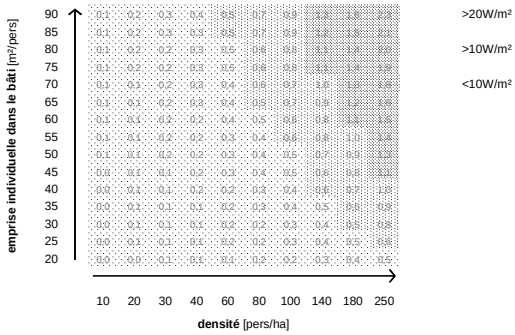


Taux d'exergie [%]

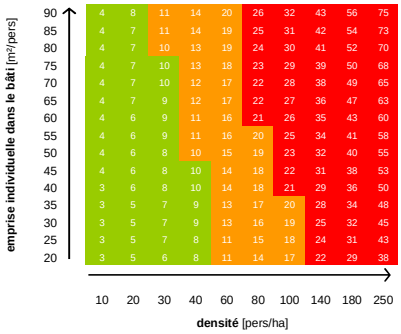


Résultats en espace pour les territoires | diagrammes (*d,e*)

Densité bâtie



Densité de demande énergétique [W/m²]



[149] Comprenant le logement, le tertiaire, commerces et équipements publics.

Scénario 4, écoterritoire

Pour cet ultime scénario, la voiture thermique a été substituée par un véhicule électrique. De façon quantitative, la demande globale diminue, quelque soit la situation sur la carte (*d,e*) de la demande.

Néanmoins, la demande individuelle exergique serait somme toute similaire : l'électricité a troqué de la quantité contre de la qualité. En norme sur l'espace anergie-exergie, les quantités sont plus modérées et la dépendance à la densité est moins forte. La quasi-totalité de l'espace (*d,e*) produit une demande inférieure à 2000W par personne.

La densité de demande est inférieure à 10W/m² pour une grande part des situations lorsque la densité urbaine reste inférieure à 60 personnes à l'hectare. Pour 30pers/ha, la densité de demande devient même inférieure à 5W/m² ; il devient alors possible et crédible d'assurer une autonomie énergétique dans ce site de situation : la suite de la *Formalisation* décrira les conditions techniques de faisabilité.

Hypothèses (avec taux d'exergie en %)

bâti

chauffage ou froid	70 kWh/m².an	3%
ECS	5 kWh/j.pers	15%
électricité spécifique*	800 kWh/pers.an	100%

* sommes des demandes pour le résidentiel, le tertiare et le commerce

alimentation

alimentation	300 W/pers	15%

automobilité

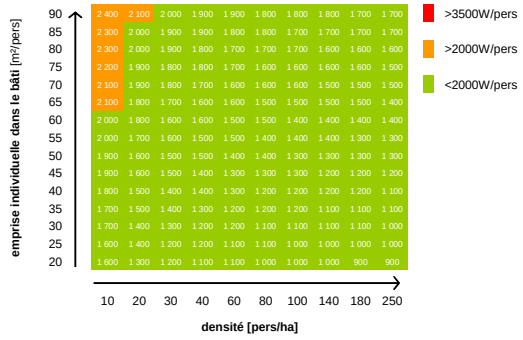
parc thermique	@ 30%	5 l/100km	20%
parc électrique	@ 70%	15 kWh/100km	100%

énergie incorporée bâti

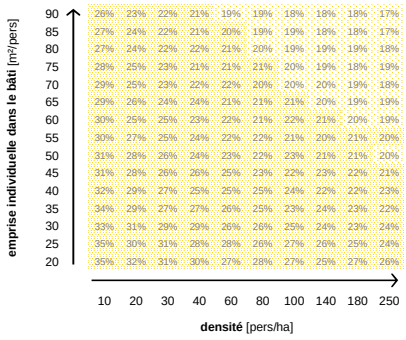
énergie incorporée	1500 kWh/m²	20%
obsolescence bâti	50 années	

Résultats à l'échelle individuelle | diagrammes (*d,e*)

Demande énergétique par personne [W/pers]

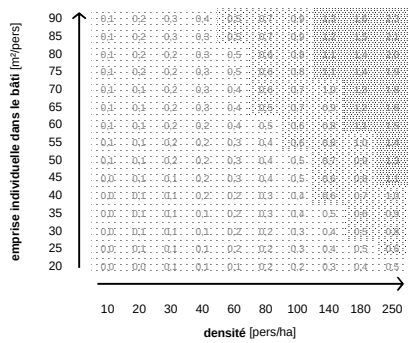


Taux d'exergie [%]

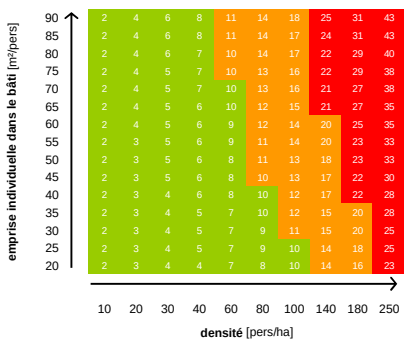


Résultats en espace pour les territoires | diagrammes (*d,e*)

Densité bâtie



Densité de demande énergétique [W/m²]



Mesurer le stock

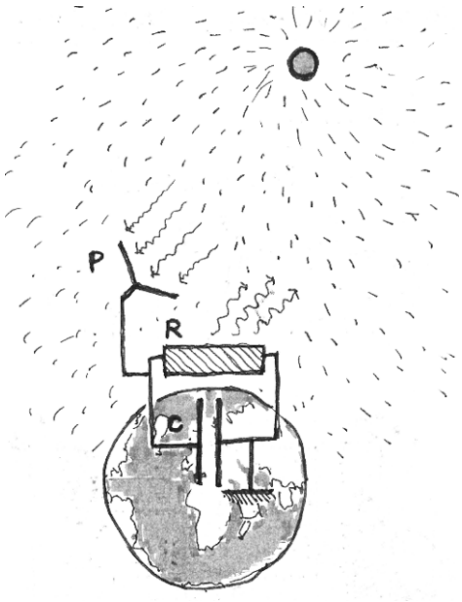
Introduction

Dans cette partie, nous aborderons les différentes formes de réserve énergétique en fonction à la fois des vecteurs comme des pas de temps caractéristique de sollicitations. En tout premier lieu, et dans la filiation *offre*, *stock* et *demande*, trilogie de cette recherche, les *stocks* ont été implicitement associés à l'utilisation des *énergies fossiles et fissiles*.

De fait, *Reforme* détaille et explicite les conditions de convergence entre *offre* et *demande* lorsque le capital solaire acquis et stocké depuis des millions d'années aura été dilapidé en l'espace de quelques siècles.

Cette partie donne néanmoins l'occasion de distinguer trois natures de stocks différentes :

1. Ceux de *long terme*, comme précités ;
2. Ceux de *court et moyen terme* convoquant des périodicités de charge-décharge comprise entre la seconde et quelques années ;
3. Les *stocks incorporés* dont les conditions de réversibilité d'usage sont bien plus incertaines que nos vecteurs traditionnels.
4.



Notre Spaceship Earth comme un circuit R-C. A l'instar d'un circuit électrique, la résistance 'R' matérialise la consommation (perte par effet Joules), le condensateur 'C' le stock énergétique de long terme disponible et le soleil est le générateur permanent 'P'. On emploie le terme de « régime permanent » lorsque la charge du condensateur reste constante au cours du temps.

Stocks de long terme

Les stocks de long terme dans l'arborescence

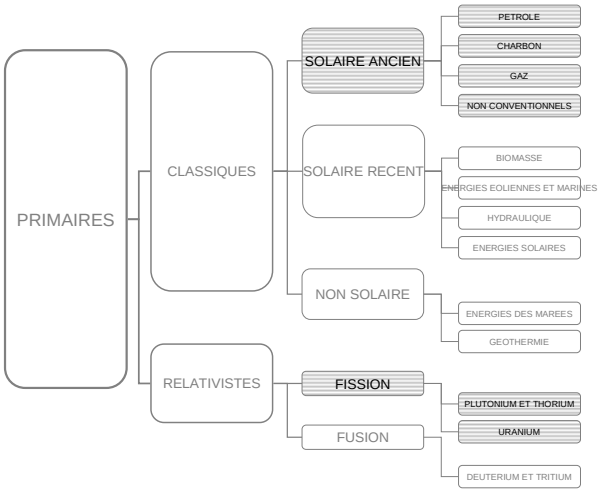
L'arborescence ci-dessous décrit une classification des différentes énergies primaires disponibles sur Terre. Les *stocks* correspondent aux ressources hachurées dans le diagramme.

Les *stocks de long terme* correspondent aux différentes formes de *solaire ancien* issues il y a plusieurs millions d'années de la photosynthèse et comprenant :

- Le pétrole,
- Le charbon,
- Le gaz,
- Et les hydrocarbures non conventionnels.

Les *stocks de longs termes exploités* comportent également les matières fissibles disponibles après extraction et transformation des minerais.

Concernant les *stocks* qui pourraient être exploités pour la *fusion*, le tritium[150] contenu en très petite quantité dans l'eau de mer fournirait néanmoins un *stock primaire potentiel* de très long terme en comparaison avec les demandes énergétiques de l'humanité.



Typologie des énergies primaires et stock de long terme en grisé

[150] Un isotope de l'hydrogène.

Les combustibles fossiles

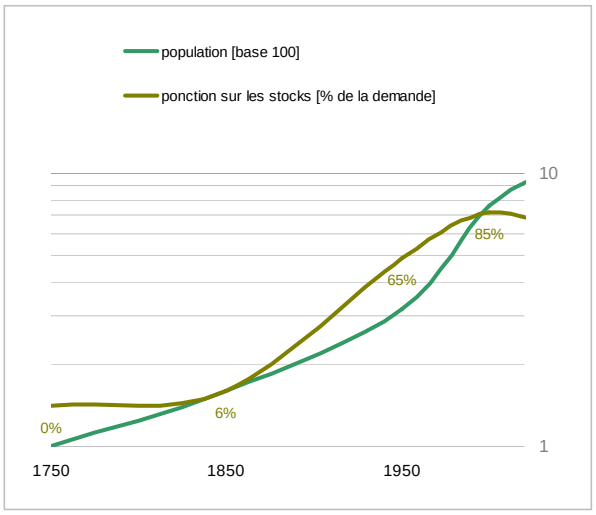
Les combustibles fossiles dont les hydrocarbures (charbon, gaz et dérivés du pétrole) restent les sources d'énergies primaires prédominantes dans le maintien des activités anthropiques (chauffage, mobilités, production,..) et jouent un rôle majoritaire dans la contribution au dérèglement climatique. Nous renvoyons le lecteur à la bibliographie pour une documentation plus large sur les problématiques de pic de production et les prospectives de déplétion pour le pétrole, le gaz et le charbon.

Leur vitesse d'épuisement à court terme et la rationalisation de leur usage représente l'un des défis majeurs de ce siècle pour garantir l'équilibre planétaire et la survie des hommes.

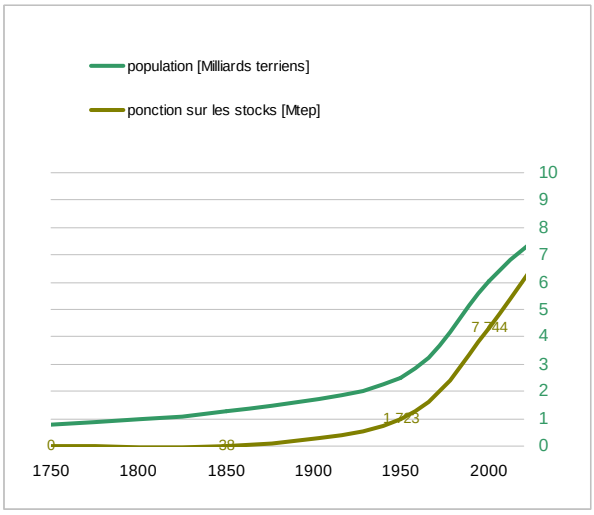
Les combustibles nucléaires

Le combustible nucléaire et plus précisément sa fission reste la source possédant la plus forte densité énergétique connue à ce jour.[151]

Sa faible participation au dérèglement climatique est bien évidemment à mettre en perspective avec les problématiques liées à l'épuisement des ressources, les risques technologiques (liée à l'irréversibilité du processus radioactif) ainsi que le stockage de ces « effluents ». Son usage à long terme est fortement remis en cause depuis de récents évènements.



La croissance démographie mondiale (en relatif par rapport à la population terrestre en 1750) comparée à la croissance continue de la ponction sur les stocks fossiles (en pourcentage de la demande mondiale d'énergie)



La démographie mondiale comparée aux ponctions annuelles dans les stocks à longue durée de vie d'énergie (fossiles et fissiles, en millions de tonnes-équivalent-pétrole par an). Une similitude entre ces deux évolutions : quelle causalité ?

[151] En absence de maitrise des technologies de fusion nucléaire

Stocks de court et moyen terme

La synchronisation de l'offre et de la demande

La terminologie du *stock* se réfère de façon implicite aux ressources et réserves de long terme. Gardons néanmoins à l'esprit de promouvoir aussi le développement de stock à plus petite échelle pour emmagasiner l'*offre*. Les énergies renouvelables sont pour la plupart intermittentes : l'*offre* invoque donc la « quantité-tampon d'énergie » permettant d'assurer une disponibilité énergétique dans un *certain voisinage de temps et d'espace.*

Concernant par exemple l'offre solaire directe, notamment via le solaire thermique ou le solaire photovoltaïque, rappelons-nous le déphasage entre la courbe de production quotidienne comparée à la courbe de demande pour le logement. Un certain nombre de solutions tant du point de vue de la modulation de la demande, que pour le stockage de l'offre –sur un pas de temps de trois à six heures – reste à implémenter. Notons qu'il n'en sera pas nécessairement de même pour des bâtiments tertiaires par exemple.

Au-delà l'adéquation offre-demande, la problématique de la robustesse d'approvisionnement et de la résilience énergétique pose question. A titre d'illustration, retenons qu'aujourd'hui et à l'échelle de nos logis, nos réserves domestiques sont très faibles. Pour la chaleur, notre ballon d'eau chaude, lorsque nous en possédons un ; pour le froid, l'inertie stockée dans notre réfrigérateur ; pour l'électricité les quelques wattheures stockées dans nos portables. Quelques heures d'autonomie tout au plus. En dernier recours, nous pourrons brûler nos livres et la table de la salle à manger pour subvenir à des besoins ultimes de chaleur…Notre robustesse d'approvisionnement est donc inexistante. Nous consommons en flux tendu. Nous verrons comment dans les *Métamorphoses,* les *Infrastructures Solaires Urbaines* tachent de proposer des éléments de réponse.

Des espaces de stockage dans l'espace rural en Afrique du Sud (photo R.Ménard)

Typologie rapide des stocks par vecteur

Biomasse

Pour les céréales et l'ensemble de nos comestibles, voici quelques lieux et objets assurant un volume-tampon énergétique : les silos, les mobiliers et objets dédiés à la conservation des aliments, etc.

Notons que certains de ces stocks sont passifs : ils ne réclament a priori pas d'intrants énergétiques extérieurs pour assurer leur fonction de conservation (ce qui n'est pas le cas d'un réfrigérateur ou d'une chambre froide par exemple).

Electricité

Voici quelques manières de stocker le vecteur-roi de nos vies contemporaines : électrochimique pour les piles, batteries, piles à hydrogène, … mais sur des pas de temps assez courts. Par l'hydroélectricité par les barrages notamment en produisant ensuite l'électricité par le travail des forces de pesanteur. On peut également stocker de l'électricité par pompage-turbinage, en remontant de l'eau dans les barrages. Le rendement global reste intéressant mais ce type de stock opère plutôt sur de grands volumes d'énergie. Par volant d'inertie en stockant de l'énergie mécanique par la rotation à très haute vitesse d'un disque.

Chaleur et froid

La chaleur à basse température reste sans doute la forme la plus simple et la moins coûteuse de stockage d'énergie. Retenons qu'un mètre-cube d'eau chauffé à 50°C contient environ 50kWh d'énergie. A plus basse température encore, le bâtiment peut constituer également un lieu intéressant de stockage thermique : il est alors inerte et sa mise en œuvre constructive –notamment par une certaine massivité interne- lui confère une « mémoire thermique ».

Sur des échelles de temps plus importantes, le sol constitue également un stock thermique intéressant utilisée notamment par la géothermie, les puits canadiens etc.

A haute température (supérieure à 250°C), les sels fondus peuvent présenter des propriétés intéressantes notamment lorsque conjugués à des technologies de solaire thermodynamique (voir après).

Enfin, pour le froid, en plus des dispositifs précités, le stockage par glace peut parfois être utilisé tant pour les réseaux de froid que associé à des productions importantes pour de grands bâtiments (tours, hôpitaux))

Stocks incorporés

Introduction

« Quod non fecerunt Barbari, Barbarini fecerunt.»[152]

Ce travail s'inscrit dans le projet *Reforme*, son objectif est l'organisation des recherches pour le développement de l'axe *Formalisation* du projet, en particulier pour ce qui concerne l'étude des enjeux liés à l'énergie incorporée.

Le travail se compose des parties suivantes :

- La définition d'énergie incorporée et le concept associé d'énergie libre incorporée.
- Les sources d'énergie incorporée dans les bâtiments existants et les filières pour leurs exploitations.
- Le bilan et les opportunités liés à ces exploitations, à l'échelle locale ou territoriale.
- Le cadre règlementaire envisageable et les corps de métier.
- La construction avec des parties réemployées et la construction pour le réemploi des ses parties.

Au-delà des questions techniques qui seront abordées, ce travail s'adresse aux architectes pour proposer une pensée architecturale sachant incorporer le réemploi dans sa propre nature.

Markus Kayser est designer diplômé du Royal College of Art de Londres. Il crée en 2001 sa première machine solaire, « the Sun Cutter », une « découpe laser » low-technologie. en 2011, il crée une imprimante 3d, « Solar Sinter », qui fabrique des objets en verre avec comme seule énergie le soleil et comme matière le sable.

[152] La phrase est citée pour souligner, à l'envers que dans son usage traditionnel, un événement positif de l'histoire de Rome, lorsque (1627) Urban VIII Barberini autorisa Gian Lorenzo Bernini à la substi- tution avec des poutres en bois des poutres en bronze du porche du Panthéon afin de les fondre pour réaliser le nouveau baldaquin de St Pierre : un exemple de recyclage qui, le bronze étant autrement indisponible, a permis la construction d'une œuvre magnifique.

Ontologie de l'énergie incorporée

L'énergie incorporée dans une construction est, intuitivement, l'énergie qui a été employée pour sa réalisation : extraction et transformation des matières premières, transports, fabrications et assemblages, conception et services.

Une fois réalisé, et indépendamment de l'énergie demandée par son exploitation quotidienne, le bâtiment nécessite d'énergie pour son entretien et pour des éventuelles rép&- rations (ce qui comporte encore des extractions, transformations, etc.).

A la fin de sa vie utile, il faut de l'énergie pour la démolition du bâtiment (désassemblages, transports, actions de valorisations, conception et services).

On nomme alors parfois énergie incorporée la différence entre l'énergie demandée par tous les matériaux qui composent le bâtiment, de l'extraction à la fin de leur vie en tenant compte de toute opération et service, et l'énergie obtenue par leur valorisation à fin de vie.

Dans cette définition, la vie d'un élément de construction est vue comme un parcours, orienté par le temps, caractérisé par le passage par une phase utile qui coïncide avec la vie du bâtiment.

La relation implicite d'unicité du rapport élément de construction–bâtiment (questionnée par ce travail) implique l'inférence de la règle :

énergie incorporée dans un bâtiment
=
somme des énergies incorporées dans ses éléments
&
énergie incorporée dans un élément
=
énergie nécessaire pour que cet élément soit présent dans le bâtiment qui est à la base des analyses des cycles de vie.

Cette définition pose néanmoins des problèmes opérationnels lorsque l'analyse doit être étendue sur des intervalles de temps dans lesquels des évolutions technologiques non négligeables ont eu lieu, ce qui est de plus en plus le cas compte tenu de la vitesse de ces dernières.

Prenons l'exemple de la contribution apportée à l'énergie incorporée dans un bâtiment des années 1950 par un poteau en béton armé. Les matériaux ont été élaborés et transportés avec les moyens de l'époque, plus consommateurs que ceux d'aujourd'hui ; le corage a été réalisé d'une manière totalement différente ; la partie de travail réalisé par la force humaine est plus importante, la structure sociale donnant ce travail différente ainsi que la source énergétique primaire pour toute les productions (non nucléaire).

En fonction du moment où il sera démantelé l'édifice auquel il appartient, le poteau pourra passer par une filière de valorisation et les engins de chantier pourront être basé sur des technologies différentes et être alimentés avec des énergies d'origines diverses.

Le résultat des calculs analytiques indiqués ci-dessus dévient alors une fonction d'évènements futurs inconnus et dépend donc de modèles prédictifs. De plus, il est nécessaire de connaitre les méthodes de l'époque de la construction et des diverses époque où des actions de maintenance on eu lieu et se baser donc sur des connaissances historiques.

L'information ainsi obtenue tient compte des effets directs des phénomènes passés et on ne devrait pas la traiter comme si ces effets, qui s'étaient produits à l'époque de la construction, pouvaient être translatés à l'instant actuel sans modifications et ne donnaient pas lieu à des effets indirects retardés dans le temps.

Ces doutes n'existent pas lorsque la règle citée est utilisé dans son domaine habituel d'application, c'est à dire l'évaluation comparative des constructions en état de projet ou récemment réalisées. Par contre, lorsqu'il s'agit de travailler sur un patrimoine construit daté de plusieurs décennies, la question se pose de la signification vis-à-vis des enjeux énergétiques et environnementaux actuels d'une information qui, dans le meilleur des cas, a une signification conventionnelle.

La définition d'un concept différent peut permettre de surmonter ces difficultés. Pour son introduction, on s'appuiera sur une révision du rapport entre éléments et bâtiment et sur une analogie « pédagogique » avec les définitions propres de la thermodynamique classique.

Domaine de vie utile des éléments.

Les discours précédents s'appuient sur les notions intuitives des éléments d'un bâtiment qu'il faut préciser.

Le terme élément est utilisé dans ce document pour indiquer tous ce qui participe à la construction d'un bâtiment et qu'on souhaite traiter comme une unité dans les analyses qui seront faites. Il s'agit donc d'un concept basé sur la facilité d'analyse et non pas sur la nature intrinsèque des choses, un élément pouvant être un matériau brut ou élaboré, une pièce plus ou moins complexe, un ensemble de pièces, ...

Un élément n'est donc pas un objet indivisible, mais un ensemble choisi pour être traité en respectant le principe de son identité tout le long des processus analysés. Le cas de la subdivision d'un élément ou de la réunion de plusieurs éléments dans un processus pourra être traité à condition de représenter les détails particuliers de ces événements.

A tout élément on fait correspondre un parcours dans un domaine de vie utile; l'élément rentre dans ce domaine lors de sa création et en sort lors de sa destruction. La réunion d'éléments initialement distincts en un seul élément ou la subdivision d'un élément identifié en plusieurs autres éléments correspondent donc à des conditions de passage par le bord du domaine de vie utile.

Dans toute branche d'un parcours intérieure au domaine les éléments gardent donc leur identité (fig. 1). Au contact du bord des échanges de matière se produisent avec l'extérieur du domaine, qui peuvent être positif (extraction) ou négative (décharge).

Les apports énergétiques sont de deux types : ponctuels sur le bord et diffus le long des parcours. Les premiers représentent l'énergie employée pour la création des éléments ou celle pour leur destruction, les deuxièmes les énergies demandés par les transformations et l'entretien des éléments dans le domaine ou produites par ceux-ci (pensez aux panneaux photovoltaïques par exemple).

En suivant un élément dans sa vie utile il est possible d'intégrer toute contribution énergétique, avec son signe, pour obtenir le bilan correspondant à son cycle de vie. Comme on a vu précédemment, cette information n'est pas opérationnelle pour les analyses qu'on souhaite faire.

Un bâtiment est défini comme une agrégation provisoire d'éléments. Certains éléments du bâtiment peuvent provenir du bord du domaine utile juste avant l'agrégation et revenir sur le bord tout de suite après la fin de l'agrégation, mais d'autres peuvent avoir un parcours plus complexe, entrant dans plusieurs agrégations avant de sortir du domaine utile (fig. 2).Ce que nous pouvons évaluer est l'énergie nécessaire à partir d'un instant donné (l'instant actuel) pour qu'un ensemble d'éléments suit des parcours donnés et l'énergie qui peut être obtenue par ces parcours. Moins la durée des parcours sera étendue dans le temps, plus l'évaluation pourra se faire correctement sans les incertitudes liées aux évolutions du contexte technologique, économique et social.

Il est en effet possible de se donner une mesure de l'énergie incorporée indépendante du temps, relative seulement au contexte actuel : la somme des énergies nécessaires pour produire tous les éléments du bâtiment à l'instant actuel et dans une situation arbitraire de non agrégation, c'est à dire comme si le bâtiment n'était qu'un stock d'éléments qui viennent d'être produits (fig. 3, 4).

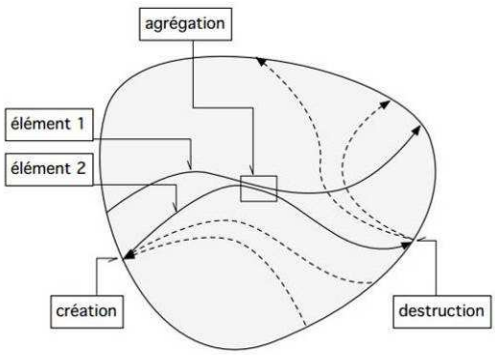


Figure 1. Le domaine de vie utile avec des exemples de parcours.

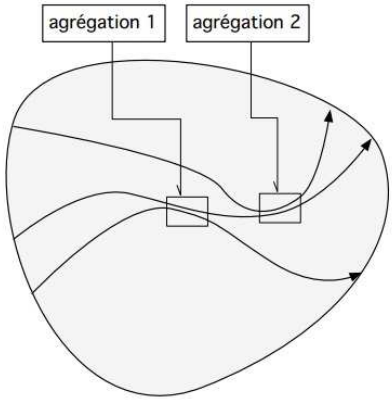


Figure 2. Exemple de recyclage d'un élément : deux agrégations dans une même vie utile.

Une mesure de l'énergie incorporée « libre» d'un bâtiment peut alors être définie en relation avec un ensemble de parcours de désagrégation des éléments de ce bâtiment qui les conduits dans cet état arbitraire de non agrégation. Elle n'est pas à mettre en relation avec l'énergie qui a été utilisée pour la création du bâtiment (concept dont on a présenté les limites), mais avec l'énergie qui est disponible à l'instant donné et qu'on peut « extraire» du bâtiment par le biais d'un ensemble approprié de processus.

Pour mieux définir ce concept on doit reprendre celui d'énergie libre, étroitement liée aux limites énoncées par le deuxième principe de la thermodynamique.

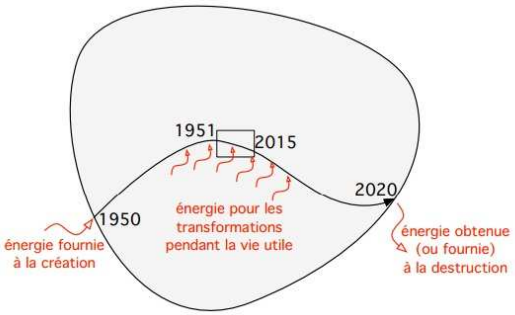


Figure 3. L'intégrale de l'énergie échangée entre un élément et son exté- rieur au cours de sa vie utile est une mesure inappropriée à l'étude pro- posée.

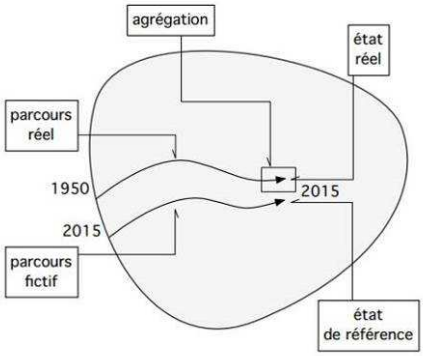


Figure 4. Définition d'un état de référence, ne dépendant que du contexte actuel, correspondant à chaque instant du parcours utile d'un élément.

Deuxième principe et cycle de Carnot.

On imagine facilement que, comme corollaire du deuxième principe de la thermodynamique, les parcours des éléments dans le domaine de vie utile sont caractérisés par une dégradation de la qualité de l'énergie qu'on peut obtenir d'eux par rapport à celle de l'énergie qu'on lui a fourni.

L'énergie disponible pour réaliser une transformation, une fois la transformation effectuée devient de l'énergie incorporée ; si la transformation inverse existe, en la réalisant on ne peut pas obtenir la disponibilité de la même quantité d'énergie qu'on avait au départ (si ce n'est, éventuellement, que comme cas limite inatteignable). Une partie de l'énergie devient indisponible si on veut répéter le processus.

La formalisation de ce concept en thermodynamique classique passe par la définition du cycle de Carnot (expansion isotherme, expansion adiabatique, compression isotherme, compression adiabatique) et se compose de deux passages:

- aucun autre cycle s'appuyant sur les mêmes températures extrêmes ne peut avoir un rendement supérieur à celui du cycle de Carnot ;
- à la fin d'un cycle de Carnot, une partie de l'énergie fournie pour activer le cycle s'est dégradée (passant de la source chaude à la source froide) et ne peut plus être utilisée pour se transformer en travail.

La dégradation peut être mise en relation avec l'entropie du gaz transformé dans le cycle, qui augmente dans le processus. Le cycle de Carnot peut alors être pris comme référence pour la mesure du rendement de n'importe quelle machine thermique.

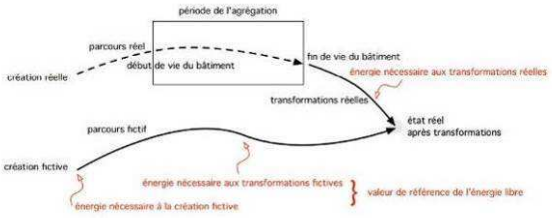


Figure 5. Schéma de calcul de l'énergie incorporée libre d'un élément : différence entre l'énergie incorporée dans un processus fictif complètement actuel et l'énergie nécessaire à l'extraction de l'élément à la fin de la vie du bâtiment.

Ces passages montrent deux limites dans toute approche aux questions énergétiques et notamment ou problème du recyclage:

- on ne sait pas réaliser un cycle idéal de rendement maximal, éventuellement on ne connait même pas un tel cycle (l'ignorance du cycle de Carnot n'a pas empêché l'invention des machines thermiques) ;
- il existe en tout cas une limite de rendement, qui peut être évalué si on connait le cycle idéal de rendement maximal.

Dans l'étude du recyclage, nous pouvons suivre le même schéma logique, mais nous serons contraints de procéder sans avoir la connaissance du processus de recyclage idéal (jouant le rôle du cycle de Carnot). Celui-ci devra être vu comme l'extremum de l'ensemble des processus envisageables et évalué par une démarche euristique.

En revenant sur l'énergie incorporée, nous avons mentionné la partie libre de cette énergie. Dans un processus thermodynamique l'énergie libre est la partie de l'énergie qui peut produire du travail; si l'entropie augmente, l'énergie libre se réduit. La dégradation de la qualité de l'énergie incorporée peut donc être formalisée comme la réduction de l'énergie incorporée libre.

N'ayant pas la possibilité de mesurer cette réduction dans un cycle idéal de rendement maximal, nous allons prendre une référence arbitraire, qui est celle introduite précédemment : l'état de référence du processus de démolition sera celui de l'ensemble des éléments de la construction vus comme s'ils venaient d'être produits et en état de désagrégation (fig. 4).

Pour parvenir à cet état il existe des parcours réels (comportant des phases propres à une démolition du bâtiment) et des parcours fictifs, partant d'une création à l'instant actuel et entièrement contenus dans le contexte actuel (fig. 5).

Si l'état de référence est choisi correctement (relativement proche de l'état actuel) il sera possible de choisir l'un et l'autre des dits parcours parmi ceux rendus disponibles par le contexte. Ne disposant pas de l'appui théorique d'un cycle idéal à rendement maximal, on tâchera à que les deux choix garantissent (autant que possible) la minimisation de l'énergie demandée (fig. 6).

La valeur énergétique pouvant être obtenue par la démolition pourra alors être définie comme la différence entre l'énergie nécessaire pour le parcours fictif (c'est à dire: combien faut-il dépenser pour obtenir cet élément dans cet état si on le fabrique à nouveau?) et celle nécessaire pour le parcours de démolition (combien faut-il dépenser si on veut recycler?).

La première peut être calculée par une ACV arrêtée au point choisi comme état de référence (ce qui par ailleurs évite la difficulté de se projeter trop loin dans le futur de l'élément), la deuxième doit faire l'objet d'une étude spécifique, dont les principes seront présentés dans ce travail.

La valeur ainsi obtenue, certes relative à deux parcours qui ne sont que des approximations des branches d'un cycle idéal, pourra être prise comme une approximation de la valeur de l'énergie incorporée libre.

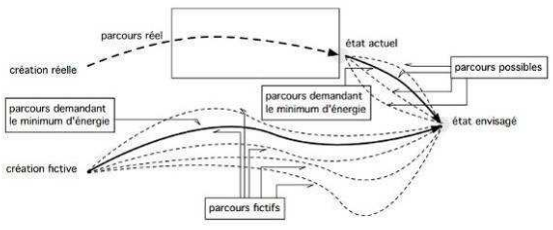


FIGURE 6. Cette image précise celle de la fig. 5 en montrant les alterna- tives possibles aux parcours choisis pour l'analyse, caractérisés par le be- soin énergétique minimal parmi ceux qu'on sait construire dans le contexte actuel.

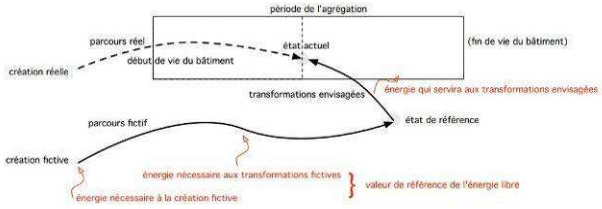


FIGURE 7. Schéma définissant l'énergie incorporée libre d'un élément : somme de l'énergie incorporée dans un processus fictif complètement ac- tuel portant cet élément dans un état de référence arbitraire et de l'opposé de l'énergie nécessaire à porter l'élément de son état d'agrégation dans le bâtiment à cet état de référence.

Formalisation

On considère un bâtiment comme un ensemble d'éléments ayant une identité définie tout le long des phénomènes étudiés. L'ensemble des éléments constitue à tout instant une partition du bâtiment. L'énergie étant une variable extensive, on admet son additivité sur la partition.

Chaque élément peut se trouver dans un ensemble d'états et il existe des parcours reliant ces états de sorte que à chaque élément on peut associer un graphe, qu'on appelle domaine de vie utile de l'élément; les nœuds du graphe donnant lieu à échange de matière sont le bord du domaine.

Soit $\mathcal{E}_p^{(e)}$ l'énergie incorporée dans l'élément e suivant le parcours p dans son domaine de vie utile. Le contenu énergétique minimal d'un état der du bâtiment est par définition :

$$\mathcal{A}\{r,t\} = \min_{p \in \mathcal{P}_t^{(r)}} \left\{ \sum_e \mathcal{E}_p^{(e)} \right\}$$

où la sommation doit être étendue à tous les éléments du bâtiment et $P_t^{(r)}$ est l'ensemble des parcours menants du bord du domaine de vie utile des éléments à l'état *r* et réalisés à l'instant actuel t.

A{*r*, *t*} peut être calculée par recherche euristique dans une série d'ACV arrêtées à l'état *r* et entièrement contenues dans le contexte actuel.

L'énergie incorporé $\mathcal{E}\{t\}$ du bâtiment peut être mise en relation avec la valeur A{*r*, *t*}: le plus que r s'approche de l'état actuel du bâtiment le plus ces deux valeurs s'approchent, même si leur identification sera toujours impossible à cause de la nature non idéale des parcours portant à l'évaluation de A{*r*, *t*}.

En pratique on acceptera l'approximation

$$\mathcal{E}\{t\} \approx \mathcal{A}\{r,t\}$$

Faite en prenant un état de référence r arbitrairement choisi.

L'énergie minimale nécessaire à la transformation du bâtiment pour que ses éléments se trouvent en r à l'instant t est non inférieure à :

$$\mathcal{B}\{r,t\} = \min_{p \in \mathcal{D}_t^{(r)}} \left\{ \sum_e \mathcal{E}_p^{(e)} \right\}$$

où D_t) est l'ensemble des parcours de démolition faisables à l'instant t.

Pour la calculer il est nécessaire de se donner des parcours de démolition, ou un parcours jugé optimal, et analyser ses différentes phases pour calculer leurs besoins énergétiques. Un travail de ce type est présenté dans la suite de ce document à titre d'exemple.

L'énergie incorporée libre sera approchée par l'expression:

$$\mathcal{F}\{t\} \approx \mathcal{A}\{r,t\} - \mathcal{B}\{r,t\}$$

où la dépendance fonctionnelle du choix de r a été enlevée pour indiquer que ce choix doit être tel à minimiser son impact sur le résultat. En pratique pour les calculs, r représente une situation de stockage des éléments dans des zones proches des zones habituelles de stockage pour le site dans lequel se trouve le bâtiment analysé.

Sources et exploitations

Quel réemploi ?

Dans un bâtiment existant en vue de démolition il y a des éléments matériels qui peuvent être récupérés, c'est à dire qu'ils peuvent être identifiés, séparés et recueillis pour les valoriser.

Une telle valorisation peut se conclure par un recyclage ou par un réemploi. On indique par le premier terme un ensemble d'opérations qui saisissent la matière pour la transformer, et éventuellement l'épurer, afin de parvenir à sa réutilisation (le plus souvent sous une forme autre que celle qu'elle avait dans son emploi précédent). On donne au terme réemploi le sens d'une réutilisation plus directe des éléments matériels, conservant le plus souvent leurs formes en l'état du premier emploi et ne demandant aucune transformation significative de la matière dont ils sont constitués.

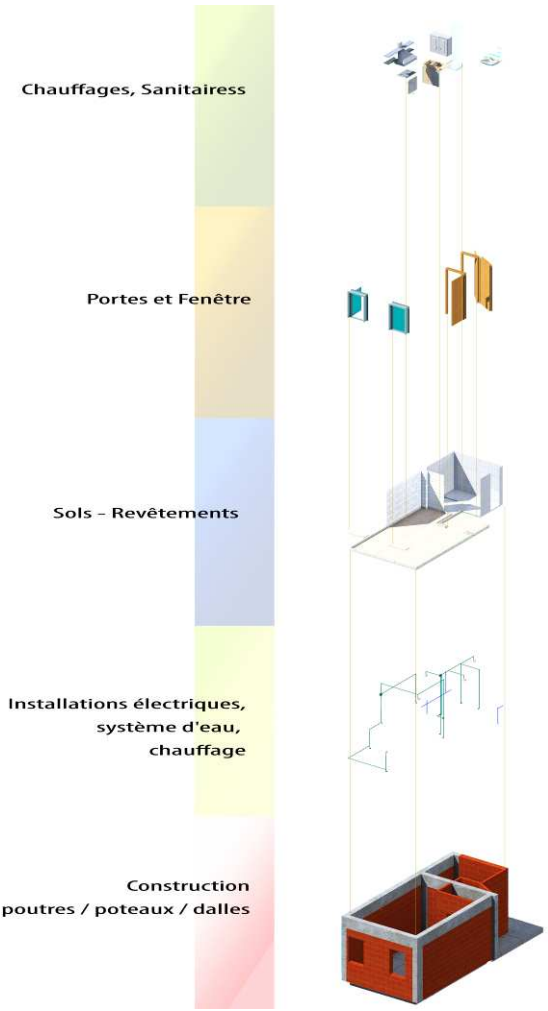
Dans ce document on s'occupe du réemploi comme système d'exploitation de l'énergie incorporée dans les bâtiments existants. Le recyclage est objet de nombreuses recherches et se trouve souvent appliqué dans la pratique ; en revanche le réemploi est beaucoup moins pratiqué. Il est souhaitable de se donner une mesure objective des gains pouvant être obtenus par l'une et par l'autre méthode de valorisation ou par un recours parallèle aux deux pratiques.

Les passages nécessaires du processus de réemploi sont :

- Identification des éléments pouvant être réemployés.
- Séparation de ces éléments, descente e stockage à pied d'œuvre.
- Classement et certification.
- Transport et stockage à court, moyen ou long terme.
- Transformations diverses pour la séparation, la descente, le transport, le stockage ou le réemploi.

Chaque passage peut être analysé du point de vue :

- de l'énergie demandée,
- des coûts directs,
- des immobilisations,
- des technologies,
- des compétences demandées.



Principe de décomposition par lots de la démolition sélective

La valeur commerciale de la démolition (historique et présente)

Au XIX• siècle la démolition faisait l'objet d'un appel d'offre; l'entreprise de démolition payait pour faire le travail et gagnait sur la vente des matériaux récupérés. Cette pratique s'est interrompue certainement à cause de la perte de valeur des éléments récupérables vis-à-vis des nouvelles techniques constructives.

Pour que ce type de marché puisse se rétablir il faut que ce rapport de valeurs soit rééquilibré. Les facteurs qui peuvent reconduire le bilan entre valeurs in situ et coûts de la récupération vers un équilibre à l'avantage des premiers sont de nature technique, architecturale, sociopolitique et environnementale :

- préservation de la valeur des éléments in situ par des techniques de démolition appropriées (ce qui accroit la valeur en situ et le coût de récupération, ce qui conduit au besoin d'optimisation de ce processus pour que la valeur préservée augmente plus que le coût) ;
- réduction des coûts de séparation, translation et stockage de ces éléments par des techniques et organisations opérationnelles appropriées (ce qui permet la réduction directe des coûts de récupération) ;
- rationalisation de l'introduction dans la nouvelle construction d'éléments réemployés (ce qui fait augmenter leur valeur in situ tant par l'élargissement du marché que pour la réduction du coût de leur réemploi);
- introduction de pratiques de projet qui permettent l'introduction dans la nouvelle construction d'éléments récupérés dans le même site ou dans les sites voisins (ce qui réduit le coût du réemploi et de la récupération si les translations et stockages sont réduits dans l'opération);
- augmentation des CO2 de mise en décharge, ce qui dépend directement du prix de la décharge et qui peut être guidé par les règles d'imposition suite à une pression sociale et politique;
- réduction du poids environnementale des opérations de démolition et construction vues dans un même système (une démolition appropriée au réemploi de certains éléments peut éventuellement se révéler de plus grand impact sur l'environnement qu'une démolition plus simple, mais c'est dans la continuité avec la nouvelle construction qui suit à la démolition qu'il faut chercher les avantages pour l'environnement).

L'avantage économique d'une démolition visant le réemploi de certains éléments est le moteur qu'il faut réactiver pour assurer le fonctionnement durable du système; cet avantage peut être obtenu grâce à des avancées technologiques

Les parties réemployabes de la construction.

Une analyse du patrimoine construit est nécessaire pour lister les parties potentiellement réemployables en fonction de la typologie et de l'époque de la construction. Il est envisageable la réalisation de cartes à l'échelle de la ville avec un zonage correspondant aux typologies de bâtiment par rapport aux type de réemploi qui se rend possible.

On doit se confronter à des technologies conçues sans tenir compte de la possibilité (et, à terme, de l'exigence) du réemploi, ce qui implique que leur valorisation en ce sens ne peut s'estimer que en imaginant un procédé de transformation (qui n'est pas propre de ces éléments) et dépend donc du choix de ce procédé.

L'analyse de la possibilité de réemployer doit par contre faire abstraction du procédé particulier qui peut être choisi pour cela, à fin de faire ressortir les potentialités même en l'absence d'une technologie existante pour leur exploitation ou en présence de plusieurs technologies concourantes.

Il en dérive que ces analyses doivent se baser sur des informations physiques (en état donc) plutôt que procédurales (prévisibles ou immédiatement applicables, mais contingentes). On peut alors classer les éléments de la construction en tenant compte du rapport de ces facteurs opposés (favorables/défavorables à toute opération de réemploi) :

- propriétés topologiques :
  - concentration/dispersion
  - unité/multiplicité
- propriétés géométriques :
  - compacité/étalement
  - tolérance/précision
- propriétés mécaniques :
  - résistance/faiblesse
  - ductilité/fragilité
  - versatilité/spécialisation
- propriétés chimiques :
  - inertie/réactivité

Les termes précédents, quand nécessaire, s'expliquent comme suit.

Concentration / dispersion. On fait référence à la distribution spatiale; par exemple un ascenseur ou une charpente de toiture peuvent être classés sous la propriété topologique de la concentration, alors que les appareils d'éclairage ou les prises électriques seront à classer comme dispersés.

Unité / multiplicité. Ce classement concerne le nombre des éléments qui composent l'unité considérée; par exemple une porte peut être traitée comme un élément unitaire alors qu'un carrelage se compose de multiples éléments.

Compacité / étalement. Il s'agit de classer les éléments par rapport à leur géométrie; une pièce de charpente étant vue comme un élément compact, à l'opposé d'un long fil électrique, vu comme élément étalé.

Tolérance / précision. Cette propriété concerne la géométrie du montage des éléments ; un exemple de tolérance étant donné par les câblages, un de précision par les menuiseries ou les charpentes métalliques.

Une autre classification se fait en distinguant le réemploi du gros œuvre de celui du second œuvre. Pour le premier il est relativement facile de se donner un classement standard en fonction des matériaux (pierre de taille, maçonnerie, bois, acier, béton et systèmes mixtes divers) et des technologies et typologies constructives (charpente, mur porteurs, ossature, etc.). Ce travail peut être fait sur la base des types existants et d'informations standard.

Dans les exemples récents et dans la tradition le réemploi du gros œuvre est lié à de processus de désassemblage et réassemblage et correspond donc à de technologies constructives assemblées plutôt que à des agrégées.

Par exemple pour les structures en pierre de taille le réemploi des pierres a toujours été pratiqué (souvent, mais pas uniquement, avec une dégradation du rôle de l'élément réemployé), contrairement aux cas de la maçonnerie en briques, du opus incertum, etc., comportant la difficulté de désagrégation du matériau.

Ainsi on connaît beaucoup de cas de réemploi d'éléments de charpente métallique ou bois, mais aucun dans lequel une structure continue en béton armé n'a été réemployée. Les possibilités actuelles de valorisation de ce dernier type de structures passent exclusivement par le recyclage ; les recherches en cours ne semblent pas inverser la tendance, sur laquelle il faudrait se questionner.

Les technologies pour la séparation et la translation.

La séparation peut être de deux types : désassemblage ou désagrégation. Dans le premier cas il s'agit de démonter un système qui a été précédemment assemblé, avec des opérations qui inversent le processus de construction et sont donc facilement identifiables ; dans le second le système a été construit par de procédures qui ne peuvent pas être inversées.

L'exemple du désassemblage est celui des charpentes et ossatures en bois ou acier, un exemple de désagrégation est donné par les ossatures ou par les coques en béton.

L'un de thèmes les plus importants est la séparation par désassemblage. Cette technologie peut se présenter pour le réemploi des structures en béton, mais aussi pour les structures en maçonnerie et, en mesure inférieure, pour la pierre de taille. C'est aussi le cas de quelques revêtement, comme les carrelages, les parquets, les dallages.

Les facteurs critiques pour le désassemblage sont :

- l'énergie demandée,
- la présence de sous-produits qu'il faut valoriser (éventuellement par recyclage),
- la relation entre méthode de désassemblage et produit «prêt au réemploi »,
- la possibilité de contrôler le processus de séparation, par exemple du point de vue de la géométrie des parties séparées.

La translation est lié à la séparation, car sa faisabilité dépend des dimensions des pièces séparées. Il existe donc deux étapes critiques dans le parcours :

- les éléments séparés doivent avoir des tailles compatibles avec leur réemploi, ils peuvent idéalement être prêts au réemploi,
- ils doivent en même temps avoir des tailles compatibles avec les technologies et les prix pour leurs translations (et stockage).

Il en dérive que le projet de réemploi doit tenir compte des processus de translation pour garantir le respect simultané des deux contraintes citées ci-dessus.

Il est moins facile que le processus de translation puisse s'adapter aux exigences du projet de réemploi, mais dans ce sens le rôle de la logistique de projet dévient plus important. L'optimisation des processus de séparation et translation en tenant compte desdites contraintes apparaissent comme un résultat qui peut être obtenu grâce à cette logistique.

Les stockages

On peut distinguer les situations dans lesquelles un même site est investi, pendant une période continue de travail, par des opérations de démolition suivies d'opérations de construction de celles dans lesquelles les parties réemployées dans la nouvelle construction proviennent d'un chantier de démolition antérieur et/ou situé ailleurs.

Il est probable que des situations du deuxième type deviennent les plus courantes, en vue de la complexité de la gestion en ligne du processus de démolition-valorisation construction sur un même site et avec des opérations continues.

Au contraire le recours à la valorisation de démolitions précédentes (et suffisamment proches) crée une sorte de rotation dans le marché des produits ré employables qui peut réduire leurs prix à condition que la gestion des stockages ne réduise pas les avantages de la rupture de continuité des opérations.

La création de stocks de produits réemployables, leur gestion et localisation sur le territoire est une question nouvelle.

La reconnaissance et les certifications.

Deux catégories d'études apparaissent qui n'existent pas actuellement. D'un coté il faut réaliser des études de reconnaissance en situ, d'un autre il faut certifier la qualité des pièces réemployables.

Par le terme « reconnaissance » on entend :

- étude des documents disponibles sur les édifices à démolir;
- inspection des sites de démolition;
- liste et évaluation des parties valorisables ;
- projet de valorisation (c'est à dire séparations et désassemblages, translations et stockages, en prévoyant du recyclage et du réemploi);
- projet et suivi des travaux de démolition;
- suivi des travaux de valorisation. Les certifications requièrent :
- l'analyse des éléments prélevés en situ;
- l'évaluation statistique (comportant de tests) de leur état;
- l'indication des conditions possibles de réemploi;
- l'éventuel rejet;
- et toute autre opération pour que les éléments réemployables soient réintroduits dans la chaîne de production avec un risque contrôlé analogue à celui existant pour des éléments nouveaux.

Bilan et opportunités

Analyse SWOT

Un analyse SWOT (FFMO) peut être menée à plusieurs échelles: celle du bâtiment, celle du quartier ou de la ville et celle de la région.

En tirant les sommes d'un bilan général, qui par ailleurs correspond à ce qu'on observe dans le cadre plus général du développement durable, les nouveaux bâtiments se trouvent dans un contexte plus fortement marqué qu'auparavant, dans lequel leur insertion doit respecter plus de points critiques.

Face à cette difficulté accrue, l'innovation trouvera un nouveau champ d'application et des nouvelles raisons d'être. Cette innovation agit sous la poussée des opportunités et des menaces qui se présentent à cette nouvelle approche constructive.

Echelle du bâtiment.

Points forts. Economie d'énergie incorporée (à vérifier en tenant compte du cycle de vie complet de la construction). Rôle et intégration architecturale de la réflexion constructive. Rôle et intégration architecturale de la logistique de projet. Rapport fort avec le site.

Points faibles. Réduction de la liberté formelle. Limitations dans les choix des matériaux. Complexification de la démarche de projet et du chantier.

Opportunités. Innovation en termes de langage architectural. Innovation du point de vue de la construction et du chantier. Valorisation de l'existant en tant que source d'énergie incorporée, création par conséquent des nouveaux marchés. Création des corps de métier et des emplois.

Menaces. Perte du poids relatif de l'à priori architectural dans la démarche de pro- jet. Limitation des opérations pour en réduire la complexité. Standardisation sans innover.

Echelle du quartier et de la ville.

Points forts. Réduction des flux de matière. Changement des opérations avec tendance à la migration vers des filières sèches. Conservation des quelques références identitaires dans le renouvellement du parc immobilier. Accroissement possible de la valeur immobilière de zones autrement défavorisées, sur la base de leur contenu d'énergie libre incorporée.

Point faibles. Difficulté de valorisation de certaines typologies constructives, avec par conséquent la création de zones dans lesquelles il devient plus difficile d'intervenir.

Opportunités. Naissance d'un marché de l'énergie incorporée libre. Rééquilibrage (par- tiel) des valeurs immobiliers par zone territoriale sur la base de l'énergie incorporée libre dans les bâtiments existants. Tendance au renouvellement du parc immobilier et à la réduction de l'énergie incorporée dans les nouveaux bâtiments.

Menaces. Stagnation du renouvellement si les règles sur la démolition ne sont pas cohérentes avec les technologies et les valeurs récupérables dans les différents quartiers.

Echelle régionale.

Points forts. Réduction de l'étalement urbain et amélioration et renouvellement des zones habitées. Réduction de l'impact environnemental de l'industrie du bâtiment. Réduction de l'impact environnemental des transports associés aux flux des matières premières. Développement de compétences avancées.

Points faibles. Stabilisation des processus et des marchés, qui seront initialement soutenus par une politique visant l'équilibre stratégique. Disponibilité des compétences indispen- sables au fonctionnement du système.

Opportunités. Amélioration du cadre de vie. Reduction de la pollution. Accroissement de la compétitivité.

Menaces. Perte de compétitivité par manque de développement industriel. Désorganisa- tion des stocks. Immobilisations.

Cartographie

Prémisses

On envisage la réalisation d'une cartographie du gisement d'énergie incorporée libre de la ville de Paris. L'énergie incorporée libre est la partie de l'énergie incorporée qui peut être récupérée (par le réemploi ou le recyclage des éléments concernés); à la différence que dans la thermodynamique classique, où l'énergie libre peut être définie sur la base d'un cycle parfait qui permet d'extraire le maximum de travail pour une différence de températures données (le cycle de Carnot), ici nous n'avons pas un tel référentiel absolu et idéal.

Par conséquent, on procède en imaginant des processus de démolition sélective d'une construction, pour obtenir des estimation qui, par conséquent, dépendent, autre que du type de construction et d'élément étudié, de la nature des travaux de démolition et des techniques envisagées. Il existe donc une large marge d'augmentation de l'énergie disponible à fin d'une démolition sélective et différents contextes.

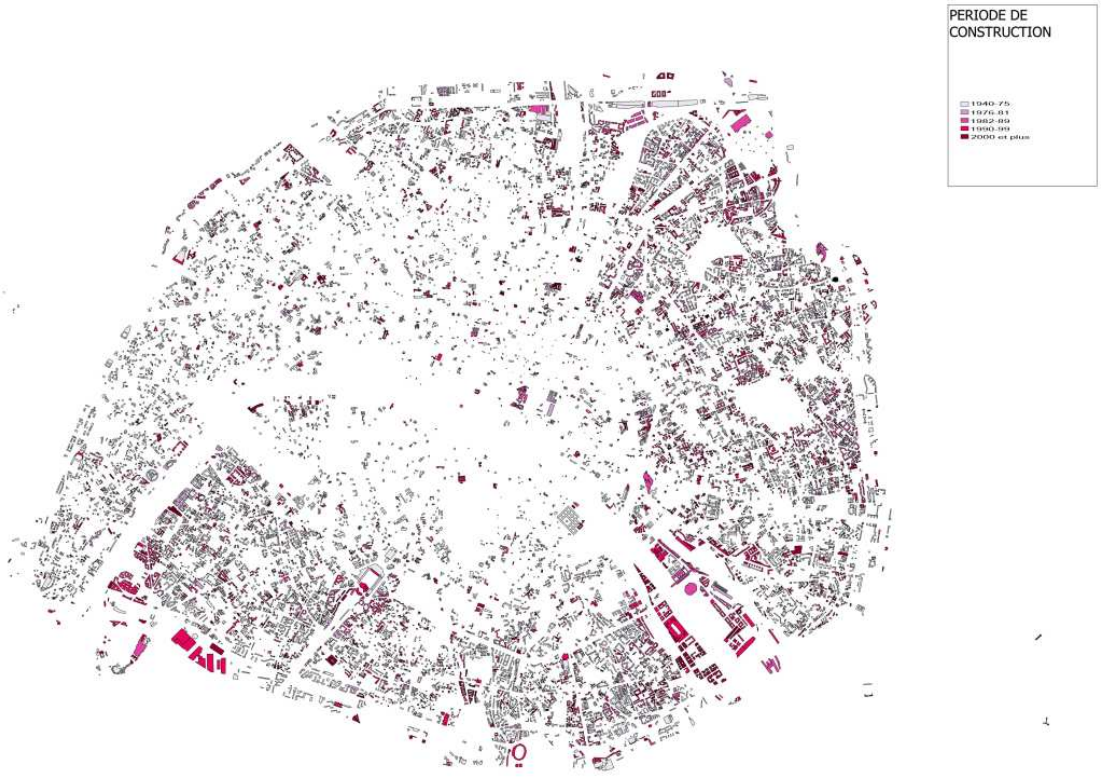
Il faut souligner qu'il s'agit donc d'un concept d'énergie libre qui incorpore (contre la définition classique) les limites et les erreurs des diverses démarches qui permettent de la libérer (le concept classique étant plutôt celui d'une énergie qui peut être dans le meilleur des cas libérée).

Méthodes, données.

Le point de départ de l'analyse est le choix de quatre bâtiments types sur lesquels se concentrer. Ceux-ci ont été choisis en consultant des entreprises de BTP (évolutions en cours). Pour un bâtiment donné, on fait les passages suivants (voir tableaux excel joints) :

1. pour chaque élément du bâtiment on donne une évaluation qualitative de leur habilité à être réutilisé (note entre A+ et C- en fonction des critères fournis);
2. pour chaque élément et en fonction de sa position (étage), on indique une liste d'opérations de chantier permettant sa mise à disposition pour un processus de valorisation; la liste contient les débits, les temps, les machines et la main d'œuvre nécessaires pour l'opération et son descriptif;
3. les opérations sont analysées à l'aide d'un logiciel d'ACV pour donner une mesure de leurs impacts;
4. la somme des impacts est calculée pour donner une évaluation globale de l'opération.

L'estimation ainsi obtenue, comparée à l'estimation de l'opération alternative de démolition non sélective et donne la mesure de l'énergie incorporée libre dans le bâtiment analysé (et des autres facteurs comparés des ACV).



Cartographie du bâti parisien postérieur à 1940.

Restitution cartographique.
Sur la base d'informations fournies par bases de données SIG, on établit une carte de la région parisienne avec les typologies des bâtiments en faisant l'hypothèse simplificatrice d'expansions homogènes par période de temps. On a réalisé trois cartographies de Paris qui révèlent les différentes consommations d'énergie (électricité, eau, essence) par rapport aux hauteurs des bâtiments (voir cartographie en annexe).

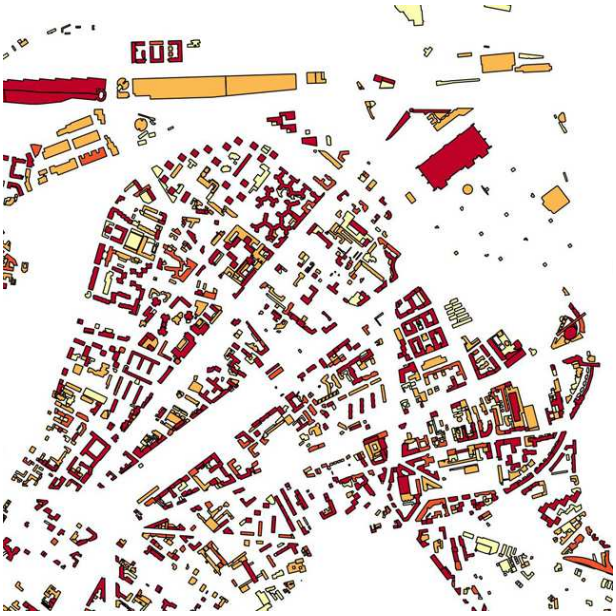
Les fichiers graphiques ont été fournis par l'Apur au format *shape* dans le système de coordonnées *Lambert 93*. Le code de période de construction a été fait selon une classification sur 11 postes

1 : Avant 1800
2 : 1801-1850
3 : 1851-1914
5 : 1915-1939
6 : 1940-1967
7 : 1968-1975
8 : 1976-1981
9 : 1982-1989
10 : 1990-1999
11 : 2000 et plus

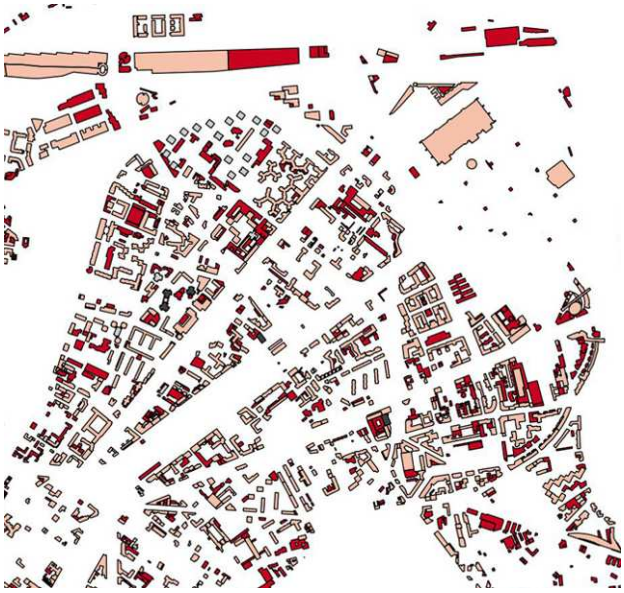
On limite l'analyse à la période 1940-2000 pour des raisons pratiques (postes 6-11). (voir cartographie en annexe) Vu que l'analyse a été faite sur un bâtiment-type de 5 étages, on a considéré pour le calcul de l'énergie libre incorporée un coefficient en fonction du nombre d'étages du bâtiment considéré. Dès lors, pour un bâtiment de 4 étages, la valeur de demande électrique est celle d'un bâtiment de 5 étages multiplié par 0.9.

Le nombre d'étages est calculé en fonction de l'attribut "*Hauteur médiane*" de l'emprise calculée par croisement des données issues d'un MNE. La valeur médiane est celle qu'il convient d'utiliser dans la plupart des cas pour la hauteur. Elle permet de retirer les valeurs aberrantes issues du croisement de la couche vecteur et de la couche raster (MNE), notamment en marge des emprises, et qui peut correspondre à une hauteur contenue sur l'emprise voisine[153].

Grâce aux résultats obtenus avec l'analyse décrite au paragraphe précédent, on transforme la carte précédente dans une donnant une évaluation de la rentabilité d'une opération de démolition sélective par zone homogène.



Un extrait de la cartographie évaluation la consommation d'électricité nécessaire pour la démolition sélective



Un extrait de la cartographie évaluation la consommation de carburant nécessaire pour la démolition sélective

[153] Nombre d'étages= hauteur médiane/3,2 (3,2 m hauteur moyenne des appartements de Paris après 1950).

Mesurer l'offre

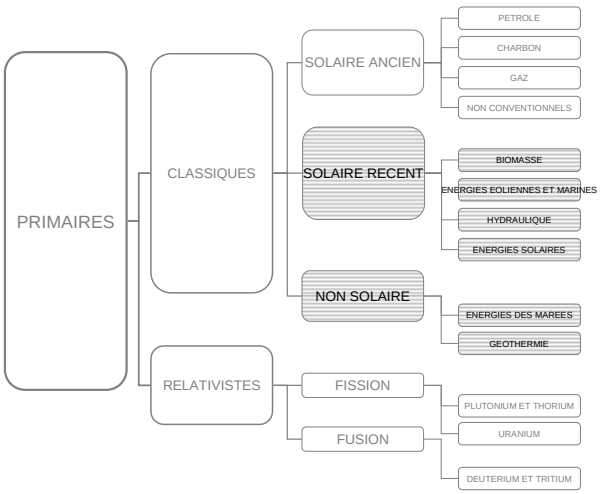
Introduction

Les énergies renouvelables dans le classement

Dans le cadre de *Reforme*, nous associons l'*offre* aux productions d'énergies renouvelables. L'*offre* est donc le flux constant d'énergie qui *arrose* notre *Spaceship Earth*, ce système thermodynamique ouvert sur le cosmos.

En reprenant la taxinomie des différentes énergies primaires disponibles sur Terre déjà présentée dans la partie précédente, l'*offre* correspond aux ressources grisées.

La partie qui suit s'attachera donc à décrire et à quantifier chacun des différents vecteurs secondaires énoncés dans la partie droite de l'arborescence, et principalement les productions génériques.



Typologie des énergies primaires : les énergies renouvelables sont grisées.

Cartes des gisements renouvelables

Avant de présenter plus avant chaque vecteur, nous invitons le lecteur à consulter la bibliographie et les différents liens internent proposés : ces informations permettront d'augmenter la documentation en amont de tout projet.

L'atlas des gisements énergétiques (solaire, éolien etc.) est de fait une donnée relativement aisée à récupérer. Ces cartographies sont en général établies par les acteurs des énergies renouvelables[154].

En fonction des situations urbaines analysées, il s'agira dans le cas de notre projet de collecter les valeurs sur un échelon temporel donné (par exemple sur une année) :

1. Du gisement solaire[155] ;
2. Du gisement éolien[156] ;
3. Du gisement potentiel hydraulique ;
4. Du gisement potentiel marin y compris le gisement marémoteur[157].

[154] L'Irena (International Renewable Energy Agency) met d'ailleurs en ligne un atlas global des énergies http://irena.masdar.ac.ae/. Conçu comme un système d'informations géographiques en libre accès, il permet à l'utilisateur d'identifier les gisements localement disponibles : cartographie du DNI (insolation directe) pour le solaire à concentration, cartographie du GHI (insolation globale) pour le photovoltaïque ou le thermique, cartographies des vitesses de vent à plusieurs altimétries etc.
[155] Comprenant l'ensemble des productions possibles issus du solaire récent : agriculture, production de bois de biomasse, solaire thermique, solaire photovoltaïque etc.
[156] Le gisement éolien étant issu du gradient thermique fonction des expositions variables au flux solaire. Le vent est un moteur au sens d'un cycle de Carnot.
[157] Bien que ce dernier ne soit pas d'origine solaire mais corresponde à une déperdition gravitationnelle entre la Terre et la Lune.

Le scénario « Reforme 7 » de l'offre

Avant les Métamorphoses…

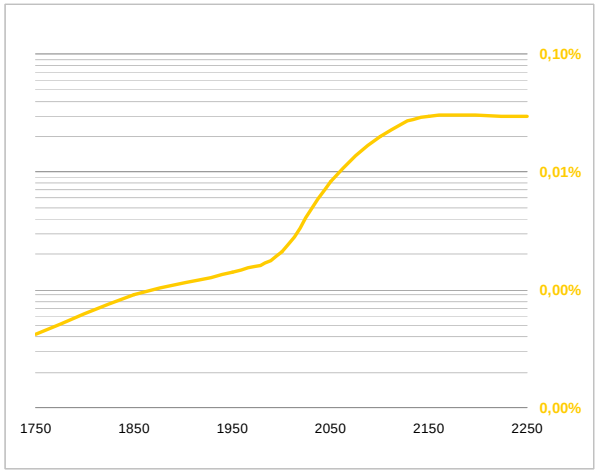
Au terme de cette recherche, dans la dernière partie, *Les Métamorphoses*, nous présentons plusieurs scénarios globaux de *solarisation terrestre* et de convergence entre *offre* et *demande* énergétique. Selon ce scénario médian, la population mondiale entame une longue transition démographique jusqu'à stabiliser la démographie à environ 7 milliards d'individu dans environ 200 ans (le maximum étant atteint autour des années 2050 à environ 9 milliards d'individu).

A titre d'illustration, nous décrivons ici de façon globale et tendancielle, une prospective d'évolution du rendement moyen de conversion de l'*offre*. A l'instar d'approches qui seront déclinés à l'échelle territoriale et urbain dans la suite de la *Formalisation*, le scénario *Réforme 7* décrit *une* hypothèse concourant à *augmenter la solarisation de notre vaisseau terrestre*, le déploiement de plans de récolte raisonnées et fertiles de l'énergie solaire et de ses différentes dérivées.

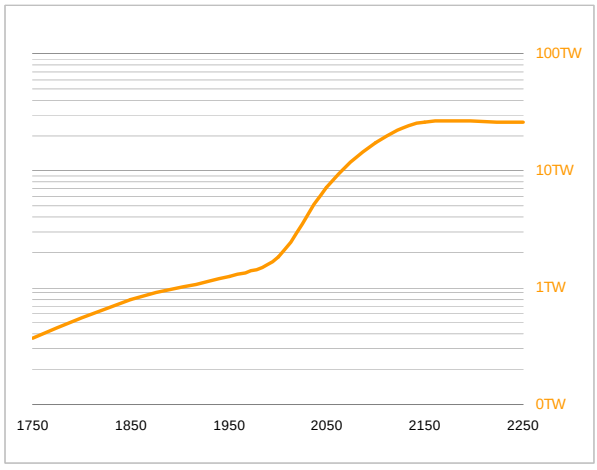
Selon ce scénario, le rendement moyen de conversion de l'*offre* augmente de façon importante entre 2000 et 2100 pour se stabiliser vers 0,03% vers 2100.

A cette date, l'humanité a été capable de *fertiliser* le globe de telle que sorte que la quantité moyenne d'énergies utilisables par unité de surface terrestre (océans compris) est de l'ordre de 0,05W/m². Cela paraît très peu, mais intégré sur la surface du globe, le flux moyen d'énergie disponible pour assouvir la *demande* est alors de près de 20TW à horizon 2100 et près de 30TW en 2150.

Cette trajectoire reviendrait à multiplier environ par dix la totalité de la production renouvelable aujourd'hui installée. Il est urgent que les ultimes ressources de nos *stocks de long terme* permettent d'assurer la réorganisation raisonnée et durable de nos sols, de déployer des scénarios viable d'exploitation de la photosynthèse des mers et océans et permettent enfin de bâtir les infrastructures qui permettront d'augmenter drastiquement les capacités de conversion de notre petit système solaire terrestre !



Courbe d'évolution de la solarisation – rendement moyen de conversion du gisement solaire terrestre - selon la trajectoire « Reforme 7 » avec 7 milliards de terriens à horizon 2250. Les deux autres scénarios, « Reforme 4 » et « Reforme 10 » décrivent des trajectoires avec respectivement 4 et 10 milliards d'habitants sur Terre.



Courbe d'évolution de l'offre disponible terrestre selon la trajectoire « Reforme 7 » avec 7 milliards de terriens à horizon 2250. Les deux autres scénarios, « Reforme 4 » et « Reforme 10 » décrivent des trajectoires avec respectivement 4 et 10 milliards d'habitants sur Terre.

Qualifier l'offre énergétique en situation urbaine

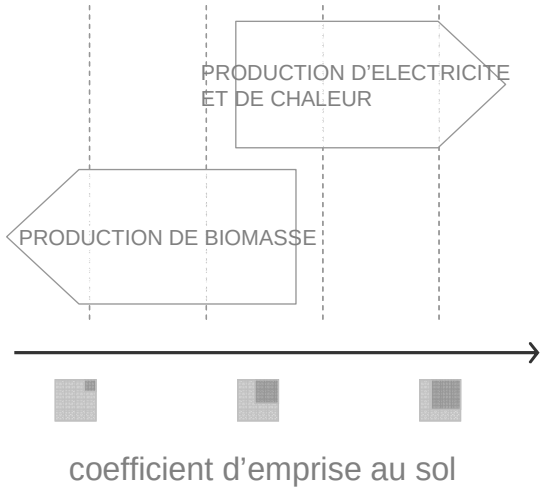
Une première caractérisation

Toutes choses étant égales par ailleurs, constatons en premier lieu que nous ne pouvons pas récolter le même type de *produits énergétiques* selon que nous nous trouvions sur le sol –voire en pleine terre- ou bien sur le toit d'un édifice (ou encore les façades d'un bâtiment).

Il est en effet plus aisé et plus efficace de faire grandir des arbres sur le sol naturel plutôt que sur la terrasse d'un immeuble. De façon plus générale et par un premier souci de simplification, nous pouvons considérer que le sol naturel se prête davantage à la production de biomasse.

Le graphique ci-dessous exprime donc que la production énergétique sera sans doute davantage orientée vers la production de biomasse lorsque le coefficient d'emprise au sol sera faible.

A contrario, et vue la définition que nous avons donnée à la caractérisation des surfaces bâties dans les sections précédentes, toitures et façades se prêtent davantage à la production d'*actifs énergétiques* de type chaleur ou électricité.



Une simplification du type d'actif énergétique produit en fonction du coefficient d'emprise au sol.

Caractérisation de leur dépendance aux variables de contenant

De façon générale, le tableau ci-dessous tache de caractériser les relations directes (et indirectes) entre nos quatre variables urbaines (*d,e,c,h*) et la nature des actifs énergétiques (ou des *offres*) potentiellement générées par conversion des flux issus du « dessus » (solaire et ses dérivés) soit par conversion des flux issus du « dessous » (géothermie)

Sans être exhaustif, ce tableau et ses notes permet d'illustrer que les variables de contenant (ou de forme) ont un impact bien plus important que la caractérisation de l'offre énergétique.

		Offre énergétique[158]
d		1. Dechets à valoriser[159] 2. Effet de second ordre[160]
e		1. Negligeable[161]
c	Coefficient d'emprise au sol	1. Production maraîchère[162] 2. Production de biomasse[163] 3. Production solaire 4. Production géothermique 5. Production éolienne
h	Hauteur moyenne bâti	1. Impact sur la production éolienne[164] 2. Impact sur la production géothermique[165] 3. Impact sur la production solaire[166] 4. Production de biomasse et maraîchère[167]

Tableau pour identification des impacts sur l'offre en énergie : zoom sur les variables intensives de contenant.

[158] En production annuelle par unité de surface de territoire.
[159] A analyser davantage comme un dispositif de réduction de la demande que de création d'une offre.
[160] Toutefois, la présence d'une population importante sur un territoire donnée (ie densité importante) favorise la demande et concomitamment investissements (capital) et quantité de travail pour la mise en place et l'exploitation de l'offre énergétique renouvelable.
[161] Hormis éventuellement la valorisation de chaleur fatale émise par les activités anthropiques.
[162] Comme intrants alimentaires pour les habitants ou intrants pour les animaux qui seront ensuite consommés.
[163] Comme combustible ou matériau de construction.
[164] Turbulence du gisement mais potentiel sur bâti de grande hauteur.
[165] Pieux géothermiques et proximité entre offre et demande
[166] Effet de masque
[167] En façade et sur les balcons

Typologie des espaces de production

Typologie des lieux de production

Au début cette section, la *Formalisation*, il était présenté le choix des quatre variables permettant de décrire une hypothèse de description tant de la *demande* que de l'*offre* en situation urbaine. Nous présentions en particulier la relation liant les variables de contenu (*d*,*e*) et les variables de contenant *(c*,*h*).

Dans les développements qui suivent, nous nous attacherons à évaluer –voire dans certains cas à modéliser- la nature de l'*offr*e en situation urbaine. Les graphiques présentés sur cette page explicitent la démarche employée : établir une typologie en plan masse de l'espace urbain sinon du territoire et identifier les gisements par type.

Consolidation spatiale de l'offre

Au sens de la formalisation de l'espace de l'énergie décrite dans *Reforme,* nous écrirons que la consolidation de l'offre de l'agent territorial *k* peut s'écrit :

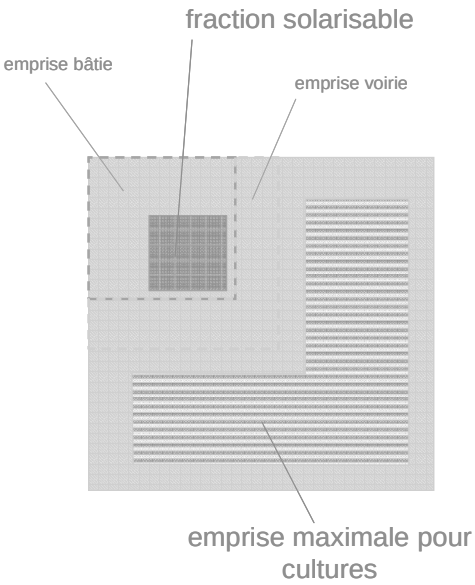
$$\langle k|\underline{S}\rangle = \sum_i p_i \underline{T}_i$$

Avec :

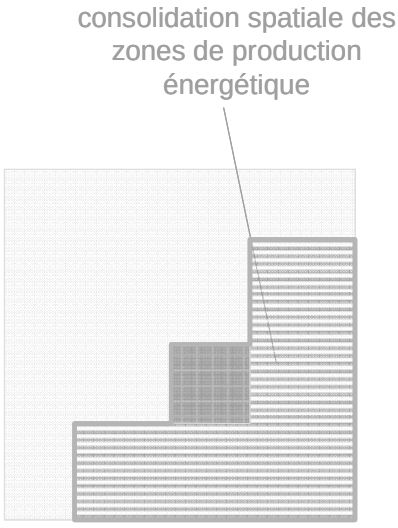
$\langle k|\underline{S}\rangle$ vecteur (*anergie, exergie*) du territoire *k* pouvant par exemple être exprimé en (W ; W)

$\underline{T}_i$ rendement de conversion du gisement renouvelable par la technologie *i* considérée

p_i proportion du territoire *k* occupée par la technologie *i*. Nous verrons comme rapporter en plan masse certains productibles comme l'énergie éolienne par exemple.



Espaces de production énergétique potentiels. Distinguer les parties productives des parties inertes. Ce diagramme fait état de fraction solarisable mais nous pourrions également décrire d'autres types de gisement : géothermie, énergie hydraulique…



Espaces de production énergétique potentielle

Récolter le soleil

Rappels

Constante solaire

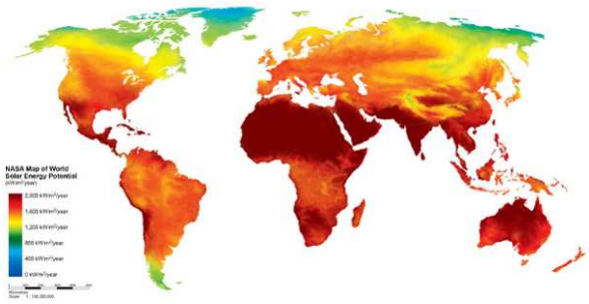
La constante solaire correspond à la quantité d'énergie solaire que recevrait une surface de 1 m² située à une distance de 1 unité astronomique (distance moyenne Terre-Soleil), exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence d'atmosphère.

Pour la Terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère. Cette valeur[168] est de 1361W/m². Elle impacte la zone éclairée du globe. Si on distribue de façon théorique et homogène ce flux de puissance, le rayonnement solaire incident est alors de l'ordre de 340W/m². Cette valeur est théorique : une partie importante du rayonnement est réfléchi ou réémis directement par l'atmosphère.

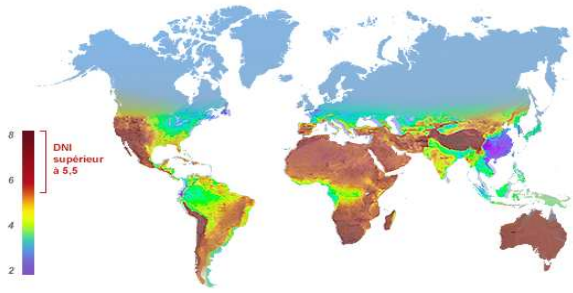
Après avoir traversé l'atmosphère, le flux solaire moyen[169] est alors de 169W/m². Le changement climatique ne devrait très probablement n'avoir pas d'effet sur cette valeur au cours du prochain siècle.

Cette moyenne annuelle varie de 85 à 290 W/m² suivant les régions. Aucune région n'est donc dépourvue d'énergie solaire et l'écart entre les plus riches « solairement » des plus pauvres n'est que d'un facteur trois.

.



Carte du flux solaire moyen en fonction de la situation géographie (irradiation diffuse et directe en kWh/m².an, NASA)



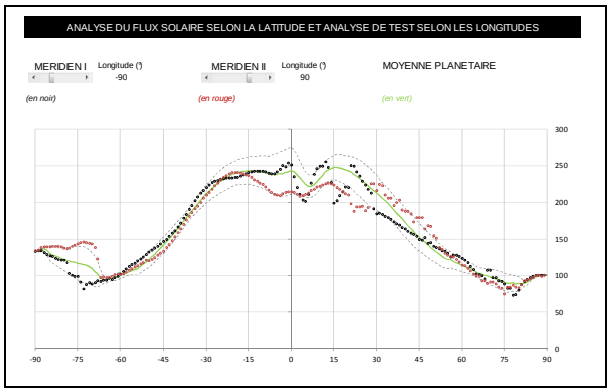
Carte représentant l'irradiation solaire directe (en kWh/m².j) Une carte importante pour évaluer les opportunités de technologie à concentration optique (solaire thermodynamique, photovoltaïque à concentration…)

[168] 1360,8 ± 0,5 W/m² de façon plus précise.

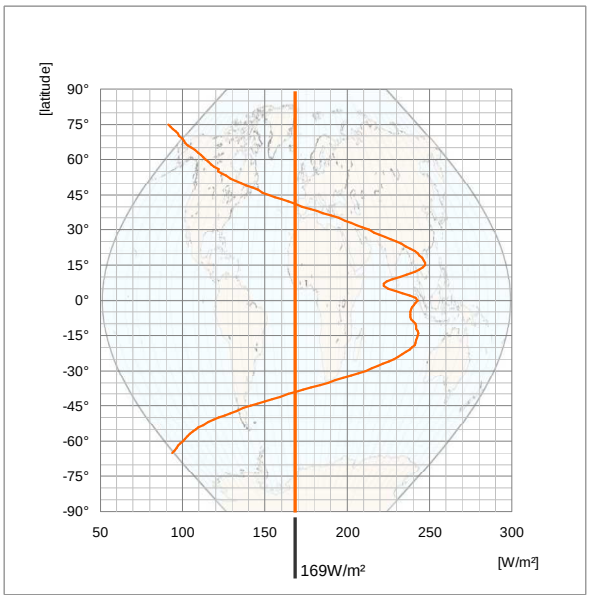
[169] Moyenne sur l'ensemble du globe et sur une année complète.

Corrélations géographiques

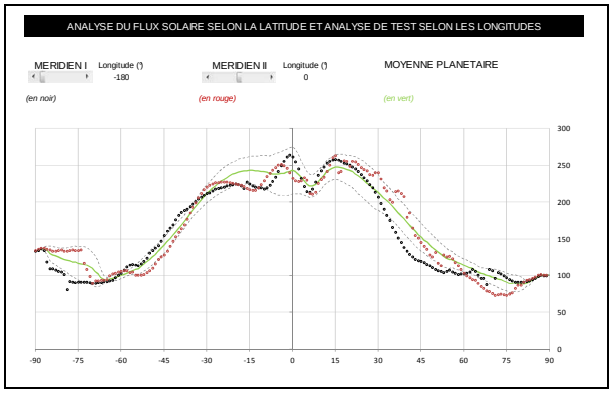
Nous rappelons ci-dessous le graphique déjà exhibée dans les *Représentations*. Il avait été bâti pour construire une représentation de la variabilité de la *demande* et de l'*offre* en fonction de la latitude. En préliminaire à l'évocation des différentes technologies d'*offre*, rappelons que certaines d'entre elles ont des productibles fonctions du gisement solaire disponible.



Graphique de corrélation en latitude de la densité d'offre solaire (irradiation terrestre moyenne). Données source Nasa.



Graphique de corrélation en latitude de la densité d'offre solaire (irradiation terrestre moyenne). 169W/m², valeur moyenne surfacique Données source Nasa.



Graphique de corrélation en latitude de la densité d'offre solaire (irradiation terrestre moyenne). Données source Nasa.

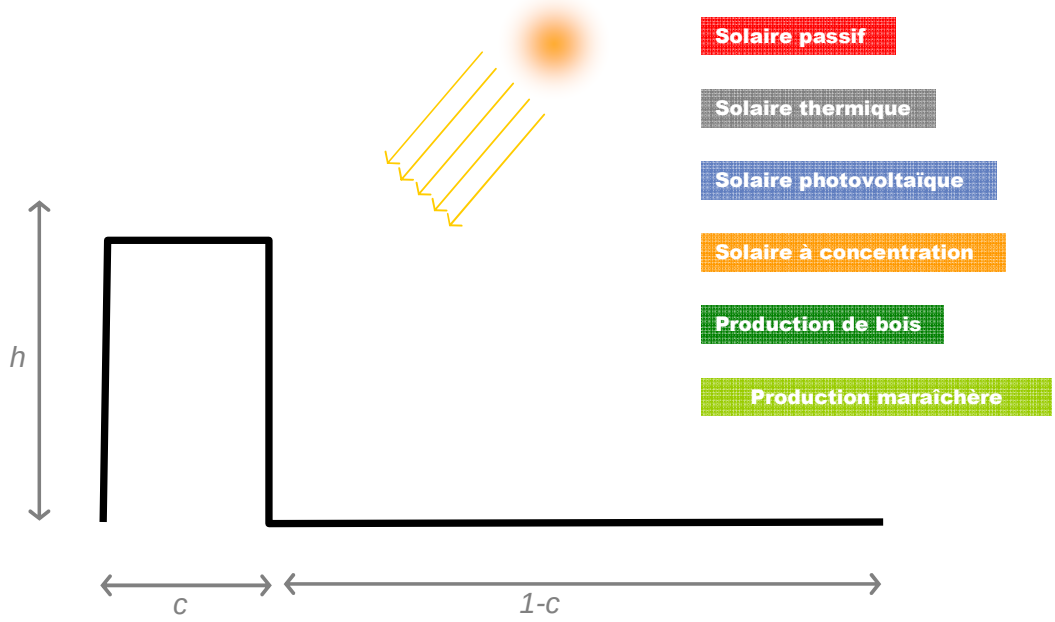
L'espace maritime comme nouvel eldorado de solarisation ? Centrale solaire photovoltaïque de 70 MW installée Kagoshima (Japon) et opérationnelle depuis novembre 2013 (source Kyocera)

Une description par technologies

Cette partie détaille donc par type technologique, la nature du productible énergétique. Dans le prolongement de la description de la donnée énergétique par le couple anergie-exergie (ou énergie et taux d'exergie), nous indiquons des ordres de grandeur de ces rendements de conversion.

Nous prenons aussi le parti de ne pas prendre en compte l'énergie incorporée nécessaire à l'édification, à la maintenance, à l'entretien et au contrôle du dispositif de conversion.

Cette analyse pourra faire l'objet de prolongement de recherche ultérieure. A titre d'exemple, gardons en tête que la demande énergétique pour produire un panneau photovoltaïque est aujourd'hui « rembourser » par environ deux années d'exploitation.



Spectre urbain simplifié et caractérisation des types de productible selon la situation de production sur le bâti (toiture et façade) et hors bâti.

Le solaire passif[170]

Généralités

Le solaire passif est très étroitement associé aux vertus du bioclimatisme. Il peut néanmoins aussi être associé davantage à une stratégie de *réduction de la demande* (et de façon spécifique la diminution de la demande de chauffage pour le bâti) plutôt qu'à un productible particulier de l'*offre*.

Cette production d'énergie correspond à une forme dérivée de solaire thermique avec plan de captage vertical et essentiellement orienté au sud (respectivement nord) dans l'hémisphère nord (resp. sud). Le rendement exergique est très faible du fait d'un écart de température faible[171].

Un gisement intéressant à hautes latitudes

A titre d'exemple, dans l'hémisphère nord, il s'agit de maximiser les gains solaires hivernaux tout en réduisant les pertes d'isolation engendrées par une paroi transparente en remplacement d'un élément opaque. Quelques exemples achevés d'urbanisme solaire ont mit en exergue des morphologies efficaces du point de vue de cette optimisation[172].

L'écoquartier de *BedZed* 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.

Retenons que le gisement de cette technologie est relativement faible : il n'a essentiellement 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. Or, une partie minoritaire de la population mondiale vit à ces latitudes (se reporter à l'analyse de la population selon la latitude dans les *Représentations*).

Il suppose par ailleurs une bonne irradiation solaire directe sans quoi le capteur solaire généré par la baie vitrée n'est pas compétitive par rapport à une paroi opaque, en général bien plus isolante.

Enfin, des études poussées doivent être conduites pour éviter tout risque d'inconfort thermique en situation estivale voire de mi-saison : il ne s'agirait pas d'engendre une *demande* énergétique de rafraîchissement !

Un exemple d'urbanisme récent cherchant à maximiser le solaire passif : le quartier BedZed en banlieue de Londres dessiné par l'agence de Bill Dunster au début des années 2000.

[170] En tant que composante de l'architecture bioclimatique.
[171] D'une trentaine de degrés maximum.
[172] Notons également que la production exergique reste faible.

Formes particulières de solaire passif

Par extension, le mur-trombe fait partie de la terminologie de solaire passif. Il s'agit de fait d'un mur capteur composé d'un bloc de matière à forte inertie qui accumule le rayonnement solaire du jour et le restitue pendant la nuit. Devant cette paroi, on place une vitre pour créer un effet de serre pour chauffer l'air.

En généralisant le principe de solaire passif, on peut également considérer que les parties supérieures du sol chauffées par le rayonnement solaire ainsi que l'air constituent des réservoirs thermiques passifs au sein desquels nous pouvons extraire activement de l'énergie thermique. Dès lors, les pompes à chaleur et les puits canadiens pourraient être associées à des technologies utilisant comme source primaire l'énergie solaire thermique.

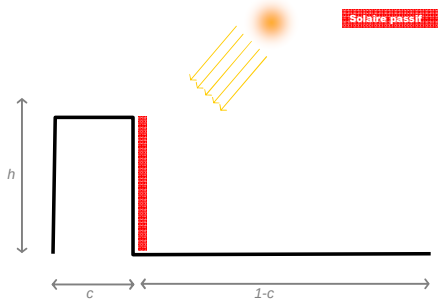
.

Type de production

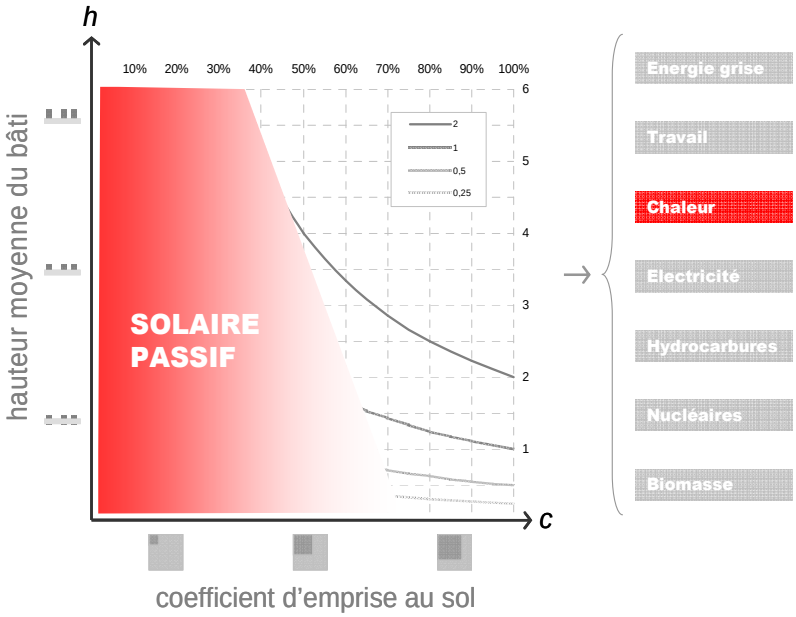
- Chaleur à basse température pour le chauffage.
- Rendement max. ~ 50%
- Contenu exergique < 10%

Environnement de production

- 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) (*c* petit)
- Latitudes plutôt élevées en valeur absolue
- Altimétrie bâtie plutôt réduite pour éviter les ombres portées importances sur le reste du paysage bâti (*h* plutôt faible)



Coupe longitudinale typique de production



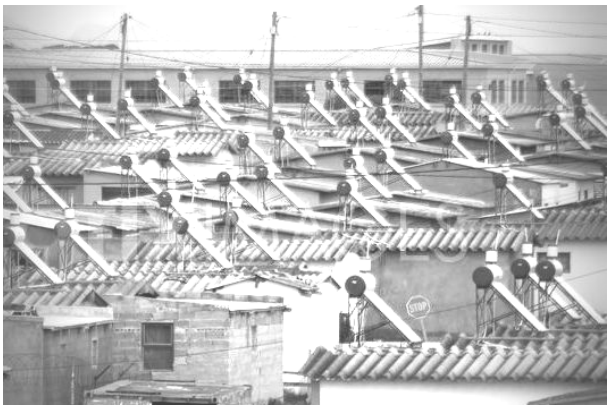
Le solaire thermique

Généralités

Le solaire thermique est simple et robuste. Il propose le rendement le plus important[173] (mais la basse chaleur est une énergie faiblement qualitative[174]). Cette technologie est rudimentaire. Aussi elle est en général destinée à une consommation directe sur le site de production.

Son intégration architecturale est relativement aisée bien que son orientation optimale soit moins triviale[175] que pour le photovoltaïque. La création d'une boucle chaude pour le fluide caloriporteur rend aussi moins aisée son interface avec l'enveloppe bâtie que pour le photovoltaïque.

Exemple de solaire thermique avec des tubes sous vide. La température maximale peut être de l'ordre d'une centaine de degrés.

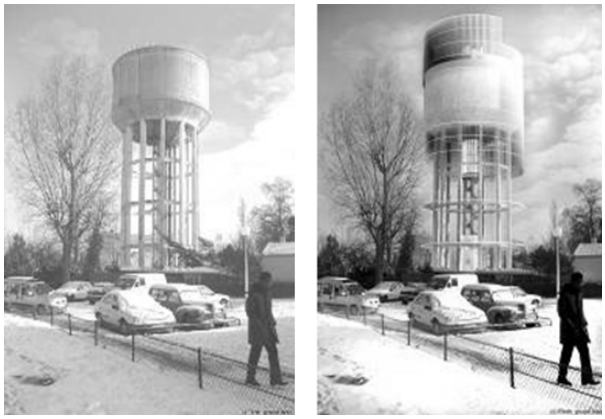


Déploiement massif de solaire thermique avec ballon de stockage pour la production d'eau chaude sanitaire dans les townships en Afrique du Sud.

Le solaire thermique apporte souvent une participation à la production d'eau chaude sanitaire ; de façon moins courante, à la production de chauffage. Et marginalement à la production de froid[176]. Selon le type de technologie[177], l'ordre de grandeur de l'écart de température maximum est inférieur à 100°C.

Ce type d'offre peut aussi être intégré dans des réseaux d'énergie de petite dimension comme des réseaux de chaleur à l'échelle de l'ilot ou du quartier. Par la nature de son offre, la chaleur, son stockage est également relativement aisé. Le solaire thermique peut en particulier très bien se marier avec le stockage intersaisonnier[178].

La « cabine énergétique » de Wörrstadt



Avant / Après : Proposition de reconversion à Montreuil (93) en pile thermique urbaine[179]

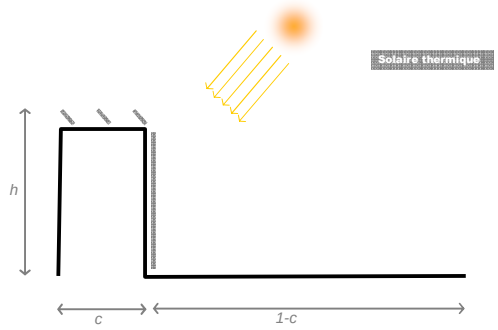
[173] Pouvant facilement dépasser 40% de conversion du gisement incident.
[174] La question de la « qualité » de l'énergie fait l'objet d'un développement à part.
[175] En général supérieur à 45° par rapport à l'horizontal et orienté au sud sous nos latitudes.
[176] Climatisation à absorption ou adsorption mais suppose en général l'emploi de tubes sous vide.
[177] Tubes sous vide, panneaux thermiques derrière vitrages isolants, moquettes solaires, …
[178] Voir le numéro d'octobre 2013 de la revue *Systèmes Solaires*.
[179] Installation de panneaux solaires thermiques et ré-isolation du volume pour stockage intersaisonnier du Château d'eau du Bel-Air (Elioth)

Type de production

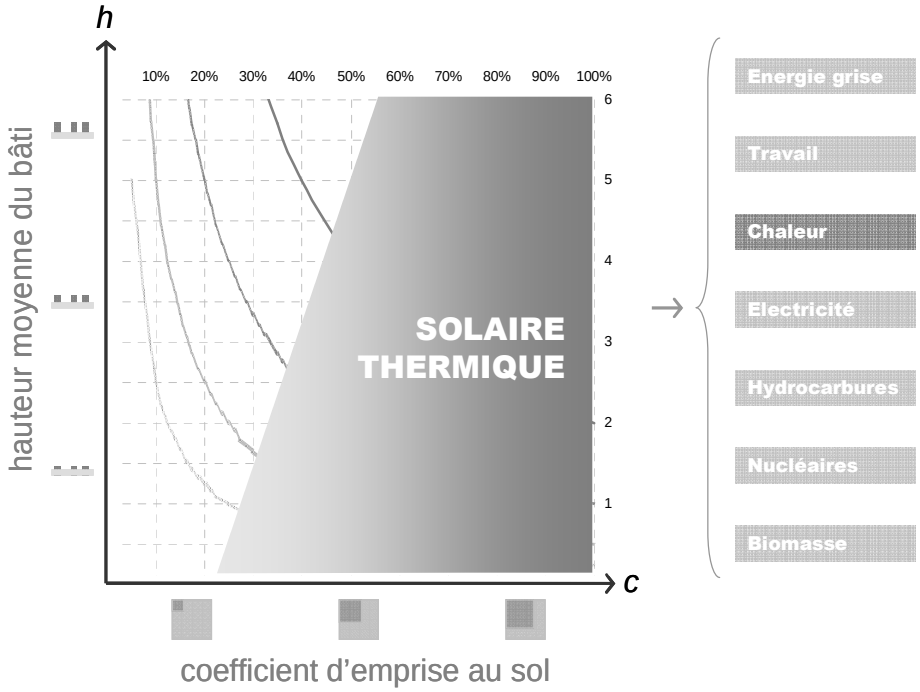
- Chaleur à basse et moyenne température pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire
- Chaleur à moyenne température permettant production de froid par adsorption ou absorption.
- Rendement min. ~ 45%
- Rendement max. ~ 80%
- Contenu exergique < 30%

Environnement de production

- Implantation en général sur la toiture du bâti (mais peut parfois s'installer en façade)
- Inclinaison optimisée pour favoriser adéquation offre-demande, que l'optimisation du productible annuel (d'où en général des inclinaisons relativement élevées)
- Large diffusion dans les pays à fort ensoleillement et en situation urbaine : Grèce, Israël, Afrique du Sud, …



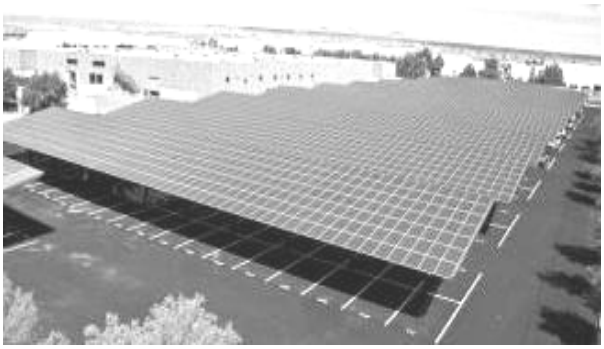
Coupe longitudinale typique de production



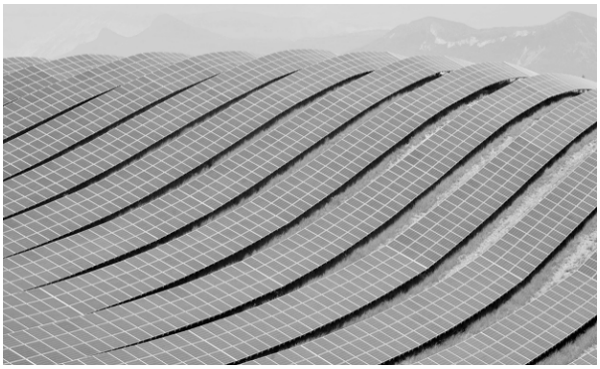
Le solaire photovoltaïque

Généralités

L'effet photovoltaïque permet la production principale d'une *offre d'électricité* à partir du gisement solaire. A l'échelle d'une ferme solaire, son rendement de conversion est environ de 5 à 10%[180]. Le solaire photovoltaïque est très prometteur du point de vue de la facilité de son intégration et de son coût de production[181]. Du point économique, on s'attend à une coïncidence entre le coût marginal de production du photovoltaïque avec le tarif de revente réseau des opérateurs. On attend le *sweet-spot* ou parité réseau pour 2015-2020[182]. Du point de vue technologique, le rendement de conversion des prochaines générations de panneaux photovoltaïques devraient tendre vers 20% voire 25%[183].



Parking photovoltaïque du siège du Groupe Bell à Albuquerque (Nouveau Mexique[184])



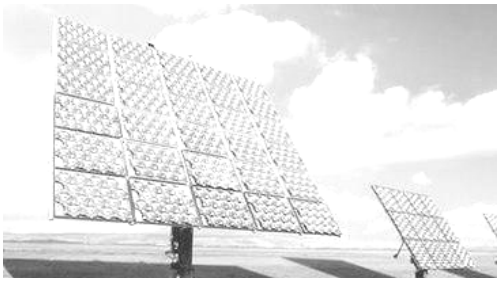
Quelques exemple de mise en œuvre de panneaux photovoltaïques : du bâti à l'exploitation rurale de l'énergie.

[180] A l'échelle du panneau photovoltaïque, le rendement peut aujourd'hui atteindre 15 à 20%. Néanmoins les contraintes physiques d'installation réclament des interstices non producteurs.
[181] Parité réseau effective déjà en plusieurs endroits du globe.
[182]http://www.industrie.gouv.fr/portail/secteurs/enersolairephoto.html
[183] Et ainsi tendre vers puissance-crête surfacique de l'ordre de 250 à 300W.
[184] Surface totale du parking : deux hectares. Surface couverte par les modules 8400 m². Puissance-crête: 1100kW (131 W/m² de module ou 55 W/m² de parking) Énergie électrique annuelle générée: 1600 MWh soit 1450 heures à la puissance-crête.

Intégration urbaine

En situation urbaine, le photovoltaïque est sans doute la technologie disposant du plus bel avenir :

- Elle est silencieuse ;
- L'énergie produite est de plus haute exergie qu'un combustible primaire : la pluralité d'usage de son productible est augmentée ;
- Son intermittence est relativement prévisible ;
- Son rendement de conversion en électricité est intéressant et est appelé à évoluer au cours des prochaines décennies[185] ;
- Son intégration architecturale est relativement simple[186] et elle n'engendre pas de risques particuliers (feu, étanchéité etc.) ;
- Sa pérennité est intéressante[187] et elle requiert un entretien assez faible.
- Enfin les externalités environnementales associées[188] à sa fabrication tendent à diminuer grâce aux évolutions technologiques en cours (amincissement des *wafers*, couches minces, prise en compte du recyclage...)



Solaire photovoltaïque à concentration (rendement de conversion 20 à 25%) et système suiveur (le plan de captage reste perpendiculaire aux rayons solaires) : une production moyenne annuelle pouvant être supérieure à 350kWh électrique par m² de panneau et par an.

[185] L'ordre de grandeur typique est de 10% : il varie cependant entre 5% et presque 20% en fonction des technologies. On attend dans les prochaines années des rendements moyens de 15 à 20%.
[186] Epaisseur faible du complexe producteur, intégration possible dans systèmes verriers, poids surfacique mesuré, etc.
[187] Les rendements sont en général garantis à hauteur de 80% sur 20 ans de vie.
[188] A titre d'exemple, on retient comme ordre de grandeur un remboursement de l'énergie grise au bout de un à deux de production.

Environnement de production

On retient que l'installation du photovoltaïque en situation urbaine trouve une place de choix en l'intégrant en toiture. Mais on peut aussi mettre en exergue une corrélation entre densité et emprise au sol : aussi l'augmentation du productible avec la basse densité n'est pas forcément si automatique.

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 ? Sans faire l'examen complet des avantages et inconvénients des technologies photovoltaïques, on notera toutefois les conséquences éventuelles suivantes :

- Elle souffre des situations de masque partiel[189] ;
- La transformation de l'albédo des toitures et les conséquences éventuelles sur les effets d'îlot de chaleur ;
- La problématique du stockage de l'électricité et les freins pour le développement massif de l'autoconsommation dans le secteur résidentiel (déphasage entre offre et demande).

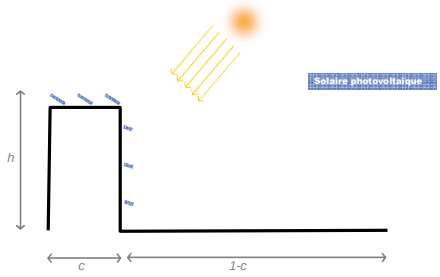
Evolutions technologiques possibles

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). Aussi, on retiendra le développement possible des solutions photovoltaïques combinées assurant une production de chaleur :

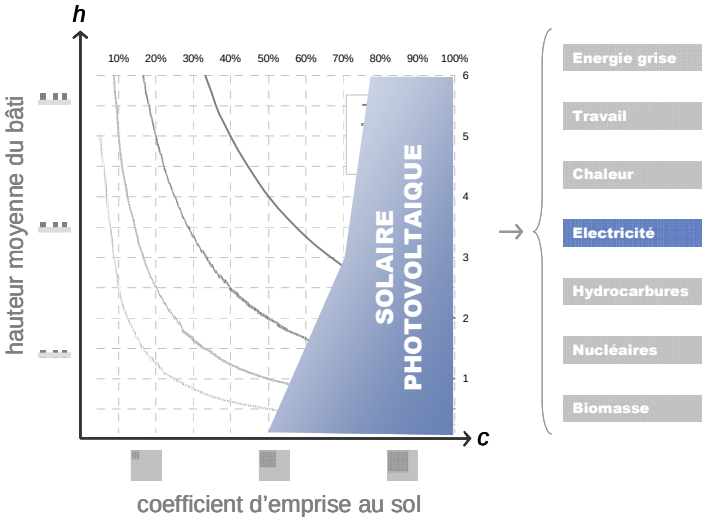
- Une lame d'air réchauffée à l'arrière du panneau pour préchauffage de l'air neuf (et réduire d'autant les besoins en chauffage) ;
- Un échangeur solide-liquide participant à une production de chauffage à basse température ;
- Des systèmes photovoltaïques à concentration (lentilles de Fresnel, miroirs paraboliques ou à double courbure,…) : la chaleur est alors récupérée.

Type de production

- Electricité à basse tension
- Récupération éventuelle de chaleur.
- Rendement max. ~40%
- Contenu exergique ~100%



Coupe longitudinale typique de production



[189] Une ombre portée sur un panneau est susceptible de réduire la production des autres panneaux auquel il est aussi raccordé.

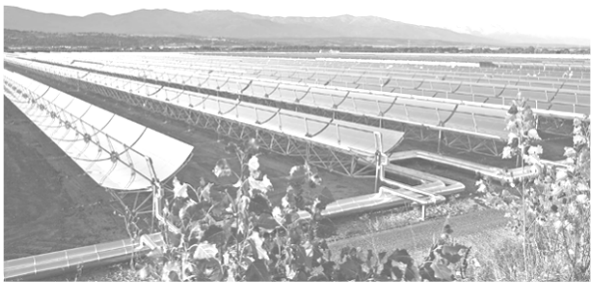
Le solaire à concentration

Généralités

A 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 linéaire (parabolique ou miroirs de Fresnel) connaissent depuis quelques années un très large engouement.

Dans certains zones du globe, fortement ensoleillées et aux cieux clairs, le solaire à concentration est prometteur, *a fortiori* si intégré dans le périmètre urbain : il produit de l'électricité et le « déchet » de chaleur peut alors être potentiellement valorisé.

Ces technologies présentent les avantages d'un rendement de conversion électrique intéressant (un peu supérieur à celui d'un champ photovoltaïque) et également de capacité de stockage de la haute chaleur produite *via* notamment des technologies de type sels fondus : la production électrique peut ainsi être adaptée et lissée sur le rythme de la journée.



Champ solaire avec concentrateurs paraboliques

Trigénération solaire[190]

[190] http://inhabitat.com/mits-all-in-one-solar-orc-to-provide-heat-electricity-and-hot-water-for-african-communities/

Intégration urbaine

A plus petite échelle, on notera les réflexions en cours sur des systèmes analogues à l'échelle domestique. Dans le cas du récent *Solar Decathlon*, le projet *Napevomo*[191] Dans ce cas de figure, le rendement de conversion de l'énergie solaire est tout à fait intéressant : à la différence des centrales installées en situation désertique, la chaleur produite n'est plus un « déchet » mais elle est valorisée.

Dans le cadre de la consultation pour le Grand Paris, une proposition consistait à intégrer à grande échelle des énergies renouvelables en situation urbaine : pourquoi ne pas imaginer que de grands vides urbains (parcs, aires logistiques, …) puissent participer à la production énergétique métropolitaine ?

« 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. »[192]

Solaire thermodynamique à tour. Vers une intégration urbaine[193] *?*

[191] http://www.napevomo.com/Habitat-durable-pour-le-Solar-Decathlon-Europe.html

[192] Extrait de « Introduction au Développement Durable » dans *Naissances et renaissances de mille et un bonheurs parisiens*

[193] dessins de Menard R., *Un Petit Dessin vaut mieux qu'un long discours* (p64 à 71), Perspectives Durables, L'Architecture d'Aujourd'hui, 2011

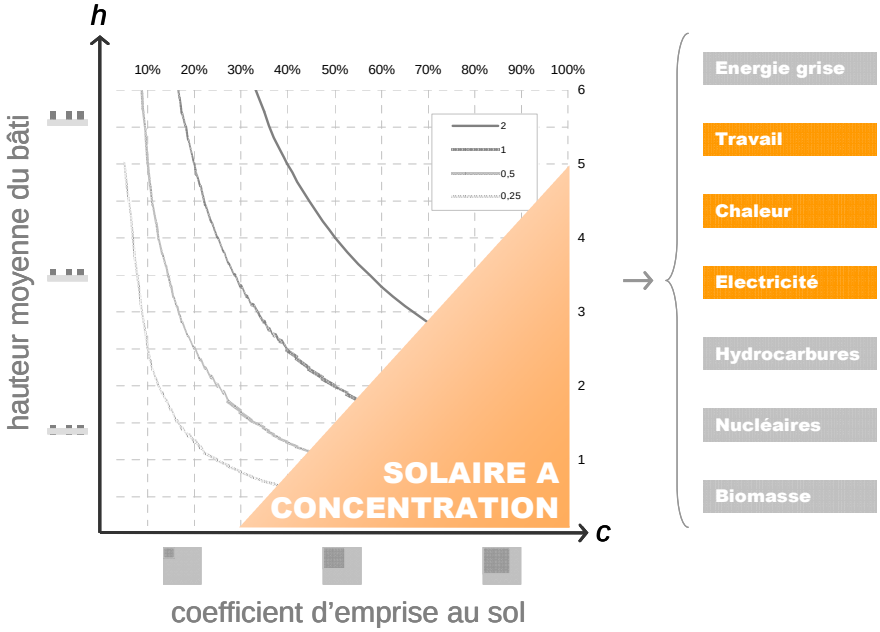
Environnement de production

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 maximisée en valorisant production d'électricité, de chaleur voire également de froid.

Type de production

- Moyenne à haute chaleur
- Rendement max. ~80%
- Contenu exergique <40%

Tracker avec concentration optique à double courbure pour le solaire thermodynamique avec moteur Stirling (source Zenithsolar)



Récolter la photosynthèse

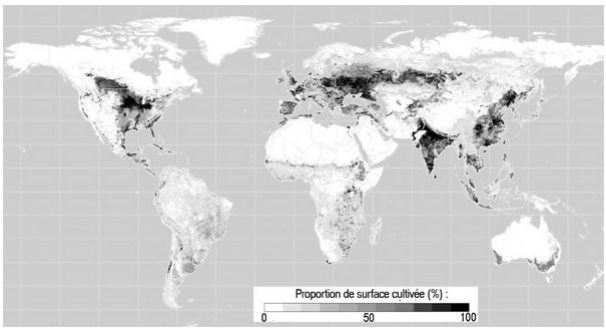
Généralités

La biomasse est la ressource énergétique essentielle à la vie. Alimentation, bois de chauffage, bois pour la construction : l'humanité a conquis l'optimisation de ces récoles depuis le néolithique.

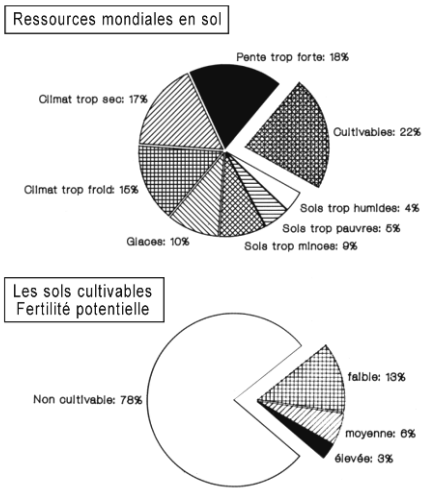
Son rendement de conversion solaire est toutefois faible. La photosynthèse convertit généralement entre 0,1% et 0,5%[194] des quelques 169W/m² frappant en moyenne la surface du globe. Pour nos besoins alimentaires, ils font évidemment composer avec cette belle contrainte d'aménagement du territoire [195]…

La production d'élevage et la production d'aliments d'origine animale ne sont pas évaluées dans cette section : elles ne constituent qu'une production intermédiaire et requiert en amont d'autres types de production d'énergie.

En première approche, nous distinguerons deux productions énergétiques distinctes. Nous remarquerons que de façon générale, le productible est plus important lorsque l'emprise bâti est faible : la production végétale préfère la pleine terre et la réalité du sol. Ce type regroupe l'ensemble des vecteurs finaux d'origine organique et qui ne sont pas directement issus de la transformation de combustibles fossiles.



Cartographie de la proportion des terres cultivées (source Atlas de la Biosphère, Université de Wisconsin, 1999)



Typologie des sols (Source Buringh, 1982)

[194]http://www.ader.ch/energieaufutur/energies/biomasse/index.php

[195] 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

Production maraîchère[196]

Généralités

Jardins ouvriers, potagers, petites productions maraîchères dans un contexte urbain ou périurbain. Bien que le rendement rapporté en énergie primaire soit faible, cette production n'est pas à négliger par sa qualité (elle est comestible) et par les externalités environnementales et énergétiques qu'elle réduit en favorisant l'auto-alimentation des ménages.

Type de production

- Biomasse pour alimentation
- Rendement max. <0,1%
- Contenu exergique faible

Type	Rendement annuel [kg/m².an]	Contenu calorique [kcal/kg]		Rendement moyen brut [%]
Aubergine	2,7	290	▶	0,06%
Carotte	3,5	260	▶	0,07%
Céleri	7,8	380	▶	0,23%
Avoine	0,2	3 850	▶	0,07%
Riz	0,7	2 303	▶	0,14%
Patate	4,1	929	▶	0,30%
Blé	0,2	3 420	▶	0,06%
		rendement moyen		0,13%

Synthèse des valeurs de rendement de production maraîchère (d'après les valeurs de Food Matrix par Craig England)

Exemple de production maraîchère en toiture à Honk-Kong (source Saucy Onion)

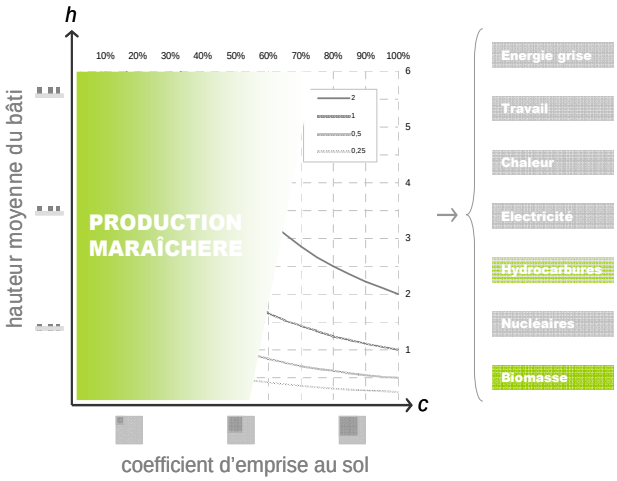


Diagramme (c,h) pour la production maraîchère

[196] Production agroalimentaire.

Production agricole et sylvicole

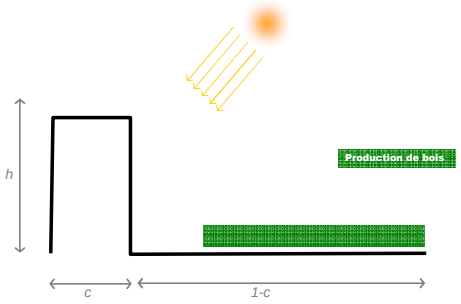
Généralités

Nous évaluons dans cette section la production de biomasse non directement comestible mais pouvant être utile en tant que :

- *Matériau de construction* : utilisation du bois et de l'aubier comme matière constitutive du bâti et du mobilier. Dans ce cas de figure, la production constitue un intrant d'énergie grise.
- *Combustible potentiel* : il s'agit de valoriser la production de biomasse comme bois de chauffe, essentiellement. Ce productible présente également l'avantage d'être assez aisément stockable.
- Enfin, la production agricole peut être aussi associée comme production de biomasse fournissant un combustible assez aisément exploitable comme vecteur énergétique secondaire (exemple des agro-carburants)

Type de production

- Elaboration de matières premières (énergie incorporée) issues de la photosynthèse ;
- Vecteur énergétique sous forme de combustible et permettre ainsi la production de chaleur ;
- Production éventuelle d'hydrocarbures sous forme d'agro-carburants ;
- Rendement max. <1%
- Contenu exergique faible



Coupe longitudinale typique de production

Un exemple récent de construction en bois, musée d'art suisse Thrugau par Tadashi Kawamata

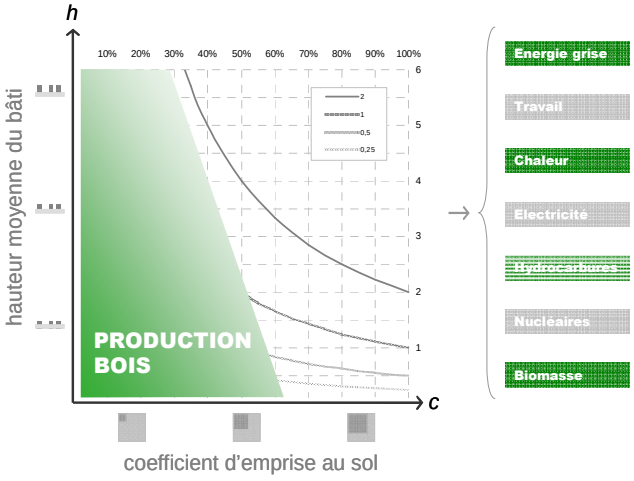
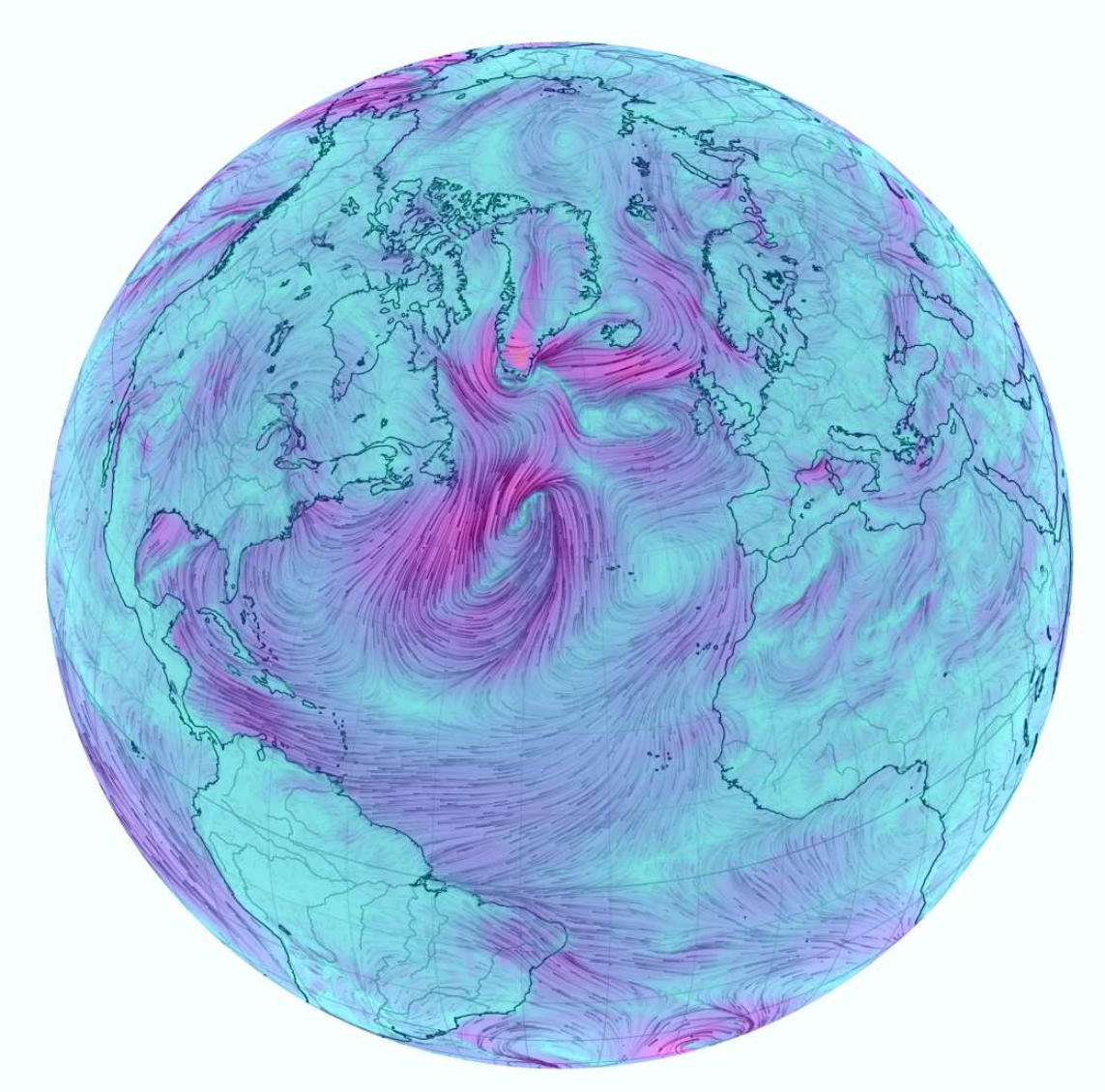


Diagramme (c,h) de production pour le bois



Earth Wind Map par Cameron Beccario. Site internet montrant la dynamique des flux venteux sur une terre en 3d (source http://earth.nullschool.net/) L'énergie éolienne, un moteur cinétique animé par le flux solaire.

Récolter les gisements locaux

Introduction

Nous détaillons brièvement dans ce qui suit quelques situations spécifiques de récoltes potentielles des énergies renouvelables. Elles sont spécifiques dont la mesure où ces productions sont étroitement associées à une situation géographique particulière donnant lieu à une « surdensité » de gisement : flux géothermique localement important, présence d'un cours d'eau possédant débit et vitesse important, couloir venteux particulier, …

Eoliennes offshore à axe horizontal au large de Copenhague : un gisement éolien favorisé par une somme importante de surfaces balayées, à l'échelle métropolitaine.

Photo de Nicky Bonne sur l'île de Samso au Danemark

Récolter le vent

Généralités

Rappelons d'abord que l'énergie solaire (et la variation de sa distribution dans l'espace et dans le temps) est le principal moteur des phénomènes météorologiques, dont les déplacements de masses d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique (ou l'énergie cinétique) de ces déplacements de masses d'air qui est à la base de l'énergie éolienne.

Histoire

Mathieu Arnoux dans *Mille ans de lutte par-dessus les moulins* rappelle l'origine et la diffusion des dispositifs de 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 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. »

Et l'éolien en situation urbaine ?

L'éolien en ville jouit depuis quelques années d'une aura particulière. Cette situation est notamment due au développement des éoliennes à axe vertical[197] (disposant en particulier de pales à portance de type Darrieus) qui présentent plusieurs avantages par rapport à leur cousine à axe horizontal :

- Un plus grand silence de fonctionnement ;
- Un rendement légèrement plus faible mais qui reste intéressant[198] ;
- L'absence de mécanisme suiveur ;
- Et aussi une grande diversité de designs novateurs ;

Retenons cependant que le gisement éolien en situation urbaine est :

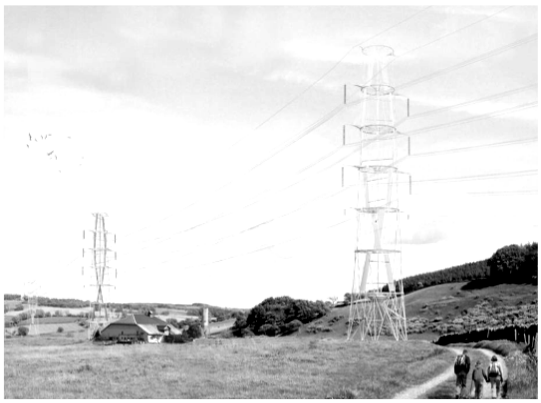
- Largement minorée par la rugosité aéraulique engendrée par le bâti ;
- Fortement turbulent dans la couche limite.

De façon générale, le gisement éolien est aussi caractérisé par une très forte intermittence : la question du raccordement au réseau ou de la concordance disponibilité-besoin reste dès lors problématique. Aussi, la connexion au bâti est susceptible d'engendrer des pathologies de confort associées aux vibrations.

Le micro et le petit éolien en ville reste donc un gisement faible voire anecdotique mais qui reste cependant intéressant pour l'autonomie énergétique du mobilier et de l'éclairage urbain. Le moyen et le grand éolien trouve parfois des territoires urbains d'intégration : on pense notamment aux éoliennes off-shore à proximité de Copenhague.

Type de production

- Energie mécanique
- Rendement max. <60%
- Contenu exergique <100%
- Entre[199] 2 et 3W/m²



Un exemple d'éoliennes à axe vertical : le système Wind-it (source Elioth et Encore Heureux)

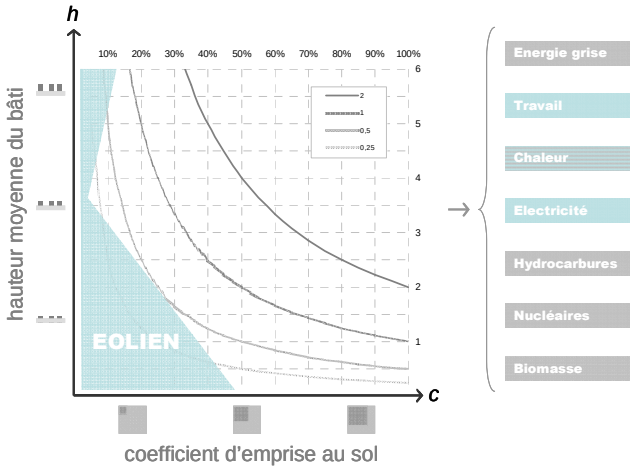


Diagramme (c,h) de production pour l'énergie éolienne

[197] Retenons les modèles *Windspire, Turby* et *QuietRevolution*.
[198] Le coefficient de performance peut être compris entre 0,2 et 0,4. Pour rappel la limite théorique de rendement d'un aérogénérateur est la limite de Betz dont la valeur est d'environ 0,59.

[199] Valeur moyenne de productible rapporté en surface horizontale. Source McKay, p209, tableau 25.1

L'hydraulique

Généralités

Le petit hydraulique[200] est une énergie de flux : la capacité de production annuelle est donc largement dépendante du rapport entre la section du (des) cours d'eau rapporté à l'aire urbaine de référence. Retenons que, sauf pour hameaux et villages, ce ratio est trop faible pour que ce gisement puisse participer à une production significative.

« *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.* »[201]

Histoire

Mathieu Arnoux dans *Mille ans de lutte par-dessus les moulins* insiste sur le rôle historique cette production énergétique :

« 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 Xe siècle est marquée 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 de récupération de l'énergie hydraulique susceptible de multiples usages.

Des forges équipées de marteaux hydrauliques apparaissent au XIIe 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. »

Type de production

- Energie mécanique
- Contenu exergique <100%

[200] 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.

[201] Mathieu Arnoux, Mille ans de lutte par-dessus les moulins. Mathieu Arnoux, Le Temps des laboureurs. Travail, ordre social et croissance en Europe, Xe-XIVe siècle, Paris, Albin Michel, 2012.

La géothermie

La prise en compte du flux géothermique

Nous bénéficions encore d'un flux de chaleur rémanent issu de l'activité nucléaire du noyau terrestre. La distribution de ce flux peut parfois se localiser spatialement pour offrir des gisements potentiels importants.

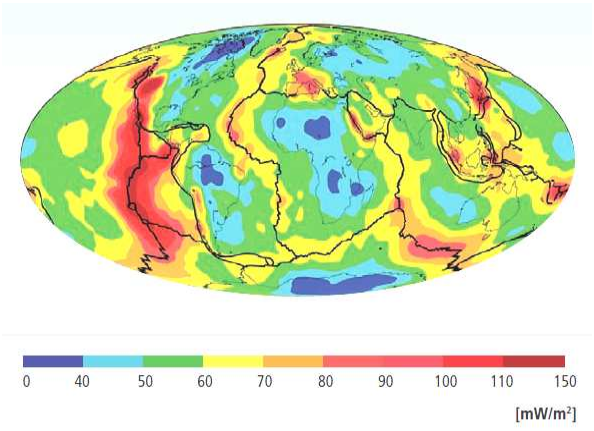
Rappelons toutefois que le flux moyen énergétique est bien plus faible que le gisement solaire : de l'ordre de 0,06W/m² à comparer à environ aux 169W/m² issus du solaire et de ses dérivés.

Par ailleurs la qualité de ce flux est également plus faible : alors que le taux exergique solaire est de l'ordre 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 plus difficilement exploitable : sa part d'énergie libre est bien plus faible.

Un rôle singulier

Néanmoins, pour des raisons pédagogiques mais aussi historiques, il est nécessaire de rappeler la présence de ce flux : François Roddier[202] cite notamment le rôle central qu'a pu avoir cette source dans l'apparition de la vie sur Terre, et ce, antérieurement à l'apparition des cellules capables de réaliser la photosynthèse.

Enfin, le flux géothermique peut jouer localement un rôle énergétique central dans l'approvisionnement d'un territoire : songeons aux centrales électriques utilisant les sources chaudes en Islande ou en Martinique. Il s'agira donc de prendre en compte cette énergie potentielle du dessous comme une entrée possible d'énergie sur un territoire.



Cartographie de la densité de gisement géothermique. La moyenne planétaire est de 59mW/m² (source IPCC)

[202] *Thermodynamique de l'évolution*, François Roddier

La basse géothermie

La géothermie est disponible de façon continue et les installations sont en général peu perceptibles en surface. Le flux géothermique moyen est 0,06W/m² : si l'on compare au flux solaire moyen[203] (en divisant l'insolation annuelle par 8760 heures), le flux géothermique montre une disponibilité de chaleur équivalente à un système solaire dont le rendement serait alors de 0,05%[204] !

La haute géothermie

Citons pour mémoire les capacités de génération d'électricité et de chaleur.

Type de production

- Chaleur à basse et moyenne température
- Rendement max. <100%
- Contenu exergique <30%

Bain en Islande dans le lagon bleu (source Reuters / Chris Helgren)

[203] De l'ordre donc de 125W/m² pour une insolation de 1000kWh par m² horizontal et par an

[204] ~0,06/125

Cartographies d'offre

Les plans de récolte énergétique, outil de projet

Voir le mix de l'offre d'un territoire

Au terme de cette rapide exploration des différentes techniques permettant d'augmenter la *solarisation* d'un territoire, nous proposons ci-après la mise en œuvre d'une *représentation* permettant d'exprimer de façon didactique la nature du *mix de l'offre* sur un territoire donné.

Cette analyse synthétise la méthodologie finale permettant de conclure l'évaluation de l'*offre* à différentes échelles de projet ; elle permet également d'évaluer chaque situation comme un *système solaire* en puissance, délivrant une *offre* d'une certaine quantité et d'une certaine qualité. Cette méthode pourra permettre les évaluations des scénarios 2050 pour l'outil *Reforme (solar-reforme.org)*.

Quelques exemples

Nous avons ainsi réalisé des cartographies de l'*offre* énergétique actuelle, puis projetée, pour différents types de tissus urbains, dans différentes situations géographiques et à différentes échelles de mesure.

Retenons qu'au titre des implémentations pédagogiques, cette méthode a été testé dans le cadre du *DPEA Architecture post-carbone* dans le cadre du sujet *« 2000 personnes à 2000W »*. Le lecteur pourra se référer à la fin de ce rapport pour avoir de plus large développement sur l'emploi des plans et des coupes de récolte par les étudiants dans le cadre de leur production, dans cinq géographies mondiales distinctes.

Situations géographiques

Le flux solaire incident varie en fonction de la situation géographique, nous avons sélectionné trois situations différentes :

	Latitude	Flux solaire moyen
Paris	45°	130 W/m²
Mexico	15°	250 W/m²
Meru	0°	240 W/m²

Rappelons-nous que la différence entre les flux solaires moyens peut avoir un impact sur le résultat du productible final (en W/m²) lorsque les techniques de conversion implémentées possèdent un productible croissant avec le gisement solaire (cas par exemple du photovoltaïque).

Paris

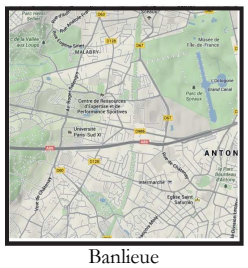
Mexico

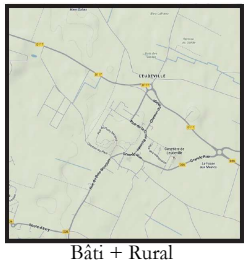
Meru

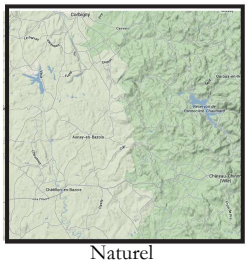
Typologies de territoire

La typologie urbaine a quant à elle un impact sur la capacité à collecter l'énergie solaire incidente et donc sur le rendement solaire équivalent du territoire. Nous pouvons distinguer les typologies suivantes :

Centre urbain


Banlieue


Bâti + Rural


Naturel

Echelles d'analyse

Nous avons également réalisé l'exercice sur plusieurs échelles territoriales. Cela peut avoir un impact sur le lissage de la quantité et de la qualité du productible selon l'échelle d'analyse. Ce point fait écho à la définition de la densité de population déjà évoquée au début de la deuxième partie, dans la *Formalisation*.

Echelle de l'ilot	250 x 250 m
Echelle urbaine	10 x 10 km
Echelle régionale	100 x 100 km

Descriptif de l'analyse

Nous avons réalisé pour chaque situation :

- Une cartographie de l'offre énergétique locale ;
- Une représentation simplifiée de la répartition des surfaces de production énergétique ;
- Le calcul du taux de solarisation global équivalent du territoire ainsi que du taux d'exergie ;
- Une représentation des valeurs obtenues dans le diagramme anergie-exergie.

La typologie utilisée pour cartographier l'offre[205] énergétique est la suivante :

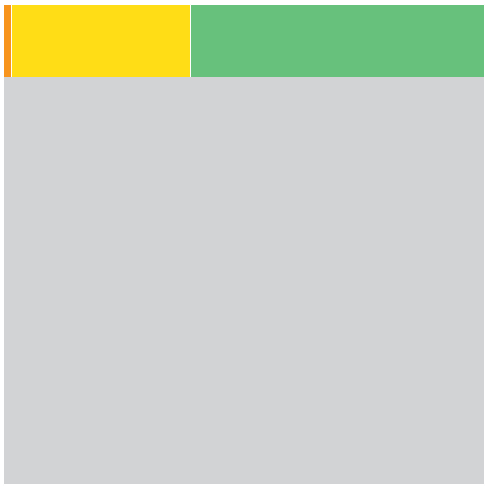
	Rendement moyen	**Taux d'exergie moyen**
Improductif	0%	0%
	Rdt. solaire	
Solaire photovoltaïque	~ 10%	~ 100%
Solaire thermique	~ 40%	~ 15%
Biomasse	~ 0,1%	~ 30%
	Rdt. surfacique	
Eolien	~ 2 W/m²	~ 100%
Autres solaires	~ 10 W/m²	~ 100%
Géothermie	variable	~ 20%

[205] On pourra aussi se référer aux valeurs de Mc Kay dans *L'énergie durable, pas que du vent*, notamment dans le tableau 25.2

Quartier Pajol, Paris, Ile-de-France | 250x250 m

2014 : état actuel

Carré de 250 par 250 mètres autour de la halle Pajol en 2014



Répartitif du productible en 2014

Solarisation globale ……..	**0,7%**
Taux d'exergie ……	**87%**
Improductif ……..	85,0%
Solaire photovoltaïque ……..	5,6%
Solaire thermique ……..	0,2%
Biomasse ……..	9,1%

2020 : situation projetée

Carré de 250 par 250 mètres autour de la halle Pajol en 2020

Répartitif du productible en 2020

Solarisation globale ……..	**1,8%**
Taux d'exergie ……	**42%**
Improductif ……..	73,2%
Solaire photovoltaïque ……..	5,6%
Solaire thermique ……..	3,0%
Biomasse ……..	18,2%

Quelques enseignements

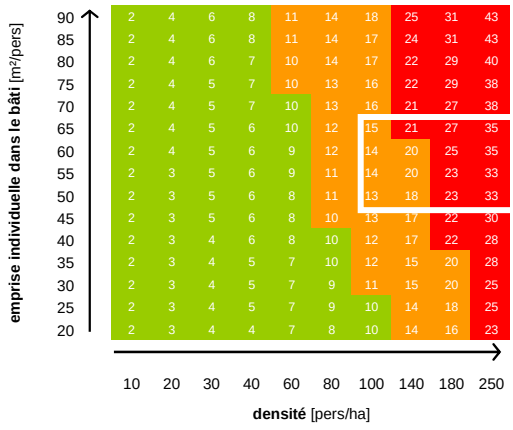
Cette situation urbaine révèle en 2014 un niveau moyen de solarisation de l'ordre de 0,7% (soit une densité d'*offre*) de l'ordre de 1W/m². De façon projetée en 2020, ce ratio pourrait tendre vers 1,8% soit une densité d'offre légèrement supérieure à 2W/m².

Rappelons-nous les résultats issus des diagrammes (*d,e*) de demande en reprenant les résultats du *scénario 4*, le plus ambitieux.

Si l'on considère que la densité urbaine dans ce quartier est relativement similaire à celle de Paris intra-muros, nous analysons alors les valeurs comprises entre 100 et 250 habitants par hectare. Dans la situation la plus favorable, la densité de demande serait alors de 10W/m² (pour une emprise individuelle dans le bâti extrêmement faible) ; de façon plus raisonnable, retenons une valeur de 50m² par personne. Dès lors, la densité de demande serait alors de 20W/m².

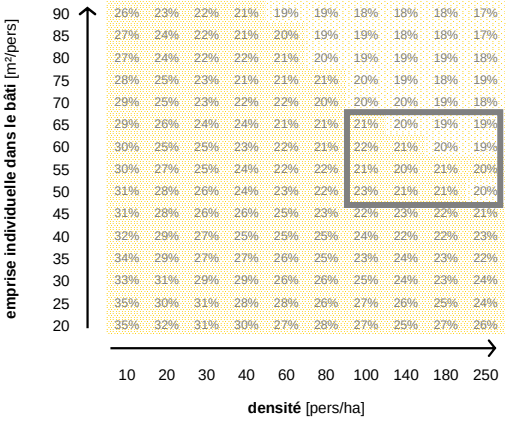
En confrontant cette dernière valeur à l'*offre* potentielle à horizon 2020, nous constatons alors que la production de ce territoire ne permettrait d'assurer que 10% des besoins énergétiques quantitatifs. Notons cependant que le taux d'exergie de l'offre serait supérieur à celui de la demande.

Densité de demande énergétique [W/m²]



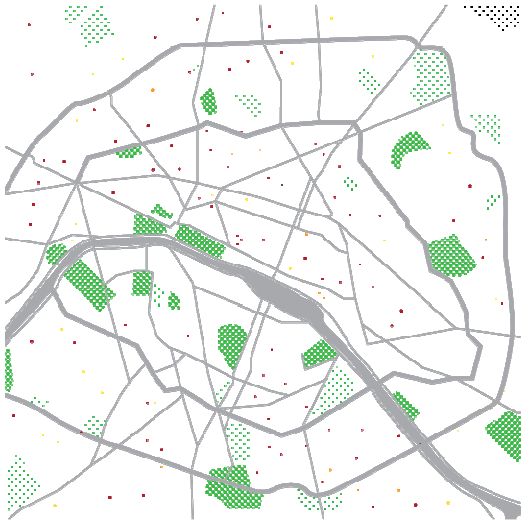
Extrait du « scénario 4 » de la demande

Taux d'exergie [%]

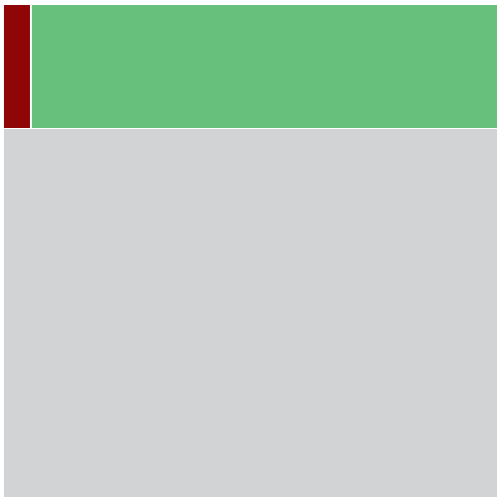


Paris, Ile-de-France | 10kmx10km

Situation en 2009



Carré de 10 par 10 kilomètres autour de Paris

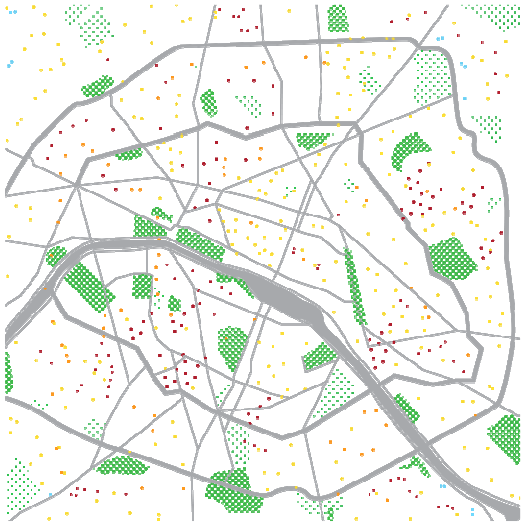


Répartitif du productible en 2009

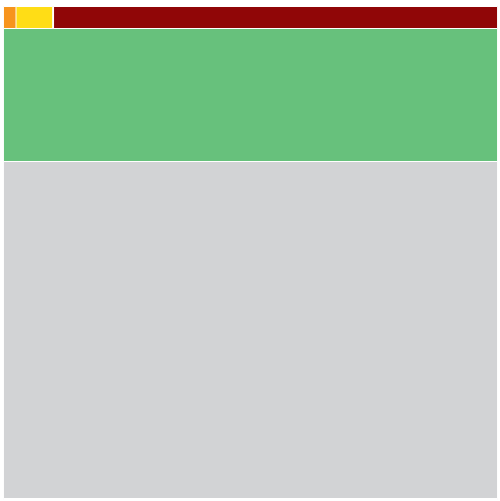
Solarisation globale …….. 0,8%
Taux d'exergie …… 20%

Improductif ……..	75,5%
Solaire photovoltaïque ……..	0,01%
Solaire thermique ……..	0,01%
Biomasse ……..	23,7%
Géothermie ……	0,80%

Potentiel 2020



Carré de 10 par 10 kilomètres autour de Paris, état projeté



Répartitif du productible projeté

Solarisation globale …….. 2,1%
Taux d'exergie …… 21%

Improductif ……..	69,1%
Solaire photovoltaïque ……..	0,3%
Solaire thermique ……..	0,1%
Biomasse ……..	28,5%
Géothermie ……	2,0%

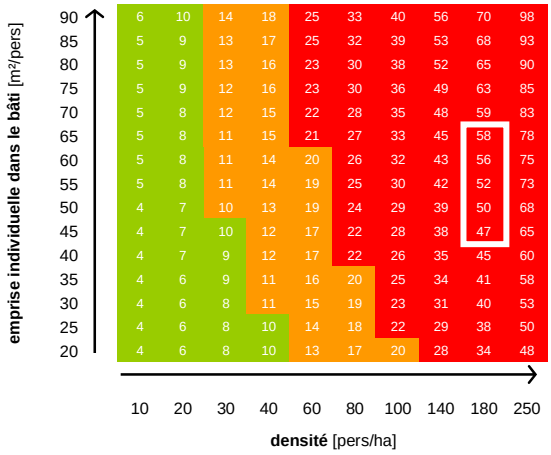
Quelques enseignements

Pour ces deux plans de récolte, nous notons le rôle important joué par la géothermie. Pour le scénario projeté, elle produit plus de 2,5W/m².

Cette valeur est bien évidemment supérieur au flux moyen géothermique (rappelé précédemment dans l'analyse par technologie), y compris en tenant compte du gisement plus important disponible en Ile-de-France. Les fortes puissances géothermiques installées (pour les réseaux de chaleur parisiens et pour les grands équipements publics) exploitent de fait une forme passive de l'énergie solaire récupérée par les sols.

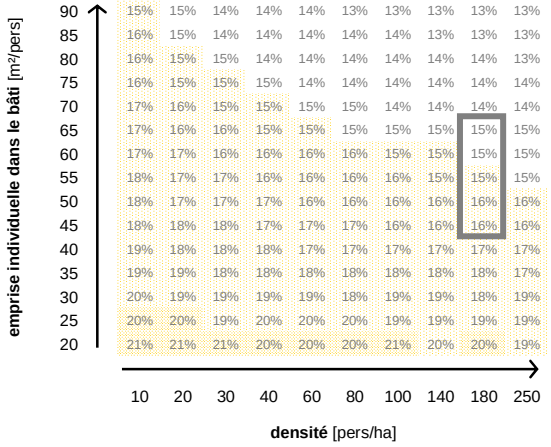
Confrontons ces résultats au diagramme (*d,e*) de demande en reprenant les résultats du *scénario 2*. On constate que l'*offre* projetée (environ 2,7W/m²) est très inférieure à la densité de *demande* (environ 50W/m²) dans la situation du *scénario 2*. Dans ce cas de figure, l'autonomie énergétique à cette échelle serait alors de l'ordre de 5%.

Densité de demande énergétique [W/m²]



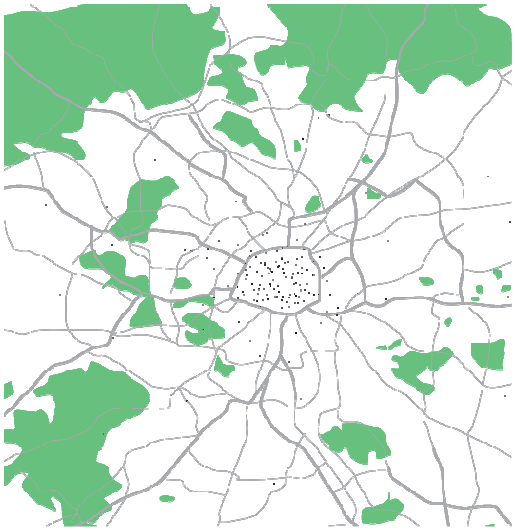
Extrait du « scénario 2 » de la demande

Taux d'exergie [%]

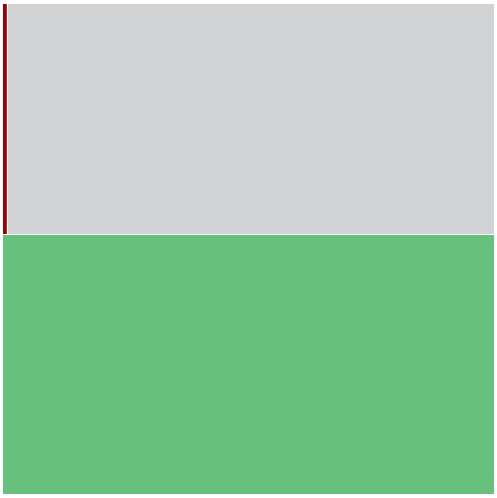


Ile-de-France | 100kmx100km

2014 : Etat actuel



Carré de 100 par 100 kilomètres

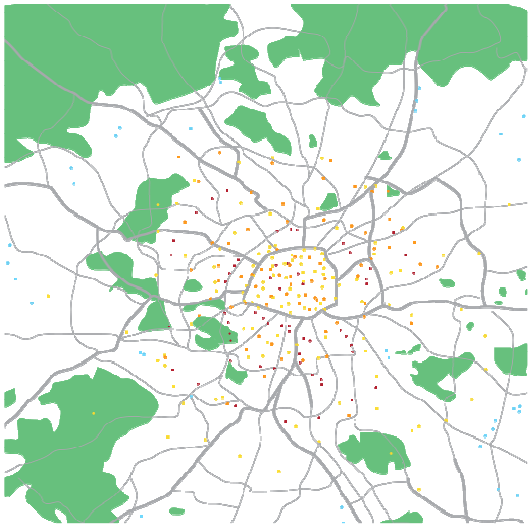


Répartitif du productible, état actuel

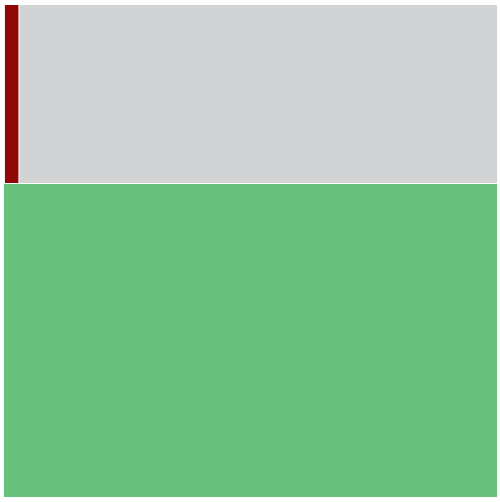
Solarisation globale …….. 0,3%
Taux d'exergie ……. 21%

Improductif ……..	47%
Solaire photovoltaïque ……..	0,001%
Solaire thermique ……..	0,0004%
Biomasse …….	53%
Géothermie ……	0,3%

Etat projeté



Carré de 100 par 100 kilomètres (état projeté)



Répartitif du productible, état projeté

Solarisation globale …….. 0,7%
Taux d'exergie ……. 27%

Improductif ……..	36%
Solaire photovoltaïque ……..	0,1%
Solaire thermique ……..	0,02%
Biomasse …….	64%
Géothermie ……	1%

Quelques enseignements

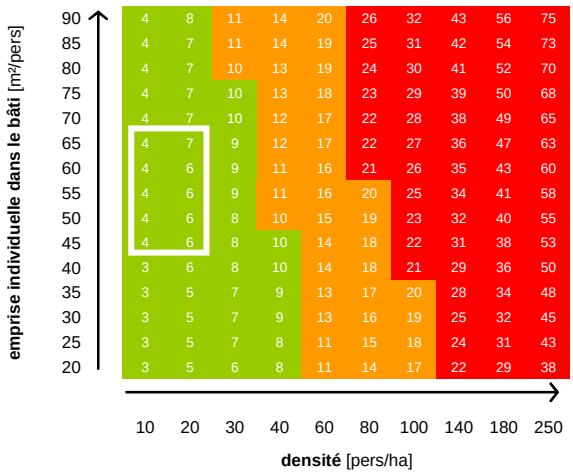
Pour ces deux plans de récolte, nous notons encore une fois le rôle important joué par la géothermie. Pour le scénario projeté, elle produit environ 0,7W/m².

Confrontons ces résultats au diagramme (*d,e*) de demande en reprenant les résultats du *scénario 3* et en se basant sur une densité moyenne de l'Ile-de-France légèrement supérieure à 10 personnes par hectare.

On constate que l'*offre* projetée (moins de 1W/m²) est inférieure à la densité de *demande* (environ 5W/m²) dans la situation du *scénario 3* (ce qui supposerait une mise en œuvre volontaire pour renforcer efficacité et sobriété). Notons que dans le scénario projeté, l'Ile-de-France comporte une surface totale de 6,5 millions de m² de panneaux photovoltaïques.

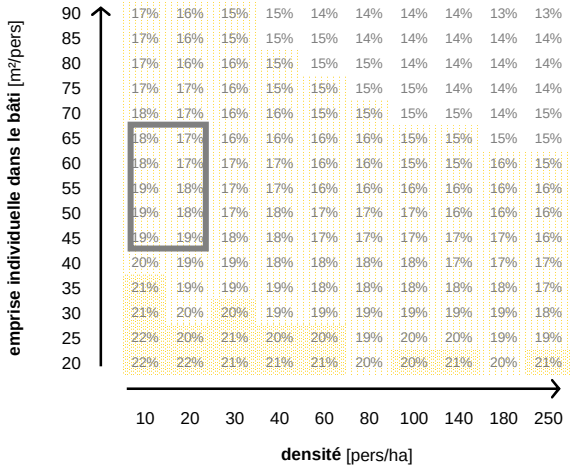
Dans ce cas de figure, l'autonomie énergétique à cette échelle serait alors de l'ordre de 20%.

Densité de demande énergétique [W/m²]



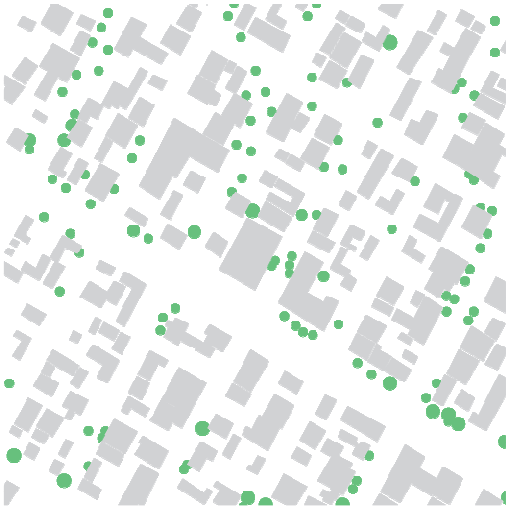
Extrait du « scénario 3 » de la demande

Taux d'exergie [%]



Mexico, Mexique | 250 x 250 m

2014 : Etat actuel



Quartier de Mexico. Carré de 250 par 250 mètres

Solarisation globale ……..	**0,002%**
Taux d'exergie ……	**30%**
Improductif ……..	96,5%
Biomasse …….	3,5%

Etat projeté

Quartier de Mexico. Carré de 250 par 250 mètres. Etat projeté

Solarisation globale ……..	**1,1%**
Taux d'exergie ……	**40%**
Improductif ……..	89%
Solaire photovoltaïque ……..	2%
Solaire thermique ……..	2%
Biomasse …….	7%

Meru, Kenya | 250 x 250 m

2014 : Etat actuel

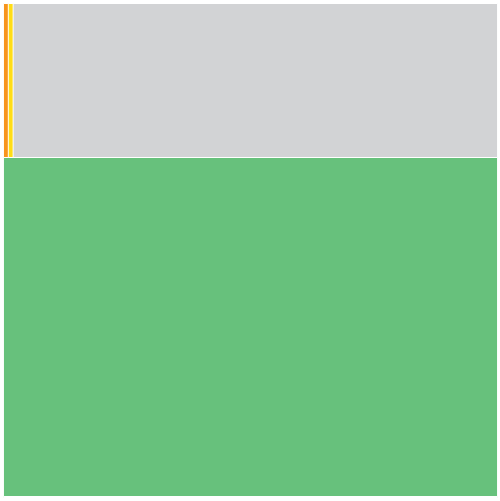
Quartier de Mexico. Carré de 250 pa r 250 mètres

Solarisation globale …….. 0,05%
Taux d'exergie ……. 30%

Improductif ……..	28%
Biomasse …….	72%

Etat projeté

Quartier de Mexico. Carré de 250 par 250 mètres



Solarisation globale …….. 0,2%
Taux d'exergie ……. 43%

Improductif ……..	31%
Solaire photovoltaïque ……..	0,3%
Solaire thermique ……..	0,3%
Biomasse …….	69%

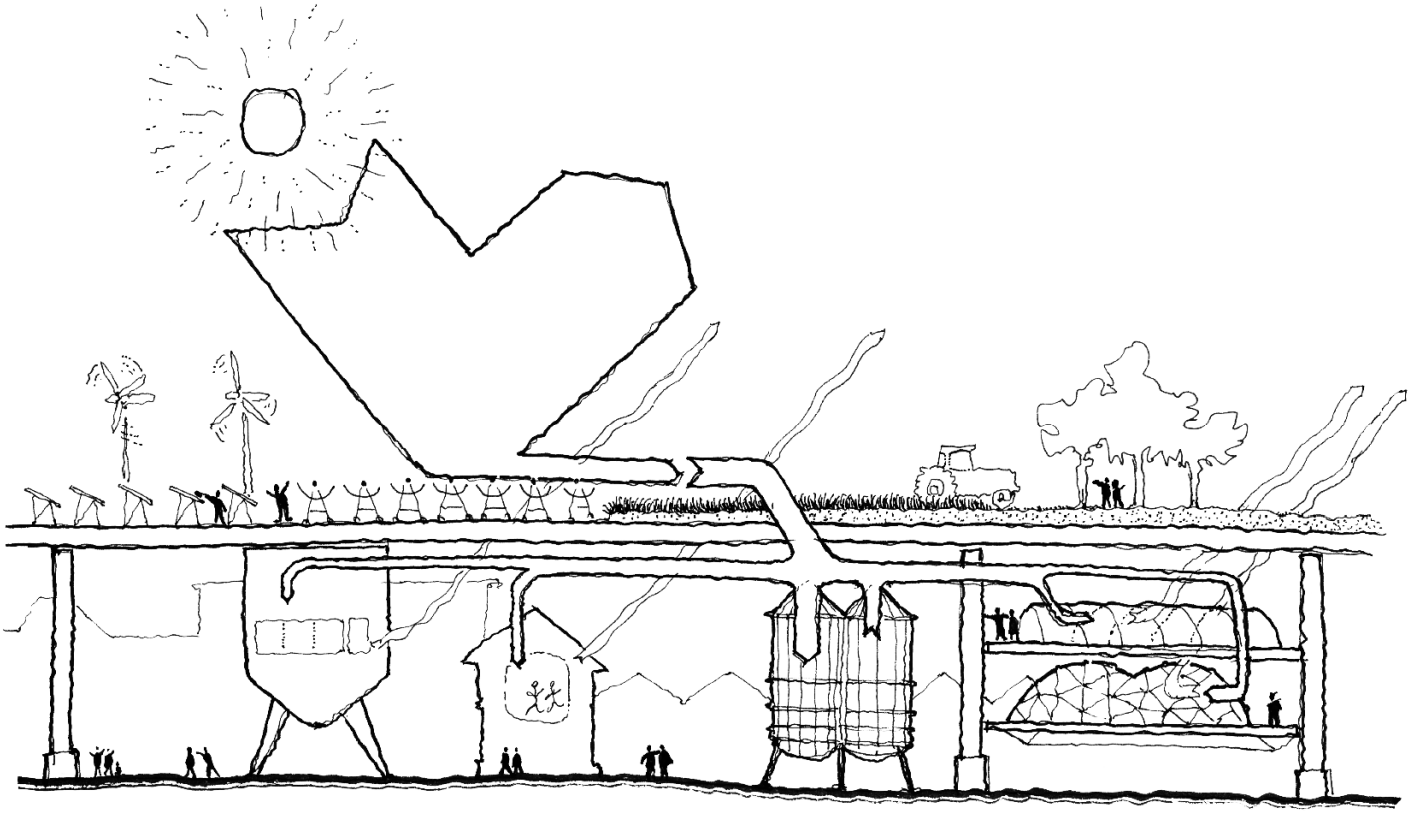


Schéma de principe d'une Infrastructures Solaires Urbaines (voir la troisième partie, les Métamorphoses) : une issue pour la résolution de l'adéquation offre-stock-demande à l'échelle locale ?

Synthèse de la deuxième partie

Dimensionnement architectural

Introduction

Pour première synthèse, et sur la base des documentations opérées dans les sections précédentes, nous développons ici une première analyse à l'échelle locale d'adéquation entre *demande* et *offre*. L'étude ici menée prend appui sur le développement du formalisme mathématique issu de la *Formalisation* et notamment du test de décomposition des *qualités énergétiques* selon la forme utile de l'énergie, *l'exergie* et son « déchet », l'*anergie*. A l'instar de l'analyse précédente, les calculs effectués sous-tendent de « petits plans de récolte » à l'échelle des bâtiments et des programmes testés.

Nous testons en premier lieu le logement en analysant la somme des différentes charges énergétiques, la décomposition de la *demande* selon à la fois la globalité des usages comme également l'amortissement des stocks d'énergie incorporée, tant immobiliers que mobiliers. Les outils de calculs que nous avons développés intègrent aussi la *demande* énergétique associée à l'alimentation et aux besoins de mobilité. Le périmètre d'évaluation de la *demande* est dans cette situation plus large que celui mesuré pour le modèle (*d,e*).

En résultat de ces entrées, l'outil indique alors l'adéquation de l'*offre* énergétique dans la perspective d'assurer une *autonomie totale*, dans le premier cas du logement, et dans le second pour un bureau.

Selon également la définition des paramètres d'usage, et notamment l'emprise spatiale individuelle, nous en déduisons alors la hauteur maximale de chacune de ces typologies programmatiques et pouvant également en déduire une densité maximale selon le choix opéré pour l'emprise bâti.

Retenons aussi que ce travail initie la réflexion qui sera plus largement développé dans la partie suivante, les *Métamorphoses* en posant d'abord les termes des enjeux altimétriques, géométriques et en conséquence possible vis-à-vis des densités de population.

Scénario pour les logements

Scénario 1, Paris, Haussmannien R+5, 2013

Pour ce premier scénario, la *demande* énergétique est formulée selon quelques premières caractéristiques usuelles de performances du bâti et des usages. L'emprise individuelle a été définie à 30m² de plancher.

Les besoins de chauffage sont estimés à 150kWh par m² et par an et correspondent à une demande à faible taux d'exergie, de l'ordre de 5%.

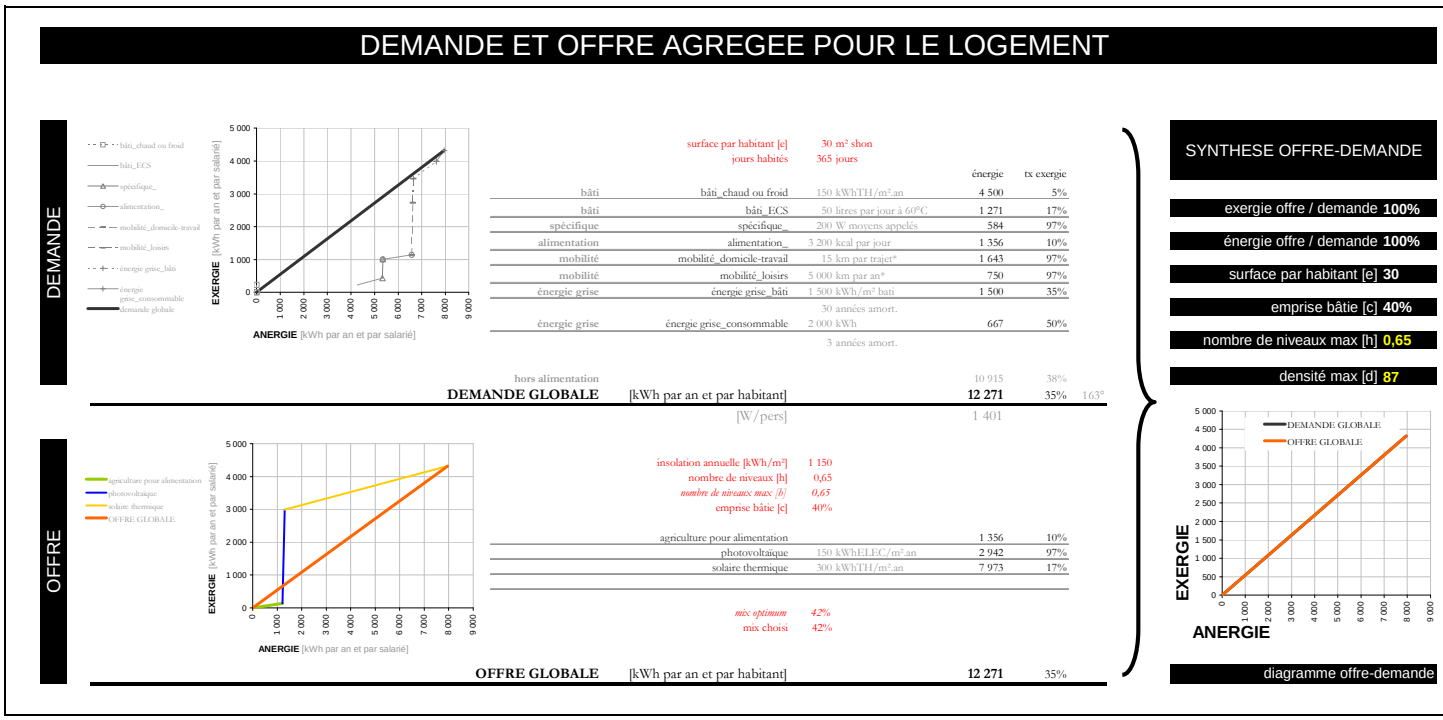
Les besoins individuels d'eau chaude sanitaire correspondent à la définition usuelle, de l'ordre de 50 litres par jour et par personne. La température est d'environ 60°C ; la *qualité énergétique* doit donc être supérieure à celle du chauffage.

Les usages spécifiques pour l'électricité (gadgets, électroménagers, …) sont évalués à 200W moyen par personne et correspondent alors à une consommation annuelle individuelle de l'ordre de 600kWh d'électricité. Rappelons-nous que nous avions pris des valeurs plus élevées pour les quatre scénarios des modèles *(d,e)* mais celles-ci recouvraient la somme de l'ensemble des usages spécifiques (logement, bureau, équipement public etc.) La *qualité énergétique* de l'électricité est très élevée et quasi-égale à 100%.

Nous agrégeons ensuite quelques besoins associés à la mobilité, tant pour la prise en compte de la moitié des déplacements domicile-travail, que pour une prise en compte d'un budget énergétique associé à la mobilité de loisirs. Retenons aussi la prise en compte des besoins alimentaires, évaluées ici 3200kcal par personne et par jour, comme l'intégration de l'amortissement des énergies incorporées associées à des durées d'obsolescence.

Pour le dimensionnement de l'*offre* permettant de fournir la globalité de cette *demande*, nous considérons que les réponses techniques seront portées par des productions solaires : le solaire photovoltaïque permettant d'assurer une grande qualité de production via la génération d'électricité, et le solaire thermique produisant de l'énergie à moyenne température.

Notre outil calcule alors le ratio optimal d'implémentation de ces deux technologies sur la *totalité de la toiture de l'édifice*. Les valeurs de productible pour les technologies sont alors les suivantes : 150kWh d'électricité par an et par m² par le photovoltaïque et 300kWh de chaleur par les panneaux solaires thermiques par m² et par an.



Dans la représentation bidimensionnelle de la donnée énergétique, solaire photovoltaïque et solaire thermique propose une *base vectorielle* permettant de décomposer la demande selon deux composantes de dimensionnement.

Pour ce qui concerne, la production de l'*offre alimentaire*, nous faisons l'hypothèse que l'essentiel de la production sera assurée par l'espace rural, selon la dualité évoquée dans les sections précédentes. Pour cet exercice, et son prolongement dans le cadre des *Infrastructures Solaires Urbaines,* nous tachons de développer l'idée de circuits courts d'approvisionnement énergétique pour les besoins urbains.

En résultat de ce premier scénario, nous retenons alors les informations suivantes. La *demande individuelle* consolidée est de l'ordre de 12000kWh par an (et avec un taux d'exergie de 35%). Le flux de cette *demande* correspond alors à plus de 1400W. Cette valeur est assez proche de la référence de 1800W pour le logement évalué dans le cadre de la démarche de *Société à 2000W* et l'estimation des besoins actuels pour une société aujourd'hui à 6000W.

Pour parvenir à assure une autonomie totale, et donc de *permanence énergétique*, il s'agirait alors que le nombre de niveau soit inférieur à l'unité ! La densité maximale serait alors inférieure à 90 habitants par hectare.

Si l'on réduit l'objectif d'autonomie à 30% (et donc l'*offre* produite par le toit est le tiers de la *demande*), le nombre de niveaux est alors de 2 et correspond à un R+1. Dans cette hypothèse, la densité maximale serait alors de 270 habitants par hectare.

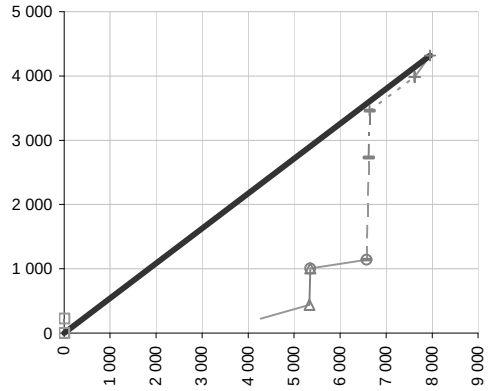


Diagramme anergie-exergie et estimation de la demande pour le logement pour le scénario 1 (en kWh par an et par habitant)

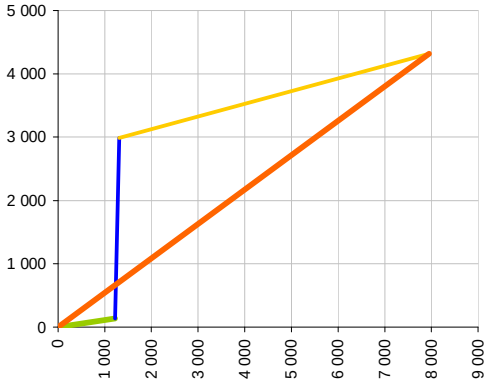


Diagramme anergie-exergie et réponse de l'offre pour le logement dans le cas du scénario 1 (en kWh par an et par habitant)

exergie offre / demande **100%**

énergie offre / demande **100%**

surface par habitant [e] **30**

emprise bâtie [c] **40%**

nombre de niveaux max [h] **0,65**

densité max [d] **87**

Synthèse morphologique et en densité pour tendre vers 100% d'autonomie anergie et exergie pour le scénario 1. Une autonomie limitée à 30% autoriserait une altimétrie de type R+1 (le nombre de niveaux h serait environ de 2 dans ce cas)

Scénario 2, banlieue francilienne, maison individuelle à très basse consommation, 2050

Pour ce scénario prospectif, nous tachons de modéliser une réduction importante de la *demande* comme un accroissement potentiel de l'*offre* avec l'amélioration des rendements des technologies solaires.

Pour un logement individuel, nous avons aussi augmenté l'emprise individuelle à 40 m², ce qui en général le cas pour le logement individuel. En situation périurbaine, nous considérons aussi que les effets de masque sont réduits et que la conception a pu bénéficier d'une grande performance du bioclimatisme des baies. L'isolation est parfaite, comme l'efficacité énergétique du traitement d'air. Les besoins de chauffage sont estimés à 20kWh par m² et par an, soit un niveau comparable aux bâtiments passifs contemporains.

Les besoins individuels d'eau chaude sanitaires sont de 30 litres par jour et par personne, en encourageant sobriété et récupération de chaleur fatale issue de l'électroménager (machines à laver par exemple). Grâce au *monitoring* des usages et à l'efficacité des appareils, les usages spécifiques pour l'électricité (chauffage, électroménager, …) ont été réduit à 100W moyen par personne.

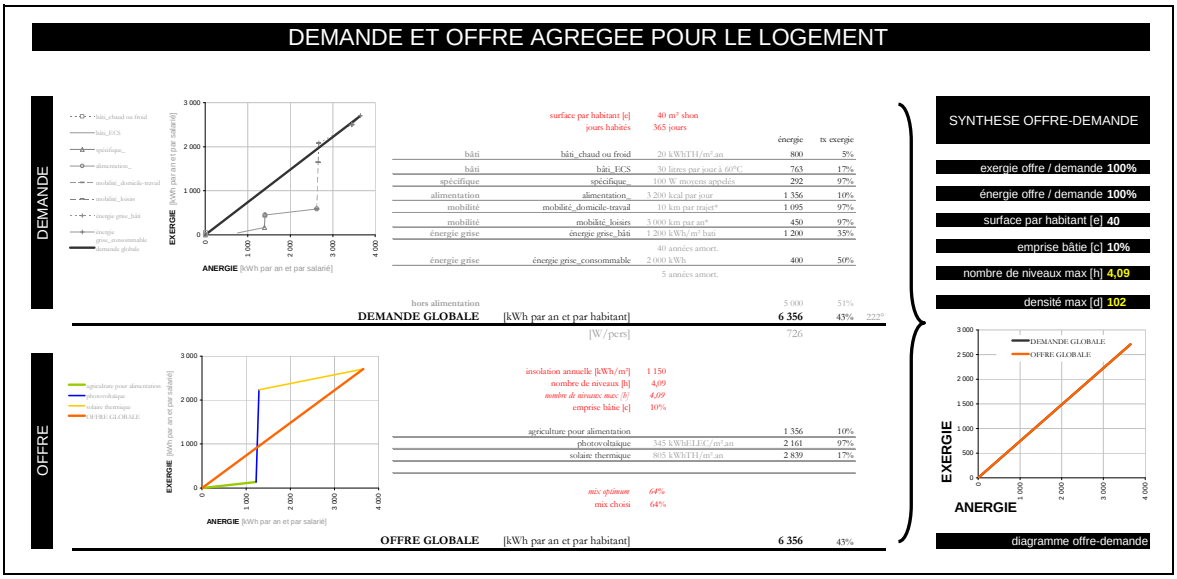
Enfin, l'amortissement du *stock d'énergie incorporée* du bâti a été fortement limité par une très bonne conception de cette maison : matériaux et mise en œuvre à faible énergie grise et réflexion globale sur l'accroissement de la durée de vie caractéristique du bâti.

Pour les énergies stockées « mobilières », les obsolescences ont été augmentées : on répare dans cette maison et on évite de trop consommer ! Même posture de sobriété pour la mobilité : déplacements doux et peu énergivores sont choisis, bien que la situation périurbaine limite l'offre de transports collectifs. L'intensification du covoiturage permet néanmoins d'assurer la totalité des besoins et des désirs de mobilité.

En résultat de ce deuxième scénario, la *demande* individuelle a diminué de moitié par rapport au premier scénario : 6000kWh par an soit un peu plus de 700W. Ce scénario commence à tendre vers l'enveloppe de 500W alloué au logement dans le cadre de la *Société à 2000W*.

Par contre, le taux de qualité de la demande a augmenté et est passé de 35% à 43%. Cela supposera notamment d'augmenter la quote-part de l'électricité par rapport à la chaleur dans la constitution de l'*offre*. Pour assurer l'offre, nous considérons ici, que 35 ans plus tard, le rendement typique des technologies solaires aura notablement augmenté. Le rendement du photovoltaïque passe alors de 10% à 30% ; celui des panneaux thermiques passent à près de 70%[206].

Dans ce scénario, et sous l'hypothèse d'une emprise bâtie de 10%, *l'autonomie énergétique* est possible sous réserve de limiter la hauteur à 4 niveaux maximum. Les morphologies seraient alors bien plus denses que dans le scénario précédent ! La densité reste par contre limitée, du fait d'une emprise bâtie réduite. Nous retrouverons le même type de dimensionnement altimétrique avec les *Infrastructures solaires urbaines* dans la dernière partie, les *Métamorphoses* (



[206] Avec la mise en place de solutions efficientes de stockage de la chaleur.

Scénario 3, Shanghaï, tissu continu, 2013

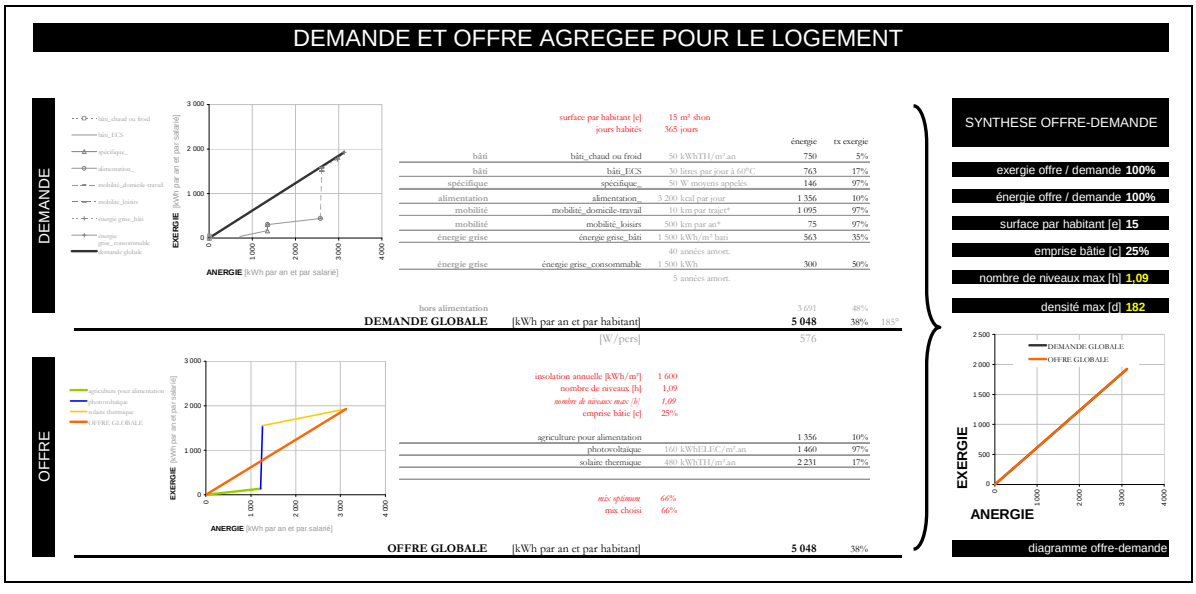
Nous souhaitons également ouvrir de façon plus globale ces dimensionnements, en testant des situations géographiques où :

1. L'emprise individuelle est bien plus faible (et ne correspond pas aux « standards » occidentaux de confort) ;
2. De la prise en compte d'une *demande* spécifique plus faible associée à un niveau de vie moins élevé ;
3. Mais en tenant compte en contrepartie d'un gisement solaire plus important.

Ce type d'élargissement géographique est aussi testé dans le cas des scénarios de dimensionnement des *Infrastructures solaires urbaines*.

Selon ces hypothèses, la *demande* individuelle est alors faible, et d'ordre de 600W (soit comparable au scénario 2050 en Ile-de-France). Toutefois pour garantir la *permanence énergétique*, le tissu devrait proposer uniquement des rez-de-chaussée : ce résultat est notamment la conséquence de l'emprise spatiale individuelle de 15m².

A contrario, et du fait de cet intensité d'usage, la densité pourrait atteindre près de 200 habitants par hectare dans la mesure où l'emprise bâtie serait de 25%. Pour assurer une autonomie de 100%, il faudrait alors que le bâti soit de plain pied. Cette toise altimétrique correspond au tissu traditionnel de Shanghaï.



Scénarios pour le tertiaire

Scénario 1, première couronne francilienne, bâtiment R+5

Pour le bureau, la nature de la *demande* énergétique diffère sensiblement de celle du logement. Sous nos latitudes, l'intensité spatiale d'usage est aussi plus dense : 10 à 15 m² par employé contre 25 à 50 m² par habitat pour le logement.

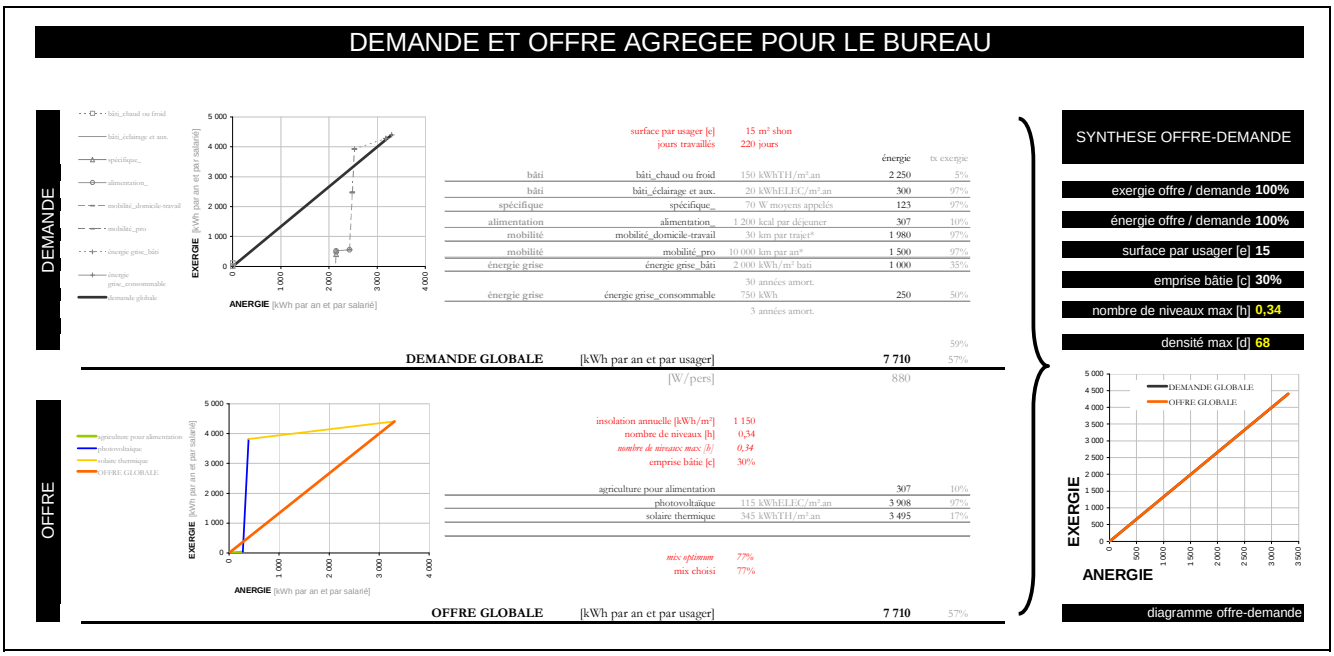
Le budget de la *demande* prend ici également en compte les déplacements professionnels. Par hypothèse, ils sont dans le bilan, « imputés » au bâtiment hébergeant les activités. Les charges alimentaires ont été réduites et ne prennent uniquement en compte que le repas du midi, assuré pendant les quelques 220 jours ouvrés.

Enfin, les paramètres d'énergie grise diffèrent aussi sensiblement. La production immobilière d'un bâtiment de bureau coûte sensiblement plus, au sens énergétique, et sa durée d'obsolescence est sans doute plus faible.

En résultat de ce premier scénario pour le bureau, nous retenons que la *demande* énergétique individuelle est près de 8000kWh par an[207] ; le ratio de *qualité* (taux d'exergie de la *demande)* que est important et avoisine les 60%.

Nos bureaux réclament plus d'énergie à *haute qualité* que nos logements. La production d'informations et les besoins de communication nécessitent en effet intrinsèquement de l'énergie de très haute qualité. La consommation d'exergie est nécessaire pour produire de la néguentropie.

En flux moyen d'énergie, l'emprise est proche de 900W. Pour parvenir à assure une autonomie totale, et donc de *permanence énergétique*, il s'agirait alors que le nombre de niveau soit de 0,3. Enoncé différemment, un bureau rez-de-chaussée ne pourrait assurer que 30% de sa demande globale d'énergie.



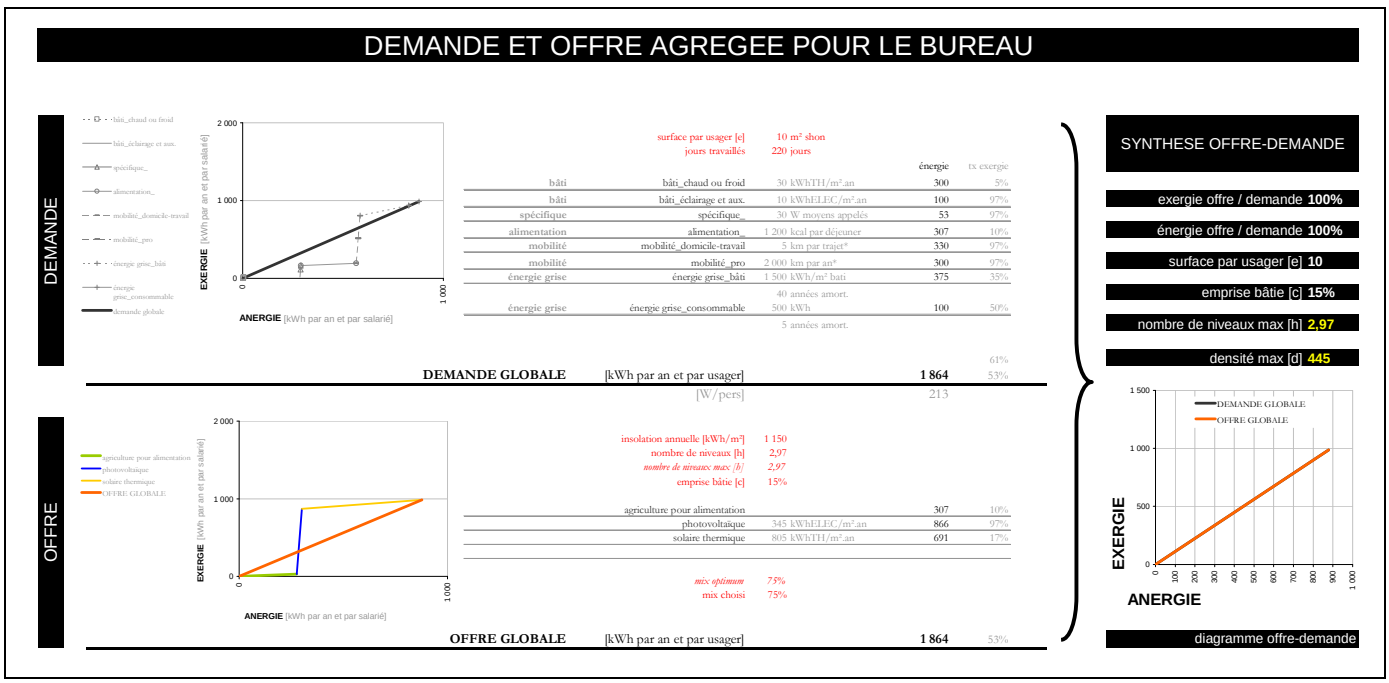
[207] Référence à *Work in Process.*

Scénario 2, bureau super-passif en Ile-de-France, 2050

Pour cette prospective, nous implémentons le même type d'entrée que celle pour le *scénario 2 du logement*. Efficacité et sobriété à tous les étages, rendements considérablement augmentés des technologies solaires.

Dans cette situation, où des efforts considérables ont été effectués sur les mobilités, le flux de *demande* est passé à environ 200W, soit un facteur 4 par rapport au scénario précédent.

L'amélioration de la *densité d'offre* par les technologies solaires permet alors espérer passer en R+2 et garantir alors la perspective de la *permanence énergétique*. La densité maximale d'emplois peut alors presque atteindre 500 emplois par hectare dans l'hypothèse où l'emprise bâtie est de 15% et que le taux de vacances du bâti soit proche de zéro.



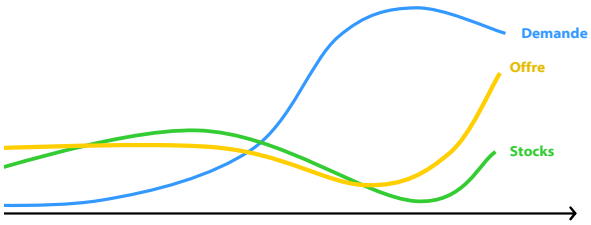
Faire adhérer demande et offre

Modèles de transition

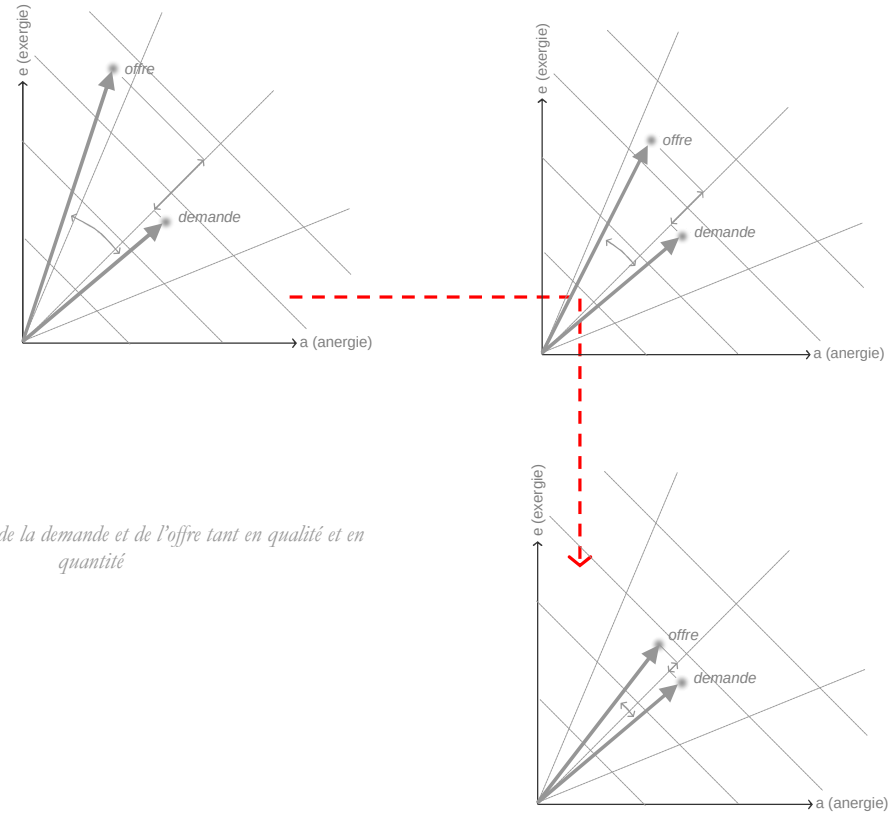
Par sa dimension calculatoire, la *Formalisation* a mis en exergue les arguments quantifiés permettant de tester les faisabilités -à certains termes- de la convergence entre *demande* et *offre*, à l'échelle des territoires.

Parallèlement, le développement de l'écriture dans l'espace *E* (anergie et exergie) de la *demande* puis de l'*offre* permet également d'évaluer les rapprochements tant en *quantité* qu'en *qualité* des intrants et de la consommation attendue.

La confrontation des cartographies de *demande* (diagrammes de contenu *d,e*) et les cartographies d'*offre* (diagrammes de contenant *c,h*) ont permis également de mettre à jour que le paramètre de densité de population contrôlait très fortement les ratios atteignables d'autonomie énergétique.



Les dynamiques énergétiques à installer sur les territoires. Des trajectoires de mutation permettant : de contrôler la demande (rapportée en W/m²), d'augmenter rapidement l'offre tout en mettant en adéquation les productibles finaux avec les besoins identifiés, puis d'augmenter les stocks locaux pour davantage de robustesse d'approvisionnement énergétique.



Tester les convergences de la demande et de l'offre tant en qualité et en quantité

Demande et stocks

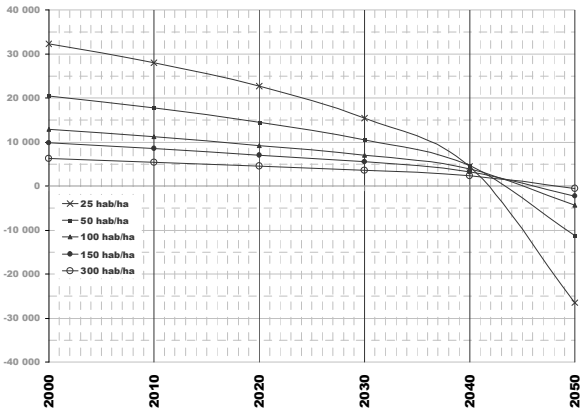
La densité-schizophrène

Point de vue eulérien : un rôle à réévaluer

Il y a vingt ans, les chercheurs australiens Newman et Kenworthy mettaient en évidence la relation entre densité urbaine et consommation individuelle d'énergie due à l'usage de l'automobile. Issue de relevés dans les grandes métropoles mondiales, cette corrélation révélait qu'à densité croissante, la consommation de carburant se réduisait.

Ce très net comportement asymptotique a été largement popularisé depuis une trentaine d'années. Cette « courbe-logo » vaut en général comme slogan introductif des atouts écologiques, sinon énergétiques de la ville compacte. Dans son apologie, ce paradigme de l'*hyperdensité* a sans doute encouragé indirectement la spéculation foncière des centres urbains, ce phénomène renforçant les dynamiques d'étalement urbain.

A l'instar des *Réprésentations* qui posait la question de la densité à grande échelle, la *Formalisation* a permis de dimensionner ce paramètre à l'échelle de l'architecture et de l'urbain. Par les diagrammes (*d,e*), nous avons vu que au fur et à mesure où trajectoires de sobriété et efficacité s'installaient (scénarios 3 et 4), l'impact de la densité de population sur la demande individuelle d'énergie s'amenuisait.



Extrait d'une première consolidation eulérienne : la consommation nette par individu. Bilan de la demande énergétique associée à l'automobilité à laquelle est soustraite une solarisation progressive du bâti par du photovoltaïque (source : Ménard R, Dense cities in 2050, the energy option ?)

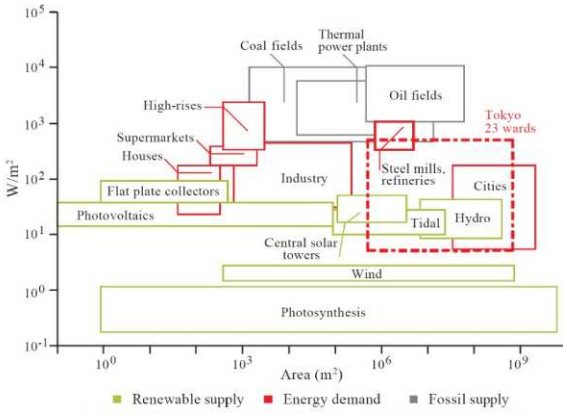
Point de vue lagrangien : un impact majeur

A l'inverse, lorsque la *demande* observée n'est pas rapportée à la personne (W/pers) mais du point de vue de l'espace (W/surface), la *densité de population* convoque son effet de loupe (pers/surface). Nous retrouvons alors la loi *IPAT* évoquée en début de cette partie.

Les différents plans de récolte présentés précédemment ont aussi été comparés parfois avec les *densités de demande* ; nous avons alors pu observer que la densité de demande pouvait être facilement supérieure à 10W/m² et être dans certains cas comparable au flux solaire ! Pour mémoire, rappelons-nous que le modèle (*d,e*) avait décrit une loi de la densité de demande selon les termes suivants :

$$d.\langle k|\underline{D}\rangle \approx \underline{D_1}.d + \underline{D_2}.e.d + \underline{D_3}.d^{0,33}$$

Pour tenter d'atteindre l'équilibre de la *permanence*, l'aire urbaine est donc tiraillée entre deux objectifs contradictoires : *proposer une densité raisonnée*[208] *pour assurer une autonomie énergétique partielle*[209], et *disposer de la densité minimale et critique assurant « l'allumage de l'urbanité ».*



Densité de demande en rouge comparée à quelques autres densités énergétiques (source : GIEC / GEA)

[208] Densité mesurée à grande échelle en intégrant le territoire limitrophe de captation énergétique, notamment pour la production agricole.
[209] Menard R., Dense *Cities in 2050: the Energy Option ?,* Summer Study Proceedings, ECEEE, juin 2011, 15 pages.

Réemploi et démolition sélective

La *Formalisation* a permis de décrire une méthodologie avancée pour l'évaluation de l'énergie incorporée, et suggérée par là-même :

- Des réflexions nouvelles sur les mises en œuvre constructives : quel cadre réglementaire ? Quel cadre légal pour la certification de qualité ? Quels matériaux, quelles s technologies se prêtent d'avantage au réemploi ? Quelles formes pour ces matériaux et technologies ?
- De reposer les conditions d'évaluation du patrimoine architectural et urbain : comment forcer l'obligation de renseigner l'existant ? Comment identifier de façon inverse les propriétés physiques ?
- D'interroger les modèles économiques sous-jacents au déploiement de la « démolition sélective » : quelle organisation des corps des métiers ? quels nouveaux métiers ?

Incidemment ces résultats de recherche rejoignent une partie de l'ambition de la problématique initiale, concernant les *Mécaniques économiques*.

Nous verrons d'ailleurs comment la question à la fois de l'obsolescence de la construction, la permanence de l'édifice et la question de l'hybride –entre infrastructure et architecture- sera au cœur de l'utopie des *Infrastructures solaires urbaines* présentées dans la partie suivante, les *Métamorphoses*.

Mutualiser et augmenter la permanence constructive ? (James Wines)

Les stocks de court terme en question

Pour poursuivre cet examen comparé, rappelons-nous que l'espace rural dispose d'une multitude d'infrastructures et d'entrepôts dédiés au stockage de l'énergie. Silos à grains, ballots de foin entreposés, billes de bois stockés, …

A contrario, les villes ne possèdent que de stocks énergétiques excessivement réduits. Peu ou pas de «volumes-tampons » permettant d'assurer une résilience d'approvisionnement pour la diversité de nos demandes.

Réservoirs de stations services, stocks stratégiques d'hydrocarbures, inertie thermique des réseaux de chaleur… : le diagnostic quantifié serait faible. Retenons que pour ce qui concerne l'alimentation, l'autonomie alimentaire de Paris est inférieure à trois jours.

Du point de vue la robustesse d'approvisionnement, et eu égard la somme des tensions que le paysage de l'énergie attend demain, il y a donc urgence à réinventer des stratégies d'implémentation de « batteries »[210] dans nos territoires à haute densité de *demande énergétique* que sont nos villes.

Silos de stockage. Photographies de Hilla et Bernd Becher

[210] Batteries au sens large : cela suppose des volumes-tampon pour nos différents types de demande énergétique : électricité, alimentation, chaleur…

Augmenter l'offre

Les territoires, systèmes solaires en puissance

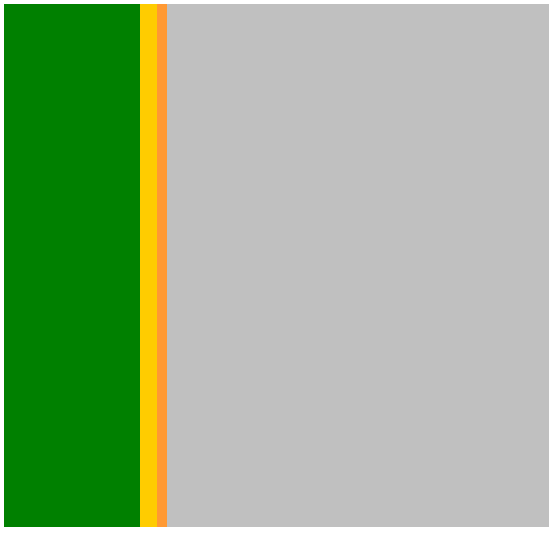
Comment étoffer la *solarisation* ? Imaginons une société à 2000W, vivant un territoire *arrosé* par 150W/m² et dont la densité est de 500 habitants par km². Pour que la densité d'*offre* égalise celle de la *demande*, cela réclame un rendement de conversion solaire de 0,7%. Voilà une répartition possible du territoire pour cet objectif :

25% du territoire dédié à la production de biomasse ;
3% du territoire alloué à du photovoltaïque ;
2% du territoire alloué à des panneaux thermiques ;
70% du territoire sont non valorisés énergétiquement (voiries, paysages minéraux…)

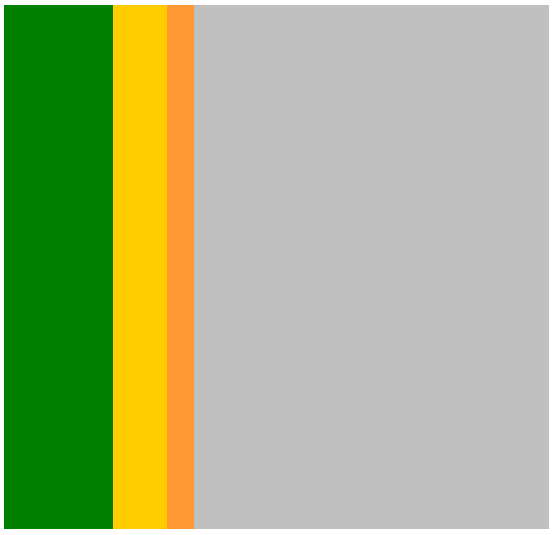
Sur le territoire du Grand Paris et pour des franciliens à 2000W, rappelons qu'il s'agirait d'atteindre près du double de cet objectif. Le scénario d'aménagement pourrait alors être le suivant :

20% du territoire dédié à la production de biomasse ;
10% du territoire alloué à du photovoltaïque ;
5% du territoire alloué à des panneaux thermiques ;
65% du territoire sont non valorisés énergétiquement (voiries, paysages minéraux…)

A plus de sept milliards, rappelons-nous aussi que nous disposons par individu de deux hectares de continents et cinq hectares d'océan… Réinventons le *Modulor territorial* de nos récoltes nécessaires ! Les *Métamorphoses* reviendront donc sur cette problématique globale avec les scénarios *Reforme*.



Un plan de récolte théorique pour une solarisation à 0,7%



Un plan de récolte théorique pour une solarisation à 1,5%

L'aire d'approvisionnement

Dans les *Représentations,* nous rappelions les résultats issus de l'article d'Eunhye Kim et Sabine Barles concernant l'étude énergétique de Paris. Souvenons-nous qu'elles avaient mis en évidence que la distance moyenne des intrants primaires énergétiques et consommées dans Paris était de l'ordre 4000 kilomètres.

De fait, la plupart des métropoles sont soumises à cette ultra-dépendance énergétique. Cette dernière est le résultat de la géographie des *stocks*[211], comme de la complexité des chaînes énergétiques mises en œuvre au cours des deux révolutions industrielles.

Ce réseau « dendritique » constitue un risque systémique de robustesse d'approvisionnement de nos métropoles. Comment « remembrer les territoires » limitrophes et réduire la distance moyenne de captation énergétique ? A l'échelle territoriale, comment organiser la *dé-mondialisation énergétique* ?

Incertitudes prospectives sur offre et demande

Cet exercice prospectif et typologique permet de dégager plusieurs tendances. En premier lieu, la définition des mix énergétiques nécessaires selon la quantification et la qualification de la demande énergétique.

La décomposition bidimensionnelle de la donnée énergétique permet de questionner l'adaptation des mix énergétiques implémentés sur le bâti. Nous verrons dans la partie suivante, les *Métamorphoses*, que les incertitudes relatives tant à l'évolution de la *demande* que celles associées aux évolutions techniques de conversion de l'énergie solaire –et donc de la nature possible de l'*offre*- supposent d'interroger la souplesse d'aménagement de « l'épiderme de notre bâti ». Il en sera question dans la partie suivante et ce sera l'un des enjeux fondateurs des *Infrastructures Solaires Urbaines.*

« Eneropa » ou la planification énergétique continentale : faut-il en arriver-là ? (néo-fonctionnalisme énergétique koolhaasien ?...) (image AMO/OMA)

[211] Mines d'uranium au Niger, puits de pétrole au Moyen-Orient, gaz de Russie…

Un nouveau lien avec le rural

Dans les *Réprésentations* et pour l'analyse de l'Ile-de-France, nous posions les « termes énergétiques » de la dualité ville-campagne selon les différentes mutations historiques. Avant la *désolarisation* de l'humanité, la campagne était l'espace de conversion de l'énergie solaire, essentiellement gouvernée par la production et la transformation de la biomasse. *La campagne était le lieu de l'offre.* La « ré-adhérence de l'humanité au régime permanent » doit-il conduire nécessairement conduire à la même dualité : la ville consomme et la campagne produit ? Pourtant, depuis l'orée du 19ème siècle, plusieurs évolutions supposent de refonder ce paradigme.

En premier lieu, croissance de la population mondiale et densification des tissus urbains. Concomitamment, la frontière de l'urbain s'est floutée pour engendrer de nouvelles typologies de territoire : la frontière entre *bassin versant* et *puits de demande* est désormais plus confuse. Aussi, la diversité des usages énergétiques et le mix de la *demande* s'est hautement complexifiée, avec comme vecteur-roi, l'électricité.

Parallèlement, les techniques de conversion de l'énergie solaire possèdent aujourd'hui des rendements de conversion bien supérieurs à ceux de la biomasse. Pour une production de chaleur (à température moyenne, de l'ordre de 70°C), un panneau solaire thermique réclame près de 100 fois moins d'espace que le champ de récolte ou la futaie susceptible de produire de la biomasse-énergie et donc assurer *in fine* une demande énergétique identique. Dès lors, dans le prolongement de notre raisonnement, nous ferons donc l'hypothèse d'une « ligne de partage de l'*offre* » entre l'urbain et le non-urbain.

Nous demanderons à la ville de convertir l'*offre* potentielle avec les technologies à haut rendement de conversion et dont la demande est essentiellement concentrée dans l'urbain : électricité et chaleur en tout premier lieu. Pour augmenter sa résilience d'approvisionnement, la mise en place de circuits courts pour la production maraîchère par exemple pourra être aussi un atout. La *permaculture* a aussi nombre de mérites dans les liens sociaux qu'elles génèrent et le lien fondamental qu'elle procure avec le *vivant* et la *nature* pour les habitants des villes.

En réciproque, le rural, en tant que corolle spatiale aux concentrations urbaines, dispose intrinsèquement de surfaces plus importantes. Cette « largesse spatiale » est alors compatible avec des rendements de conversion solaire plus faible ; elle autorise parallèlement de plus grand espace pour l'entreposage et le stockage. Le rural de demain restera ainsi l'espace privilégié dédié à la *demande alimentaire* ainsi qu'à la *demande d'énergie incorporée* en maximisant la production de biomatériaux.

L'altimétrie bâtie en question

La hauteur bâtie : un levier de contrôle essentiel

L'horizon de la *permanence énergétique* dimensionne aussi la nature morphologique du bâti (son altimétrie et son nombre de niveaux) ainsi que les asymptotes de densité capable (contenu urbain). Retenons notamment que pour les cinq scénarios du dimensionnement architectural, *l'autonomie énergétique* paraissait difficilement accessible au-delà de quatre niveaux. L'architecture, la ville et les paysages sont donc appelés à devenir des traducteurs de l'*offre* et de la *demande*, des « contenants médiateurs » filtrant les qualités énergétiques des ressources renouvelables pour la diversité des besoins de la vie.

Synthèse du modèle formel pour la ville

Reprenons pour ce paragraphe les enseignements des lois développées dans les sections précédentes. Pour un territoire urbain *k* donné, tachons à présent d'évaluer son degré de permanence ou sa capacité à assurer tout ou partie de sa *demande* intrinsèque. Nous noterons, r_k, le niveau d'autonomie du territoire *k*. Sur la base du modèle (*d,e*), on rappelle ci-dessous la formulation suivante de la *densité de demande* :

$$d.\langle k|\underline{D}\rangle \approx \underline{D_1}.d + \underline{D_2}.e.d + \underline{D_3}.d^{0,33}$$

Concernant l'*offre*, et si nous excluons la production de photosynthèse dans notre modèle d'offre sur le territoire urbain (on considérera que le rural est le lieu central sinon dédié pour la production de biomasse), nous considérons de façon approximative la loi suivante :

$$\langle k|\underline{S}\rangle \approx c.\underline{\eta}.S_0$$

Dès lors, et en se remémorant l'égalité fondamentale de l'urbain *c.h=d.e*, nous pourrons écrire –en projetant les grandeurs vectorielles sur l'axe de la quantité- que :

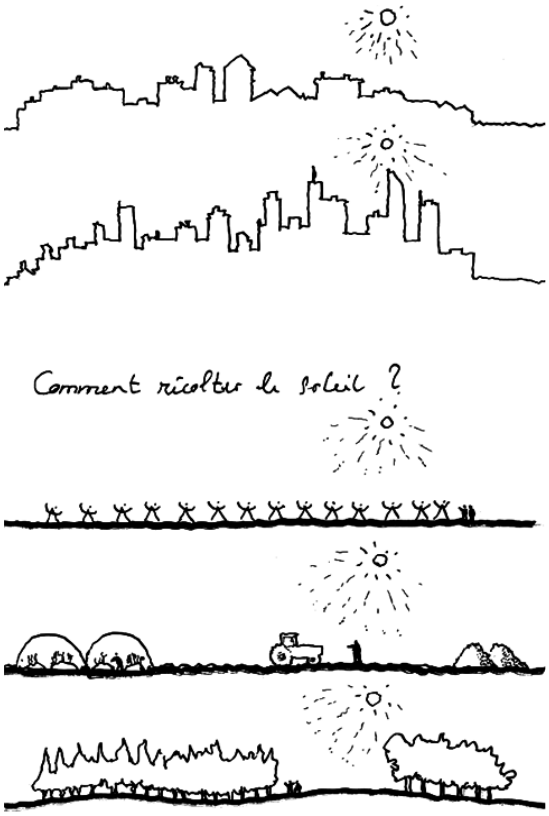
$$r_k \approx \frac{1}{h}.\frac{\eta.S_0.e}{D_1 + D_2.e + D_3.d^{-0,66}}$$

On en déduit dès lors que le degré de permanence énergétique d'un territoire urbain est d'abord fonction :

1. *En proportion inverse de l'altimétrie moyenne* du bâti. Plus la ville est haute, plus la densité de demande est élevée tandis que la densité d'offre reste constante (ce que décrit le paramètre *h*);
2. Du gisement solaire et plus généralement du foisonnement des *gisements renouvelables locaux* (ce que décrit le paramètre S_0);
3. Du *rendement moyen de conversion* des gisements renouvelables (ce que décrit le paramètre η).

Evidemment, les démarches d'efficacité et de sobriété ont un rôle central vis-à-vis de l'autonomie énergétique : des efforts conjugués de réduction sur les coefficients *D* ont un impact direct sur le paramètre de permanence. Néanmoins, l'un des résultats fondamental de *Reforme* interpelle la question des formes urbaines au moins sur deux paramètres :

- L'altimétrie moyenne du bâti
- La géométrie des plans de récolte permettant de maximiser le rendement moyen η.



Skylines urbaines comparées aux horizons des campagnes productrices (de haut en bas : champs de concentrateurs paraboliques, maraîchages et cultures sous serre, sylviculture).

La géométrie en question

Et si les formes urbaines gouvernaient davantage l'offre que la demande ?

A 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 ?

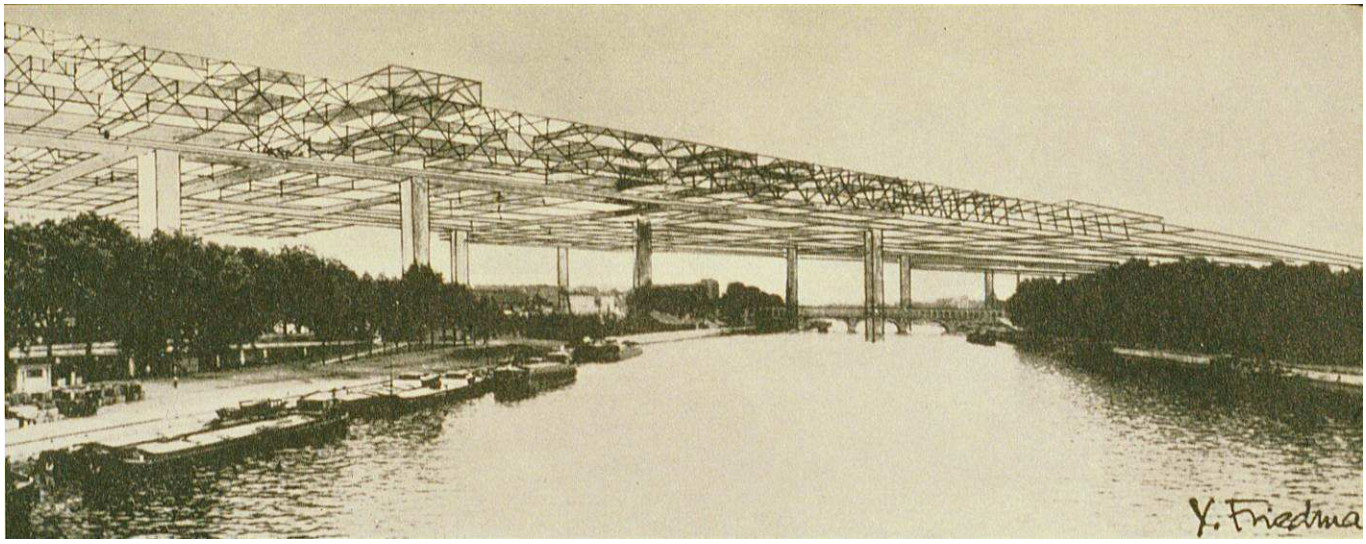
Le soleil est en haut, l'agriculture se récolte à plat : champs de céréales, maraîchage, etc. Il est aisé de passer entre les sillons pour semer, récolter. Idem pour nos récoltes électriques : champs photovoltaïques, miroirs paraboliques des centrales à concentration… : il est facile de passer entre les panneaux pour l'entretien[212].

Le photovoltaïque déteste les masques partiels. Actualité récente, la publication du cadastre solaire[213] 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.*

Les toits parisiens : comment récolter dans ce fatras géométrique ?

[212] La production sur des plans verticaux est mauvaise, *a fortiori* dans la bande tropicale où vit la majorité de la population mondiale.
[213] Cadastre solaire de Paris récemment mis en ligne par l'APUR.



Ville spatiale par Yona Friedman, 1958-1960

Partie 3. Les Métamorphoses

« *Nous entrons dans l'ère du capitalisme distribué.* »
Jeremy Rifkin[214]

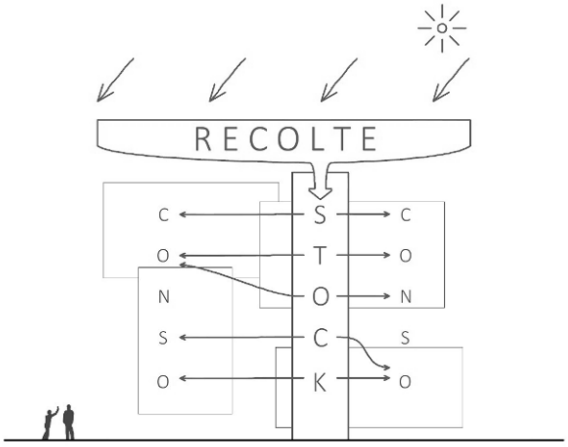
« Le premier impératif est d'augmenter la part des renouvelables et de produire l'énergie au plus près des consommateurs. »
Atelier Parisien d'Urbanisme[215]

Quelles formes ? Quelles réformes ?

Au cours de deux parties précédentes, et à deux extrémités d'échelle spatiale, nous avons analysé les inductions territoriales et architecturales du *régime permanent*. Au terme de notre recherche, nous développons à présent des stratégies de réponses à l'échelle urbaine et compatible avec l'existant. Il s'agira de révéler quelques propositions radicales aux frontières entre le bâtiment et l'urbain, à mi-distance entre l'infrastructure et l'architecture. Quelques traductions formelles d'une *géonergie* contextualisée.

Hormis le *Spaceship Earth* de Fuller, sauf les utopies de Yona Friedman, l'histoire récente présente en effet peu d'exemples de remise en cause radicale de l'art et de la pensée de la construction, en phase avec la prise de conscience des limites planétaires. La déclinaison finale des *Metamorphoses,* les *Infrastructures solaires urbaines*, est aussi d'abord de réenclencher la production d'utopies. Cette ambition se fera l'écho de l'attente récemment formulée par le physicien Etienne Klein[216].

« *Je suis né en 1958. Les gens de ma génération se souviennent que pendant leur adolescence, ils étaient nourris par des hebdomadaires, tels « Pilote » ou « Tintin », qui leur expliquaient comment ce serait en l'an 2000, comment on y travaillerait, s'y déplacerait, s'y nourrirait, etc. Evidemment, ces anticipations se sont révélées fausses pour la plupart, mais n'empêche, le futur était là, sous nos yeux ! […] Cela suffisait à tracer des trajectoires, à dynamiser le temps que nous vivions en force historique. Aujourd'hui, quand on se risque à faire de la prospective, on se borne à 2025, c'est-à-dire à demain. Quid de 2050 ? Quand les adolescents d'aujourd'hui nous posent la question, nous n'avons que des réponses bien vagues à leur donner.* »



Une coupe sur les Infrastructures Solaires Urbaines

[214] *La troisième révolution industrielle. Comment le pouvoir latéral va transformer l'énergie, l'économie et le monde*, 2012
[215] *Petite synthèse du Grand Paris*, 2008
[216] Physicien, directeur de recherche au CEA. 28 août 2013, Les Echos, *« Le progrès n'est plus vu comme un soulagement, mais comme un souci.* »

Conclusion #1 : scénarios globaux

La loi de la solarisation croissante

Au cours des parties précédentes, nous avons décrit la relation quasi-linéaire[217] qu'entretiennent *solarisation* et *densité* vis-à-vis d'un objectif donné d'autonomie énergétique, le rapport entre *offre* et *demande*. Nous retenons aussi que l'horizon de la *permanence énergétique* suppose l'égalité entre offre et demande et donc une autonomie de 100%.

Une France à 6000W

Pour illustrer cette situation, l'histogramme ci-dessous détaille les niveaux de *solarisation* nécessaire à plusieurs échelles territoriales. Rappelons-nous que la demande individuelle de 6000W correspond peu ou proue à la consommation énergétique primaire par Français. Les densités sont croissantes du haut vers le bas.

En omettant la production de biomasse et donc *l'offre alimentaire*, retenons qu'un objectif de *solarisation* à 5% sur un territoire de quelques hectares est déjà ardu en l'état actuel des technologies disponibles. Gardons en tête le résultat de la *Formalisation* concernant les plans de récolte pour Paris : 2% de solarisation semble déjà ambitieux. A haute densité, il s'agirait que nous soyons à même de convertir la quasi-totalité du flux solaire incident : cette perspective reste inaccessible.

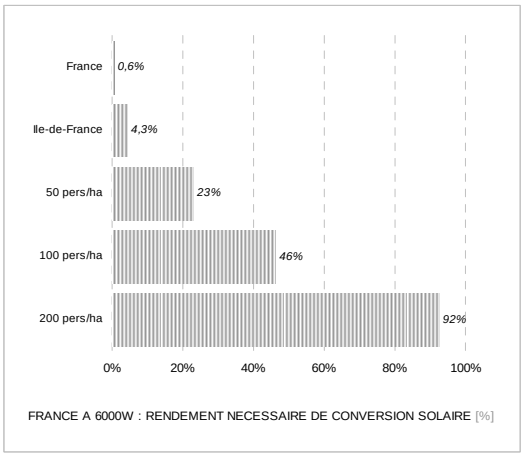
Un monde à 2000W

Dans ce difficile arbitrage entre densité nécessaire au fait urbain, et nécessité de production pour une autonomie même partielle, analysons aussi cette loi des rendements en opérant une réduction de la *demande*.

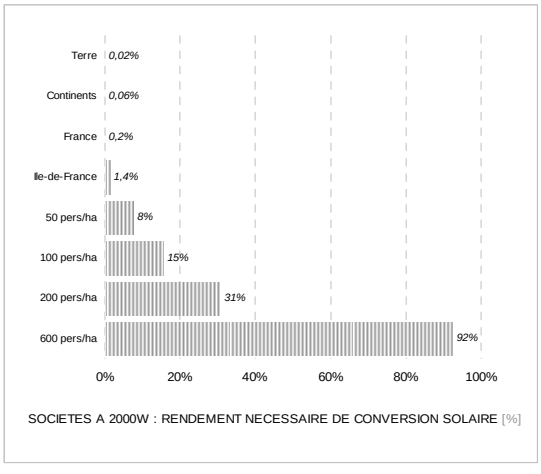
A l'échelle terrestre, un rendement de conversion de 0,02% moyen suffirait alors à l'équilibre entre l'*offre* et la *demande* énergétique (sous réserve d'adéquation entre les qualités[218] de la demande et de l'offre et demande ainsi que la synchronisation temporelle entre celles-ci). Si la conversion solaire est uniquement dévolue aux continents, le rendement doit dès lors augmenter à 0,06%.

Le graphique ci-dessous exhibe la relation fondamentale liant les limites physiques avec la densité de population. Même pour une *Société à 2000 W*, une densité importante ne pourra jamais assurer l'autonomie énergétique quelque soit la baguette magique technologique.

A l'échelle métropolitaine et si nous rêvons d'un *Grand Paris à 2000W*, cela réclamerait néanmoins la concrétisation d'une feuille de route volontaire permettant d'atteindre un niveau de solarisation relativement élevé. Atteindre 1,5% de conversion de l'*offre* constituerait déjà un défi (rappelons-nous le scénario de l'Ile-de-France et de son plan de récolte). Mais ce graphique révèle encore qu'il est illusoire et *physiquement* impossible de rendre tout territoire de haute densité comme autonome en énergie sur la quasi-totalité des usages.



Densité urbaine, densité de consommation énergétique et ratio nécessaire de solarisation permettant l'autonomie énergétique sous un flux solaire moyen en France



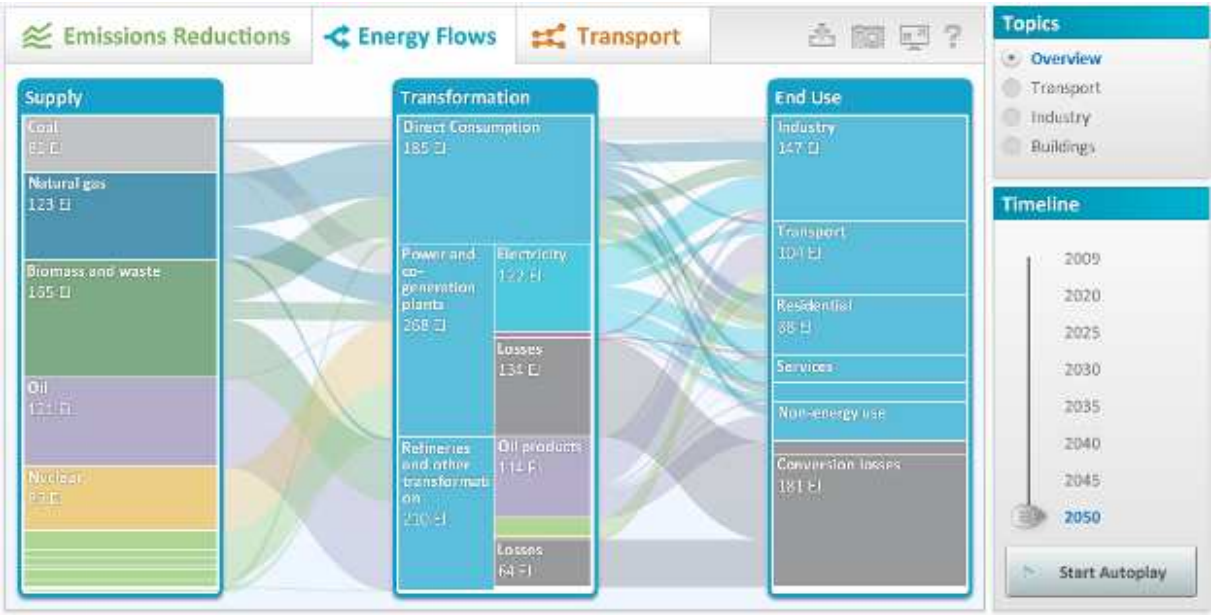
Densité urbaine, densité de consommation énergétique et ratio nécessaire de solarisation permettant l'autonomie énergétique sous un flux solaire moyen en France

[217] Dans l'hypothèse où la demande énergétique individuelle est peu modifiée selon la densité.

[218] Voir après pour explication de cette notion, notamment via la décomposition vectorielle en exergie et anergie.

Scénariser le long terme

Dans cette partie, nous revenons à l'échelle initiale, celle de *notre vaisseau terrestre*. Comme premières *Métamorphoses*, nous présentons plusieurs scénarios globaux de *solarisation terrestre* et de convergence entre *offre* et *demande* énergétique.



Un exemple de scénario dynamique proposé par l'IEA, Energy Technology Perspectives[219]

[219] http://www.iea.org/etp/explore/

Les scénarios Reforme

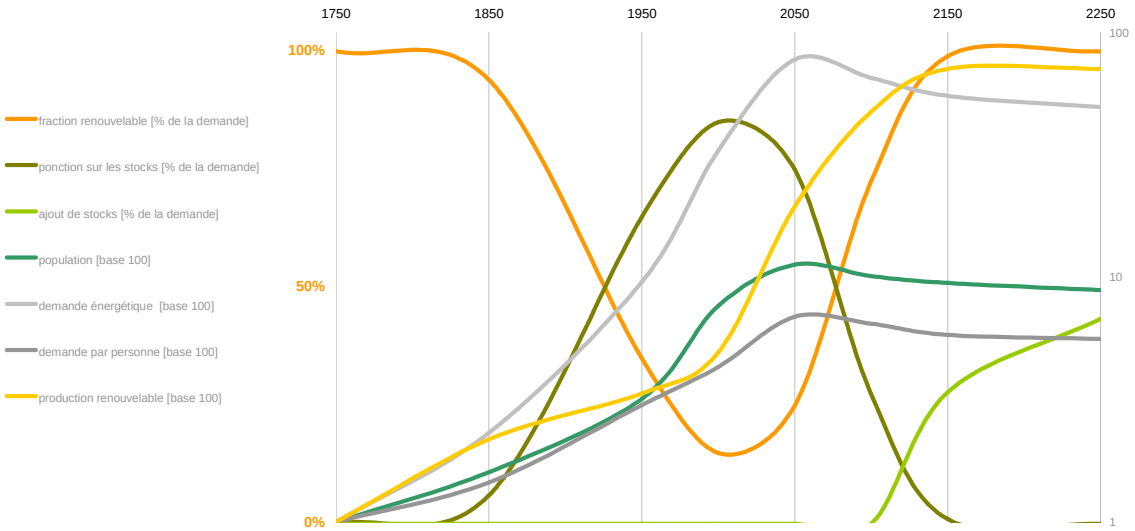
Scénario « Reforme 7 »

Selon ce scénario médian, la population mondiale entame une longue transition démographique jusqu'à stabiliser sa démographie à environ 7 milliards d'individu dans environ 200 ans (le maximum étant atteint autour des années 2050 à environ 9 milliards d'individu).

A titre d'illustration, nous décrivons ici de façon globale et tendancielle, une prospective d'évolution du rendement moyen de conversion de l'*offre*. Selon ce scénario, le rendement moyen de conversion de l'*offre* augmente de façon importante entre 2000 et 2100 pour se stabiliser vers 0,03% vers 2100.

A cette date, l'humanité a été capable de *fertiliser* le globe de telle que sorte que la quantité moyenne d'énergies utilisables par unité de surface terrestre (océans compris) est de l'ordre de 0,05W/m². Cela paraît très peu, mais intégré sur la surface du globe, le flux moyen d'énergie disponible pour assouvir la *demande* est alors de près de 20TW à horizon 2100 et près de 30TW en 2150.

Cette trajectoire reviendrait à multiplier environ par dix la totalité de la production renouvelable aujourd'hui installée. Il est urgent que les ultimes ressources de nos *stocks de long terme* permettent de bâtir les infrastructures qui permettront d'augmenter drastiquement les capacités de conversion de notre *petit système solaire terrestre* !

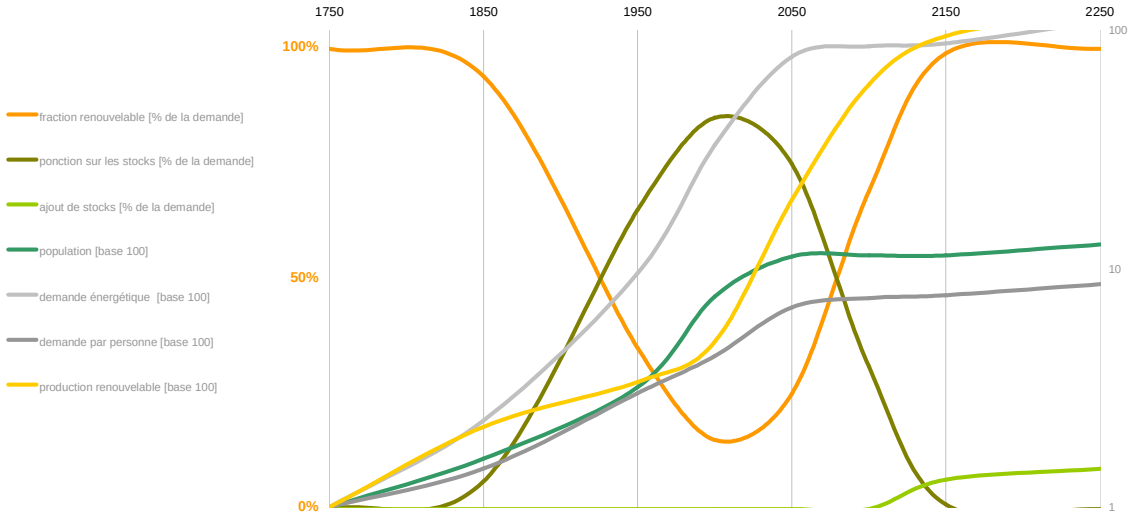


		1750	1850	1950	2000	2050	2100	2150	2250
population	[pers]	791 000 000	1 262 000 000	2 521 000 000	6 051 000 000	8 909 000 000	8 000 000 000	7 500 000 000	7 000 000 000
	[base 100]	1,0	1,6	3,2	7,6	11,3	10,1	9,5	8,8
demande énergétique	[Mtep]	277	640	2 650	9 110	21 474	18 077	15 253	13 709
	[TW]	0	1	4	12	29	24	20	18
	[base 100]	1,0	2,3	9,6	32,9	77,6	65,3	55,1	49,5
	[W/m²]	0,001	0,002	0,007	0,023	0,055	0,047	0,039	0,035
demande par personne	[Tep/pers]	0,3	0,5	1,1	1,5	2,4	2,3	2,0	2,0
	[W/pers]	464	673	1 396	1 999	3 200	3 000	2 700	2 600
	[base 100]	1,0	1,4	3,0	4,3	6,9	6,5	5,8	5,6
fraction renouvelable	[% de la demande]	100%	94%	35%	15%	25%	72%	99%	100%
	[base 100]	1,0	0,9	0,4	0,2	0,3	0,7	1,0	1,0
production renouvelable	[Mtep]	277	602	928	1 367	5 368	13 104	19 656	19 656
	[base 100]	1,0	2,2	3,4	4,9	19,4	47,4	71,0	71,0
solarisation	[% équivalent]	0,0004%	0,001%	0,001%	0,002%	0,008%	0,020%	0,030%	0,030%
	[base 100]	1,0	2,2	3,4	4,9	19,4	47,4	71,0	71,0
solarisation nécessaire	[% équivalent]	0,0004%	0,001%	0,004%	0,014%	0,033%	0,028%	0,023%	0,021%
ponction sur les stocks	[Mtep]	0	38	1 723	7 744	16 105	4 973	153	0
	[% de la demande]	0%	6%	65%	85%	75%	28%	1%	0%
ajout de stocks	[Mtep]	0	0	0	0	0	0	4 251	5 948
	[% de la demande]	0%	0%	0%	0%	0%	0%	28%	43%

Scénario « Reforme 10 »

Selon ce scénario haut, la population mondiale continue de croître jusqu'à tendre vers 10 milliards de terriens en 2250. La demande individuelle d'énergie continue aussi d'augmenter pour tendre vers 4000W par individu d'ici deux siècles.

Dès lors la faisabilité de cette trajectoire réclame une *solarisation massive* de la planète permettant de tendre vers un rendement moyen de conversion de 0,05%, soit près du double par rapport à « Reforme 7 »



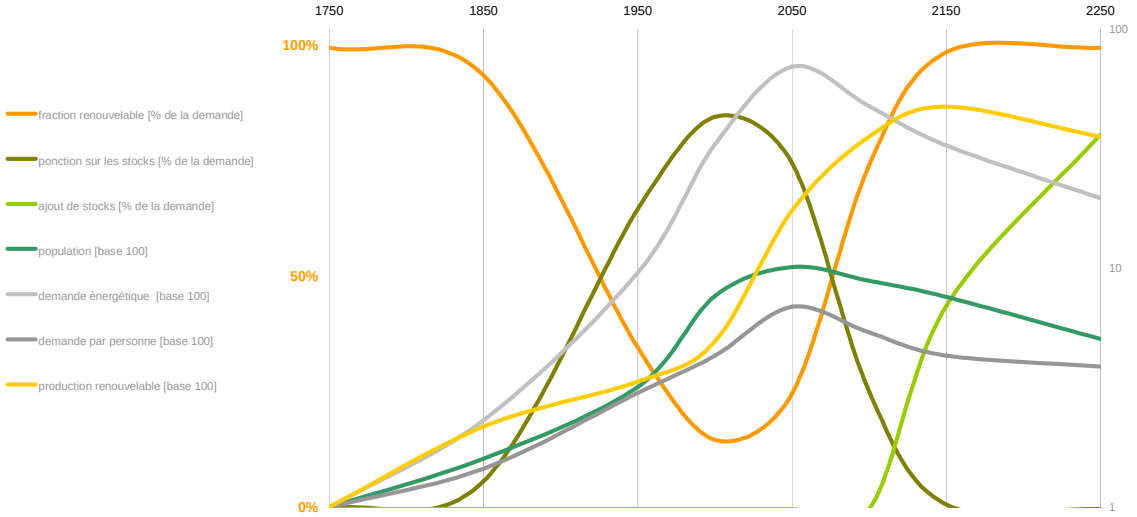
		1750	1850	1950	2000	2050	2100	2150	2250
population	[pers]	791 000 000	1 262 000 000	2 521 000 000	6 051 000 000	8 909 000 000	9 000 000 000	9 000 000 000	10 000 000 000
	[base 100]	1,0	1,6	3,2	7,6	11,3	11,4	11,4	12,6
demande énergétique	[Mtep]	277	640	2 650	9 110	21 474	23 727	24 404	30 129
	[TW]	0	1	4	12	29	32	32	40
	[base 100]	1,0	2,3	9,6	32,9	77,6	85,7	88,2	108,9
	[W/m²]	0,001	0,002	0,007	0,023	0,055	0,061	0,063	0,078
demande par personne	[Tep/pers]	0,3	0,5	1,1	1,5	2,4	2,6	2,7	3,0
	[W/pers]	464	673	1 396	1 999	3 200	3 500	3 600	4 000
	[base 100]	1,0	1,4	3,0	4,3	6,9	7,5	7,8	8,6
fraction renouvelable	[% de la demande]	100%	94%	35%	15%	25%	69%	99%	100%
	[base 100]	1,0	0,9	0,4	0,2	0,3	0,7	1,0	1,0
production renouvelable	[Mtep]	277	602	928	1 367	5 368	16 380	26 208	32 761
	[base 100]	1,0	2,2	3,4	4,9	19,4	59,2	94,7	118,4
solarisation	[% équivalent]	0,0004%	0,001%	0,001%	0,002%	0,008%	0,025%	0,040%	0,050%
	[base 100]	1,0	2,2	3,4	4,9	19,4	59,2	4,0	118,4
solarisation nécessaire	[% équivalent]	0,0004%	0,001%	0,004%	0,014%	0,033%	0,036%	0,037%	0,046%
ponction sur les stocks	[Mtep]	0	38	1 723	7 744	16 105	7 346	244	0
	[% de la demande]	0%	6%	65%	85%	75%	31%	1%	0%
ajout de stocks	[Mtep]	0	0	0	0	0	0	1 560	2 632
	[% de la demande]	0%	0%	0%	0%	0%	0%	6%	9%

Scénario « Reforme 4 »

Selon ce scénario, 2050 constitue un pic historique de démographie mondiale. Vieillissement de la population et contrôle des naissances organisent une lente décroissance de la population planétaire qui retrouve en 2250 une population de 4 milliards d'humains.

De façon concomitante, efficacité généralisée et sobriété désirée ont permis de limiter les besoins primaires d'énergie à moins 2000W après 2150 (après un pic vers la moitié du 21ème siècle). Ce scénario a aussi permis d'envisager une légère décroissance de la solarisation terrestre à horizon 2250.

Le maintient d'une *fertilité solaire* très supérieure aux besoins mondiaux permettent de reconstituer rapidement des *stocks de long terme,* provisions pour les générations futures.



		1750	1850	1950	2000	2050	2100	2150	2250
population	[pers]	791 000 000	1 262 000 000	2 521 000 000	6 051 000 000	8 000 000 000	7 000 000 000	6 000 000 000	4 000 000 000
	[base 100]	1,0	1,6	3,2	7,6	10,1	8,8	7,6	5,1
demande énergétique	[Mtep]	277	640	2 650	9 110	19 283	13 181	9 039	5 423
	[TW]	0	1	4	12	26	18	12	7
	[base 100]	1,0	2,3	9,6	32,9	69,7	47,6	32,7	19,6
	[W/m²]	0,001	0,002	0,007	0,023	0,050	0,034	0,023	0,014
demande par personne	[Tep/pers]	0,3	0,5	1,1	1,5	2,4	1,9	1,5	1,4
	[W/pers]	464	673	1 396	1 999	3 200	2 500	2 000	1 800
	[base 100]	1,0	1,4	3,0	4,3	6,9	5,4	4,3	3,9
fraction renouvelable	[% de la demande]	100%	94%	35%	15%	25%	75%	99%	100%
	[base 100]	1,0	0,9	0,4	0,2	0,3	0,7	1,0	1,0
production renouvelable	[Mtep]	277	602	928	1 367	4 821	9 828	13 104	9 828
	[base 100]	1,0	2,2	3,4	4,9	17,4	35,5	47,4	35,5
solarisation	[% équivalent]	0,0004%	0,001%	0,001%	0,002%	0,007%	0,015%	0,020%	0,015%
	[base 100]	1,0	2,2	3,4	4,9	17,4	35,5	47,4	35,5
solarisation nécessaire	[% équivalent]	0,0004%	0,001%	0,004%	0,014%	0,029%	0,020%	0,014%	0,008%
ponction sur les stocks	[Mtep]	0	38	1 723	7 744	14 462	3 353	90	0
	[% de la demande]	0%	6%	65%	85%	75%	25%	1%	0%
ajout de stocks	[Mtep]	0	0	0	0	0	0	3 975	4 405
	[% de la demande]	0%	0%	0%	0%	0%	0%	44%	81%

Conclusion #2 : réforme en France

Introduction

Dans un voisinage de temps et d'espace plus proches que celui des scénarios *Reforme,* nous explorons dans cette section une conclusion relative à la question des *bassins versants énergétiques*.

Dans les *Représentations*, rappelons-nous que nous avions soulevé une inéquité, une injustice pour la nécessaire mutation des territoires : à même objectif d'autonomie énergétique, les niveaux de *solarisation* attendus semblaient au moins dissemblables l'aire francilienne par rapport au territoire national. Nous avions aussi vu qu'il en était de même à une autre échelle d'analyse, pour ce qui concernait l'approche selon les « tranches de latitudes »

Pour que le « stress de mutation » soit équitable entre région, cela supposerait alors que l'emprise géographique de l'Ile-de-France soit près de dix fois supérieure ! Les frontières franciliennes ne seraient plus alors inscrites dans un cercle d'une centaine de kilomètres de diamètre, mais de 300 kilomètres. Pour aller bout de cette démarche à l'échelle nationale, il s'agissait alors de confronter :

- La cartographie de la *densité de demande d'énergie* (et de ces tendances d'évolution à moyen terme) ;
- A la cartographie de la *densité de l'offre* correspondant à l'agrégation des cartes pour les différents gisements (solaire, éolien, hydraulique, géothermique, …)

La confrontation de ces informations géographiques autorisera la définition de *lignes de partage de l'énergie* (au même sens que les lignes de partage des eaux pour les bassins versants hydrologiques). La poursuite de cette analyse géographique (*géonergique*) fournira alors des tracés, bases de territoires *remembrés* selon les ambitions d'autonomie et d'équité pour l'ensemble des fragments territoriaux nationaux !... Voilà l'objet de la présente section.

Remembrer les régions selon l'énergie ?

Méthodologie

Une autre solution envisageable, à l'heure des reformes territoriales est de prendre le problème dans l'autre sens, à savoir plutôt que de modifier la demande ou l'offre par la densité, pourquoi ne pas étudier la surface initiale. Au cœur de cette réflexion, il s'agit d'imaginer un redécoupage de la France permettant une égale répartition de l'offre solaire. Deux types d'approches différentes ont été mis en place :

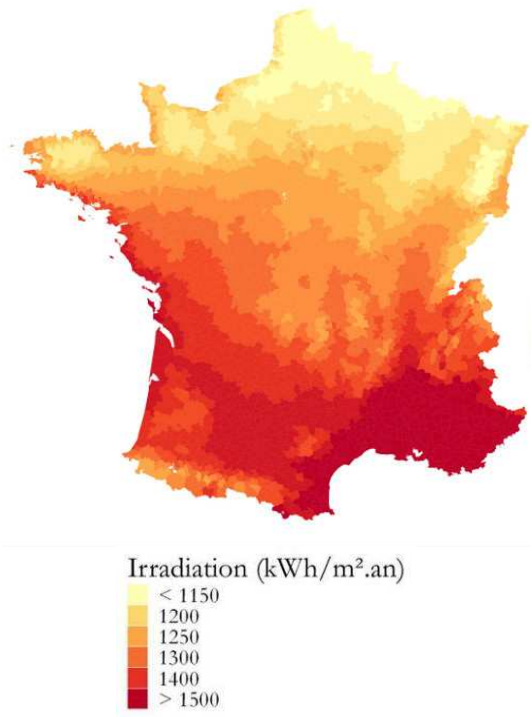
- utilisation de données ponctuelles, carroyées ou issues de simplification géographiques,
- recours direct aux limites administratives existantes.

Sources et prétraitement des données

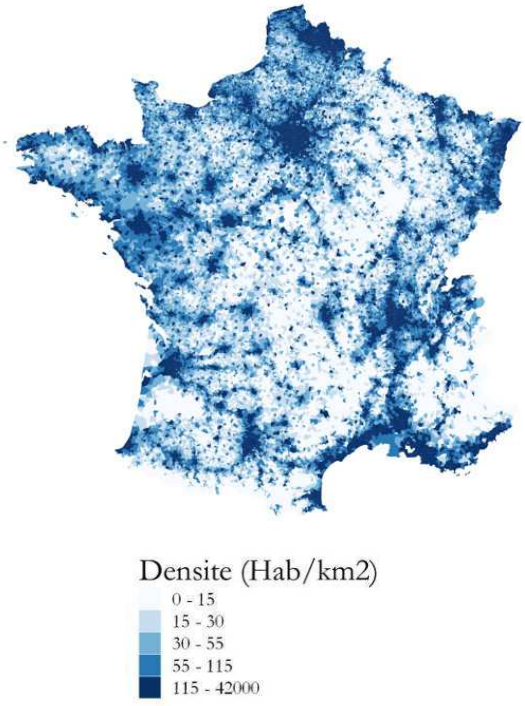
Les données géographiques utilisées sont issues de la base GEOFLA de l'IGN[220], contenant la géométrie et les informations administratives des cantons (département et région de rattachement, ainsi que population et superficie).

A l'aide du logiciel SIG *open source* QGIS, cette base est croisée avec la carte de l'irradiation moyenne annuelle fournie par le projet PVGIS [221] : chaque canton se voit attribuer une irradiation moyenne annuelle, avec laquelle est calculée l'offre potentielle solaire.

Le choix de l'échelle du canton est issu du compromis entre la précision du maillage des données d'irradiation et la taille des entités administratives, dont dépendra la qualité de la jointure spatiale effectuée. Les données sont ensuite agrégées ou carroyée suivant l'utilisation qui en sera faites.



Carte de l'irradiation issue de PVGIS



Carte de densité issue de GEOFLA

[220] http://professionnels.ign.fr/geofla
[221] Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne (http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/)

Etat des lieux

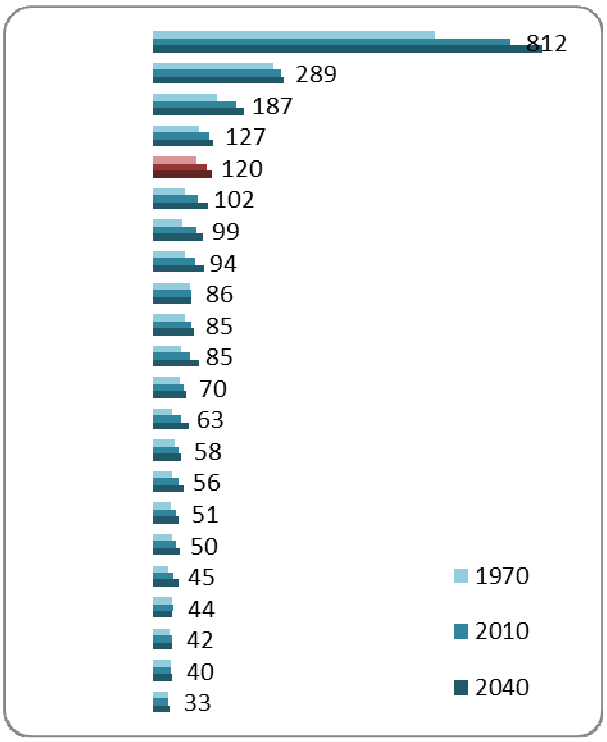
Si nous faisons l'hypothèse que la consommation d'énergie est proportionnelle à la population des territoires, l'offre correspond à la totalité de l'énergie solaire interceptée par la surface, qui correspondrait à la couverture de la totalité du territoire de panneaux fonctionnant à un rendement de 100%[222]. Le rapport entre offre et demande devient alors le nombre d'habitant par quantité d'énergie solaire disponible sur un territoire donné.

Offre = irradiation x superficie

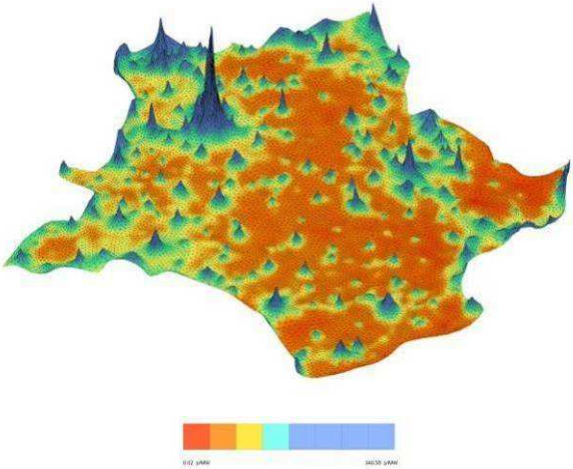
Demande = Population

Demande / Offre = ratio

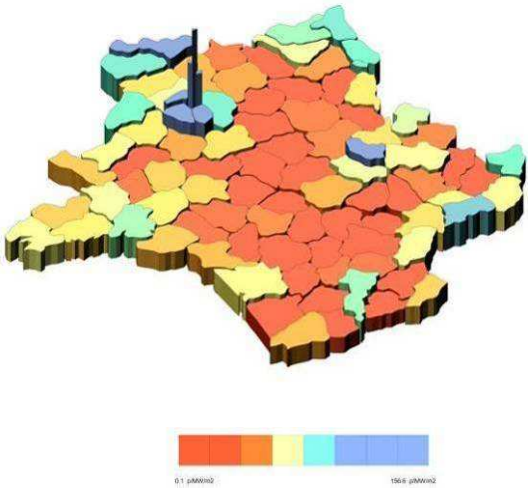
Il devient donc aisé de créer une carte qui permet de voir le résultat de la répartition originale. On peut ainsi remarquer la forte disparité de ce ratio. A partir de ces résultats nous allons imaginer ce que pourrait être une France solaire-équitable.



Classement des régions selon l'équilibre Offre / Demande (Hab. / TWh.an) aux décades 1970, 2010, 2040



Carte originale de l'offre sur la demande



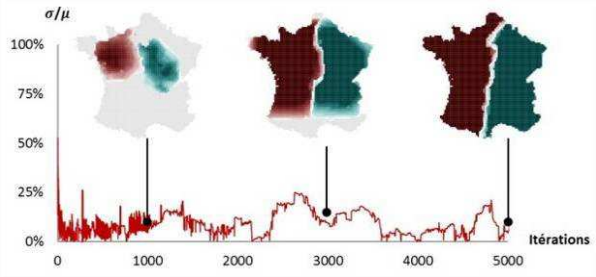
Carte originale de l'offre sur la demande par département

[222] Les aspects de distribution de l'énergie ne sont pas pris en compte ici

Optimisation carroyée

Une première recherche a été menée en utilisant un automate cellulaire à critère de transition multiple, construisant les régions (issues du carroyage) de proche en proche à partir de cellules d'initialisation, dans une approche purement *bottom – up*.

L'algorithme tente de minimiser l'écart entre les ratios des régions par des mesures de leur dispersion. Une bonne convergence des ratios[223] est atteinte périodiquement, comme le montre l'évolution du rapport présentée ci-dessous pour 2 régions. On obtient alors une France divisée en régions dont les disparités sont gommées.



Evolution du coefficient de variation pour deux régions suivant le nombre d'itérations

Forme des découpages obtenus pour 2 régions

Forme des découpages obtenus pour 5 régions

Forme des découpages obtenus pour 10 régions

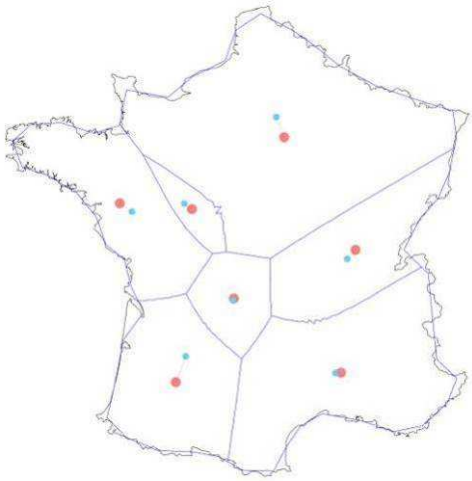
[223] du coefficient de variation σ/μ , qui caractérise de manière normalisée la dispersion. Ce dernier est de 140% pour la France en l'état actuel

Optimisation par Voronoï

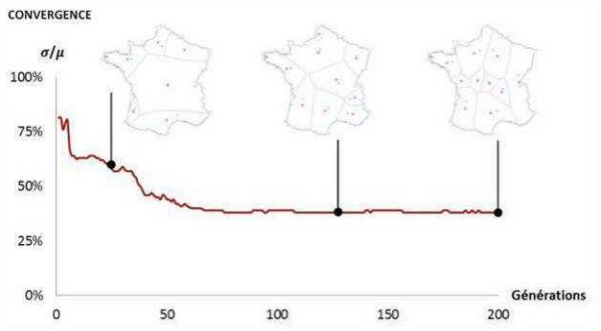
Notre deuxième algorithme utilise lui une approche top – down, lui donnant la capacité de travailler aussi bien avec des données carroyées que des données ponctuelles non organisées dans une grille : un diagramme de Voronoï vient se superposer à elles, et un algorithme génétique optimise les paramètres libres à la recherche d'un découpage optimum.

A partir des N pics de population formés par les grandes agglomérations françaises, un diagramme de Voronoï prend ces points comme points d'initialisation, auxquels sont affectés des poids arbitraires, formant un premier découpage. L'algorithme adopte un comportement de type "génétique", chaque découpage effectué étant évalué par l'écart type des ratios.

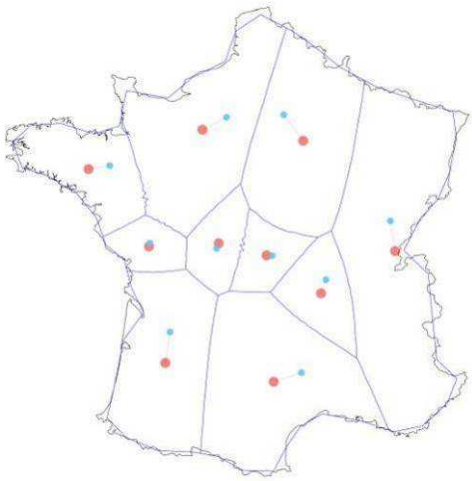
Le système converge vers un équilibre possible des découpages rapidement, en environ 50 itérations. On observe cependant de nombreux découpages équivalents en termes de coefficients de variation, aux formes différentes. La possibilité de déplacer les points servant à calculer le diagramme de Voronoï a été implémenté : les régions peuvent s'étendre ou se replier, mais aussi se déplacer sur le territoire français.



Coefficient de variation : 39%



Evolution de la médiane du coefficient de variation, pour chaque génération de l'algorithme génétique



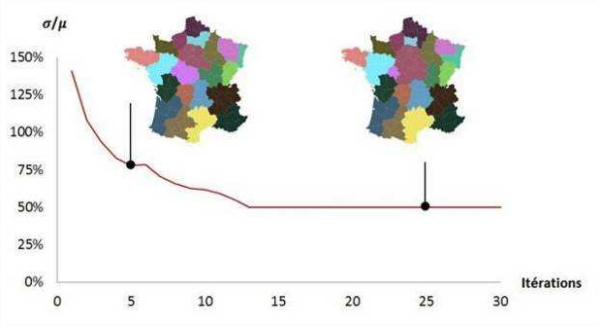
Coefficient de variation : 38%

Optimisation « administrative »

La perte d'information ayant lieu lors du carroyage des données ou de la simplification des entités territoriales à leurs centroïdes s'est révélée préjudiciable à la pertinence des résultats produits : les algorithmes ne voient pas de problème à découper les agglomérations ou à produire des formes peu réalistes pour des régions.
La dernière méthode consiste donc à partir des limites administratives existantes, plus dans la perspective de leur redistribution entre les différentes régions que dans l'objectif d'une remise à plat complète du découpage du territoire français. Un algorithme glouton est mis ici en place pour évaluer la succession optimale de transactions entre les régions pour la recherche de solutions, venant appuyer l'utilisateur de manière interactive lors de sa réattribution des départements aux régions.

A partir du découpage actuel, chaque région détermine une liste de départements voisins potentiellement rattachables. Ces listes sont agrégées en une liste à l'échelle de la France, puis chaque transaction entre les différentes régions est évaluée par sa capacité à réduire une mesure de l'écart entre les n ratios r_i, ici la moyenne des différences (qui donne une meilleure convergence observée que le rapport max/min ou l'écart type).
Cette mesure prend ensuite la forme d'un score, à partir duquel la meilleure transaction possible est sélectionnée, sur le modèle de l'algorithme glouton. Les scores sont enfin modulés afin de privilégier des formes de région compactes et proportionnées, mais cette modification se fait au détriment de la performance.

Une convergence rapide est observée, avec un rapport « sigma sur mu » passant de 140% à moins de 50% environ en quelques dizaines d'itérations. Un réglage fin des paramètres de la fonction score des transactions doit cependant être effectué à la main, ces paramètres ayant beaucoup d'influence sur la forme des solutions calculées : un compromis entre convergence des ratios et formes des régions doit ainsi être trouvé.



Convergence des ratios

Améliorations effectuées

Afin d'éviter les blocages de l'algorithme, deux stratégies sont proposées. Une mémoire des transactions effectuées est créée, afin d'éviter les optimums locaux lors de la recherche (contrainte de type "No U-Turn"). Au lieu de sélectionner la meilleure transaction à chaque itération, chacune des transactions reçoit une probabilité d'être sélectionnée proportionnelle à sa propension à faire converger le système (ou selon une loi arbitraire de puissance, pour favoriser les bons candidats).

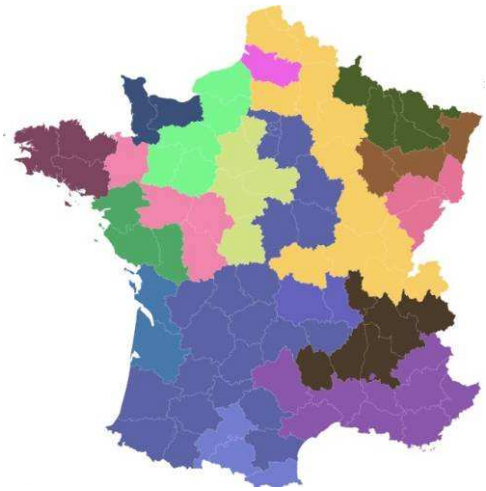
Le processus devient alors stochastique et empruntant un chemin dans l'espace des paramètres différents à chaque recherche de solutions.

Vu le nombre de facteurs à prendre en compte pour produire un découpage à la fois performant et réaliste, dont de nombreux facteurs qualitatifs tels la centralité de certains départements dans les régions, ou la viabilité de certains découpages, une collaboration entre l'utilisateur et l'algorithme est mise en place (convergence "assistée"). De manière interactive, pour chaque itération, l'algorithme propose sa transaction optimale, que l'utilisateur peut réaliser ou choisir d'ignorer pour imposer sa transaction.

Découpages obtenus :

Convergence "assistée" (40 %)

Convergence "non assistée", avec facteur de forme (45 %)



Convergence "non assistée", sans facteur de forme (5 %)

Etude de la performance du découpage NUTS 1 de l'UE (135%)

Approche par revenus

En première approche, nous faisons l'hypothèse que la consommation d'énergie est proportionnelle à la population des territoires. Afin d'affiner nos résultats, nous proposons d'évaluer la demande sur la base d'une étude (*Nouvelles représentations de l'énergie*, Cahier du Club d'Ingénierie Prospective et Environnement[224]) qui lie niveau de revenu des ménages, différencié par quintile, et consommation énergétique (en faisant l'hypothèse que cette consommation n'a pas évolué par rapport aux données de base de l'étude).

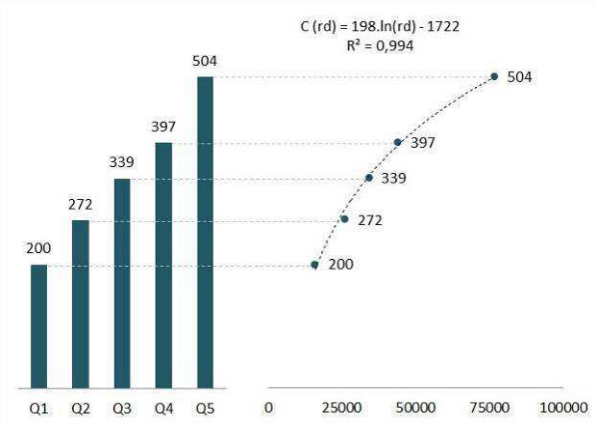
En croisant les données de recensement de l'INSEE avec les résultats de cette étude, nous obtenons une consommation énergétique des cantons et des départements. De nombreuses hypothèses ont été faites afin de déterminer le revenu moyen pour les cinq quantiles, pour chaque canton, pour déduire les consommations énergétique de chacun.

La cartographie de la demande énergétique *primaire* ainsi créée reflète les découpages socio-économiques du territoire : les centres villes se différencient nettement de leur couronne périurbaine, et les lignes de partage des agglomérations entre zones riches et pauvres apparaissent (par exemple pour la région parisienne, avec une nette opposition entre Est et Ouest).

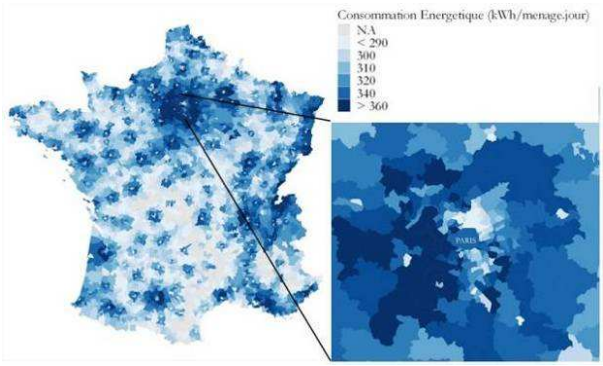
Il est probable que les différences entre les consommations réelles des ménages urbains et périurbains soient encore plus marquées en réalité. En effet, la base de nos calculs utilise une étude nationale ne prenant en compte les besoins en transport que de manière agrégée, et donc potentiellement réaffectés à tous les ménages : il serait nécessaire différencier parmi les ménages les types de transports utilisés, voiture individuelle et transports en commun notamment.

Cette approche en énergie primaire, qui prend donc en compte l'énergie grise de tous les processus liés aux consommations des ménages, permet néanmoins de créer une cartographie de la *demande* "relocalisée".

Si l'énergie n'était exportable que sur de très courtes distances et que chaque territoire devait devenir autonome pour sa production d'énergie et de biens, la distribution des consommations en France aurait cet aspect, avec des agglomérations très consommatrices malgré des centres systématiquement en retrait avec des problématiques liées aux approvisionnements.



Consommation d'énergie primaire par jour et par ménage, par quintile de revenu disponible en euros (kWh/ménage par jour). Rapportée à la personne (et sur la base d'une taille des ménages de 2,27 personnes en 2010, source INSEE), la demande en W varie alors entre 3670W pour le premier quartile (Q1) et 9250W pour le dernier quartile (Q5). Le quartile central (Q3) est à 6200W/pers.



Consommation énergétique primaire moyenne par jour par ménage (kWh/ménage par jour)

[224] Voir bibliographie.

De la science (politique)

Le découpage administratif en question

Alors que le premier ministre Manuel Valls annonçait le 8 avril 2014 un projet de redécoupage de l'Hexagone en douze régions, les travaux de *Reforme* livre des résultats opérationnels pouvant participer au débat politique et ainsi contribuer à une réflexion *post-stock* et *solarisée* de l'aménagement du territoire.

Notre troisième livrable permet de proposer plusieurs scénarios de redécoupage administratif de la France. Il permettrait d'éclairer et de donner des éléments complémentaires d'arbitrage pour refonder une *nouvelle équité territoriale*, basée sur une équivalence des trajectoires de *solarisation* pour de nouvelles régions. Ce principe permettrait d'assurer une relative homogénéité entre densités de demande et capacités du territoire en termes de production d'énergies renouvelables.

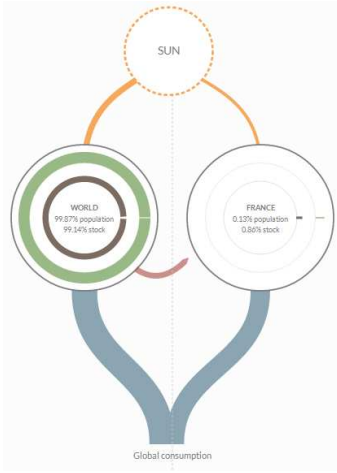
Poursuite de la démarche

Une démarche complète supposerait :

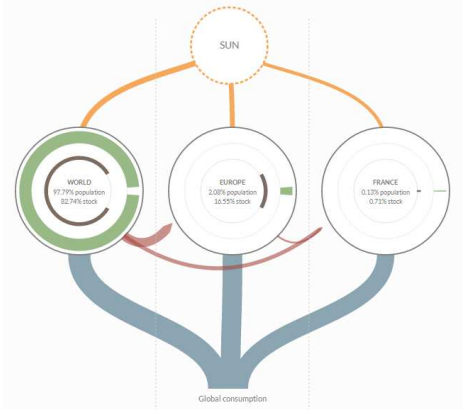
- Une prospective des demandes énergétiques aux échelles territoriales tenant compte des dynamiques de population (solde migratoire à différents termes, pyramide des âges etc.) mais également des trajectoires locales de réduction de la demande.
- La prise en comptes des gisements renouvelables spécifiques et locaux, tels que définis dans la deuxième partie, la *Formalisation.*

Fournir la toise nationale

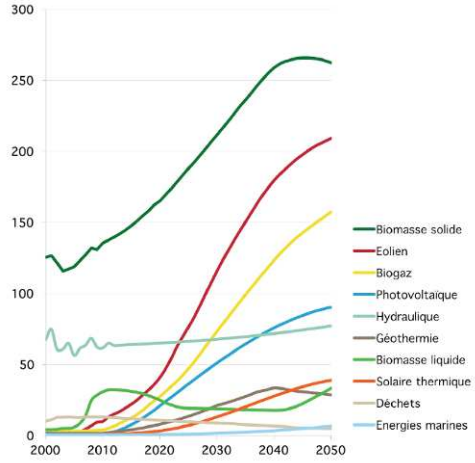
Cette *nouvelle équité* permettrait alors de *distribuer* de façon homogène transformations et nouveaux investissements sur cette nouvelle *partition* administrative, en phase avec la géographie comme élément de refonte de la *permanence énergétique.*



L'outil Reforme (solar-reforme.org). Représentation de la relation énergétique de la France avec le reste du monde en 2000.



L'outil Reforme (solar-reforme.org). Représentation de la relation énergétique de la France avec le reste de l'Eurpoe et monde sans l'Europe, un scénario 2050.



Le développement des différentes filières renouvelables selon le scénario négaWatt (en TWh par an) (source négaWatt)

Filip Dujardin

Les Infrastructures Solaires Urbaines

Une utopie locale pour la solarisation

Ultime *métamorphose* comme réflexion projectuelle, architecturale et urbaine : l'*Infrastructure Solaire Urbaine* ? Elle matérialise une renaissance de l'espace urbain qui maximise autoproduction et stockage d'énergie, en cohérence avec un bassin versant énergétique remembré[225].

Les *Infrastructures Solaires Urbaines* offrent un champ nouveau d'explorations : typologie des franchissements, matérialité des infrastructures et topologies des bandes. Elles proposent une trame pour régénérer des visions de transformations urbaines selon les limites physiques. Elles interrogent nos usages en nous appelons à devenir peut-être demain une société de *paysans urbains de l'énergie.*

Elles interpellent parallèlement la renaissance du couple énergétique ville-campagne : comment reprogrammer, remembrer la corolle productive extra-urbaine, le nouveau *bassin versant énergétique* en lisière de la *haute densité de demande.*

Quelles sont dès lors les conséquences urbaines du *régime permanent* ? Comment renforcer la sécurité et la robustesse d'approvisionnement de nos différentes énergies finales ? Pour les tissus existants, comment mettre en adéquation l'objectif d'une autonomie énergétique partielle ? Comment organiser des circuits courts d'approvisionnement ?

Dans la filiation des utopies radicales, les *Infrastructures Solaires Urbaines* convoquent un nouvel archétype, un dispositif de densification des existants, un outil de rationalisation de la production de tissus neufs.

Les Infrastructures Solaire Urbaines

Premier principe

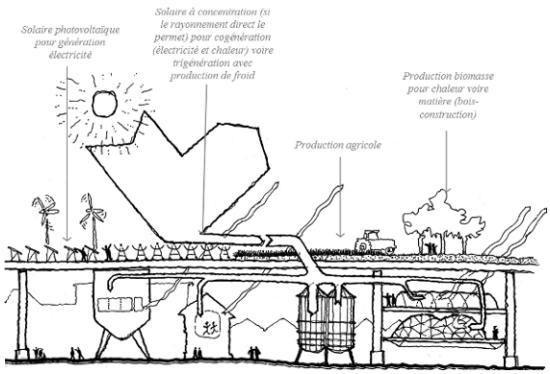
Les villes sont les sédiments des dissipations énergétiques de l'histoire des civilisations. Cette accumulation d'énergie grise s'est déposée sur la topographie naturelle.

Or, la récolte efficace suppose une grande homogénéité du plan de référence. Maximiser les récoltes, cela suppose de prendre le ciel comme topographie originelle. Baselitz peint ses portraits à l'envers ; les ISU créent la ville de la même manière. Les ISU renversent le plan de référence. Le plan horizontal n'est plus une équipotentielle de pesanteur : *il est l'orthogonale à la captation de la douche solaire.*

Dès lors, la régularité géométrique des bandelettes favorisera une captation efficace des flux énergétiques. Ces bandes, dont la largeur sera comprise entre 5 et 30 mètres, pourront posséder des altimétries doucement variables et permettre involutions et entrelacements. Leur largeur et la porosité lumineuse du tablier sera évidemment adaptée pour la lumière naturelle.

Ces bandes de récolte permettront d'adapter au fil des âges la répartition du mix de production selon les besoins (nourriture, électricité, chaleur,…) et selon les évolutions techniques. Dans les zones où l'ensoleillement direct est important, la surface des ISU pourront aussi accueillir des héliostats. Ces miroirs convergeront vers des clochers d'un nouveau genre : des concentrateurs solaires opérant la trigénération : électricité, chaleur et froid.

Enfin, en favorisant l'accès pour l'entretien des récoltes, les bandelettes fabriqueront des parcours urbains d'une nouvelle nature. Elles proposeront un nouvel horizon aux circulations douces. Leurs sousfaces abriteront les différents réseaux d'échange d'énergie : électricité, eau chaude, biomasse, …



Les bandes de récolte. Des techniques de production en surface adaptables dans le temps en fonction de l'évolution de la demande et des capacités techniques.

[225] Au sein agricole du terme.

Deuxième principe, stocker

La récolte suppose l'entreposage. Les fermes disposent de leur grenier. Les villes de demain devront renforcer leur réserve énergétique et la disponibilité de leurs capitaux énergétiques.

Stocker en ville suppose d'inviter un nouveau type d'éléments architectoniques servants. Ils seront les piles des ISU aux deux sens du terme. Ballons d'eau chaude, volant d'inertie pour le stockage de l'énergie mécanique, silos à grain, batterie électrique, stockage d'hydrogène, thermos d'eau réfrigérée, … : toutes les denrées nécessaires.

Stocker, c'est aussi mieux conserver l'énergie grise et se prémunir de l'obsolescence rapide du bâti. Ainsi, la dépense énergétique induite par l'acte de construire sera amortie le plus longtemps possible. Rappelons que l'amortissement de l'énergie grise immobilière peut coûter jusqu'à près de 500W par personne.

L'ossature des bandelettes assure support et desserte des programmes hébergés dans l'infrastructure : de la dépense d'énergie grise mutualisée et à longue durée d'amortissement. Les ISU permettent autant l'architecture que l'intégration de l'habitat informel et de l'auto-architecture en zone dense. *Une partition pour la diversité des architectures*.

Nous souhaiterions jeter les bases de la faisabilité du *Xanadu* énergétique urbain : la ville autosuffisante lors de son édification, autonome pendant sa durée vie et ses cycles successifs de construction-déconstruction. A l'heure où Markus Kayser développe le *Solar Sinter Project*, il s'agit de tester la faisabilité des prémices d'usines autosuffisantes, d'engins de chantier solaires comme les tentatives de *urban farming*[226] : revisiter la relation du bâtiment, de la ville, du paysage et de la production agricole[227].

Troisième principe, contenir

Les ISU contiennent la demande d'énergie. Elles contrôlent offre et demande dans le périmètre de l'aire urbaine. L'altimétrie de référence des bandelettes sera fonction des densités projetées, des tendances d'évolution des consommations individuelles et de la solarisation programmée de la toiture. Ces paramètres fourniront le résultat de l'objectif d'autonomie énergétique attendu.

Les ISU permettent aussi une modulation de la *demande* par une adaptation souple et continue du *contenant* habité : l'emprise individuelle dans le bâti est en osmose avec la variabilité et la réalité des besoins. Les pièces sont à géométrie variable en fonction de l'intensité de l'usage ; les besoins énergétiques associés au contrôle de l'ambiance et du climat sont dès lors parfaitement ajuster. Le squelette capable de l'infrastructure permet la légèreté et la réactivité de la peau architecturale.

Dans le cadre de la *Formalisation*, nous indiquions quelques ordres de grandeur en termes d'altimétrie capable sous nos latitudes. La section suivante propose d'explorer quelques hauteurs possibles des bandelettes en fonction des situations *géonergiques*.

[226] Référence : travaux de l'agence SOA
[227] Panos Mantziaras, La ville-paysage. Rudolf Schwarz et la dissolution des villes, Genève: MētisPresses, 2008.

Dimensionnement des ISU

Nous développons ci-après quelques évaluations des altimétries selon les paramètres actuels de *demande* individuelle en fonction de la latitude (et selon l'analyse conduite dans les *Représentations*). Cette dernière section comme ultime description des *Métamorphoses* et donc de *Reforme*.

Notons toutefois que la corrélation de l'intensité d'usage du bâti n'a pas été évalué : il est probable que la quantité de surfaces de plancher par personne soit plus faible à proximité de l'équateur. Ce point devrait davantage homogénéiser la hauteur des ISU en fonction des latitudes.

$$\text{HAUTEUR MAXIMUM [NIVEAUX]} = \frac{\text{GISEMENT SOLAIRE [W/m²]} \times \text{RENDEMENT CONVERSION [\%]} \times \text{EMPRISE USAGE [m²/pers]}}{\text{CONSO INDIVIDUELLE [W/pers]} \times \text{AUTONOMIE ENERGETIQUE [\%]}}$$

Scénario 100% | Autonomie et offre standard

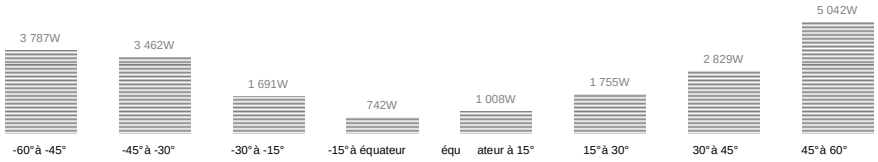
Les paramètres testés sont les suivants :

Autonomie	100%
Emprise	30%
Rendement	10%
Usage	60m²/pers

Dans ce cas de figure, les *Infrastructures Solaires Urbaines* assurent une autonomie complète dans la zone tropicale et dans la mesure où le nombre de niveaux est en moyenne inférieure à 2.

_DONNEES GEOGRAPHIQUES

latitude	-60° à -45°	-45° à -30°	-30° à -15°	-15° à équateur	équateur à 15°	15° à 30°	30° à 45°	45° à 60°
W/pers	3 787	3 462	1 691	742	1 008	1 755	2 829	5 042
W/m²	117	176	232	241	235	234	183	130

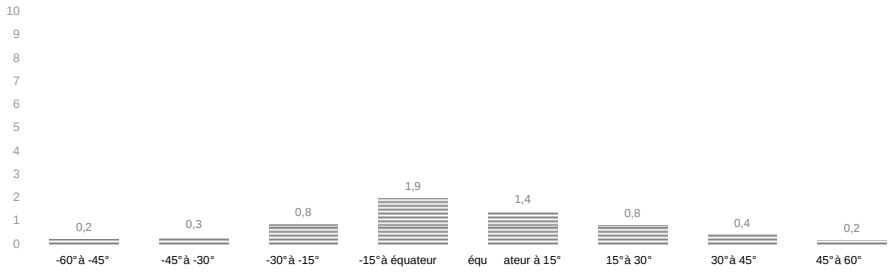


_HYPOTHESES URBAINES ET USAGE

autonomie	100%	[part de production énergétique dans le territoire urbain]
emprise	30%	[coefficient d'emprise au sol des ISU dans le terrtiroite urbain]
rendement	10%	[rendement de conversion solaire moyen des bandelettes des ISU]
usage	60	m²/pers [emprise moyenne par individu pour résidentiel, bureaux, commerces et équipements]

_RESULTATS POUR LES INFRASTRUCTURES SOLAIRES URBAINES

h_max	0,2	0,3	0,8	1,9	1,4	0,8	0,4	0,2
densité_max	9	15	41	97	70	40	19	8



Scénario 100%+ | Autonomie et offre augmentée

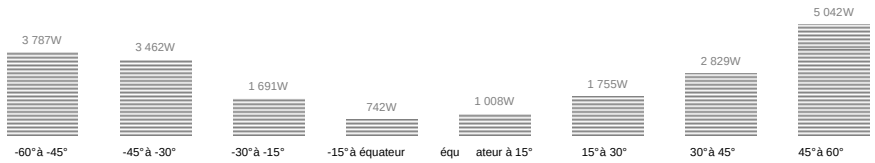
Par rapport à ce scénario, le ratio moyen de conversion solaire est doublé sur les « bandelettes ». Cette disposition pourrait être possible en augmentant sensiblement la part de solaire thermique, l'utilisation de photovoltaïque à haut rendement voire l'emploi de solaire à concentration permettant la cogénération.

Les paramètres testés sont les suivants :

Autonomie	100%
Emprise	30%
Rendement	20%
Usage	60m²/pers

_DONNEES GEOGRAPHIQUES

latitude	-60° à -45°	-45° à -30°	-30° à -15°	-15° à équateur	équateur à 15°	15° à 30°	30° à 45°	45° à 60°
W/pers	3 787	3 462	1 691	742	1 008	1 755	2 829	5 042
W/m²	117	176	232	241	235	234	183	130

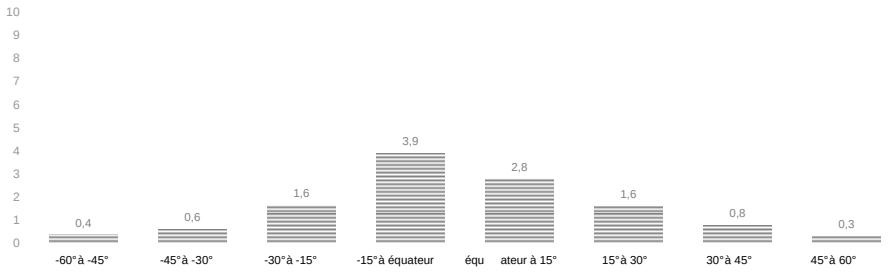


_HYPOTHESES URBAINES ET USAGE

autonomie	100%	[part de production énergétique dans le territoire urbain]
emprise	30%	[coefficient d'emprise au sol des ISU dans le terrtiroite urbain]
rendement	20%	[rendement de conversion solaire moyen des bandelettes des ISU]
usage	60	m²/pers [emprise moyenne par individu pour résidentiel, bureaux, commerces et équipements]

_RESULTATS POUR LES INFRASTRUCTURES SOLAIRES URBAINES

h_max	0,4	0,6	1,6	3,9	2,8	1,6	0,8	0,3
densité_max	18	31	82	195	140	80	39	15



Scénario 100% à 2000W

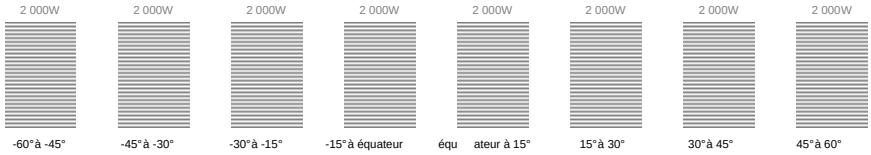
Pour ce scénario, les préceptes de la *Société à 2000W* se sont mondialement diffusés et l'interdépendance de la *demande* d'énergie avec la latitude n'existe plus : tout le monde consomme 2000W !

Dans la filiation de ce scénario de demande, nous considérons également un accroissement notable du rendement typique de conversion de l'offre. Le rendement moyen est porté à 30%.

Sur la totalité du globe, le nombre de niveaux *contenus* par les ISU est alors compris entre 1 et 2.

_DONNEES GEOGRAPHIQUES

latitude	-60° à -45°	-45° à -30°	-30° à -15°	-15° à équateur	équateur à 15°	15° à 30°	30° à 45°	45° à 60°
W/pers	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
W/m²	117	176	232	241	235	234	183	130

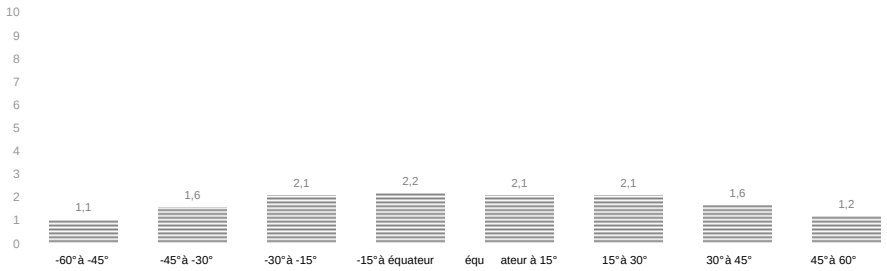


_HYPOTHESES URBAINES ET USAGE

autonomie	100%	[part de production énergétique dans le territoire urbain]
emprise	30%	[coefficient d'emprise au sol des ISU dans le terrtiroite urbain]
rendement	30%	[rendement de conversion solaire moyen des bandelettes des ISU]
usage	60	m²/pers [emprise moyenne par individu pour résidentiel, bureaux, commerces et équipements]

_RESULTATS POUR LES INFRASTRUCTURES SOLAIRES URBAINES

h_max	**1,1**	**1,6**	**2,1**	**2,2**	**2,1**	**2,1**	**1,6**	**1,2**
densité_max	**53**	**79**	**104**	**108**	**106**	**105**	**82**	**59**



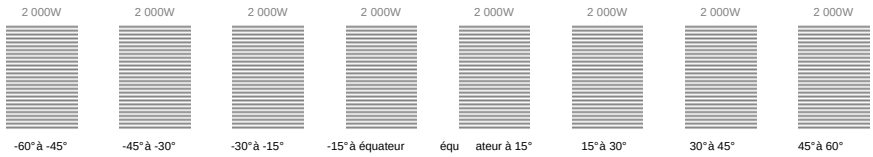
Scénario 50% à 2000W

Ce scénario vise un objectif *d'autonomie partielle* en supposant que la moitié de l'*offre* est assurée par d'autres territoires.

Dans ce cas de figure, les ISU peuvent atteindre des morphologies de type R+3 dans la bande tropicale. A latitude élevée, elles devraient être limitées à R+1 ou R+2.

_DONNEES GEOGRAPHIQUES

latitude	-60° à -45°	-45° à -30°	-30° à -15°	-15° à équateur	équateur à 15°	15° à 30°	30° à 45°	45° à 60°
W/pers	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
W/m²	117	176	232	241	235	234	183	130

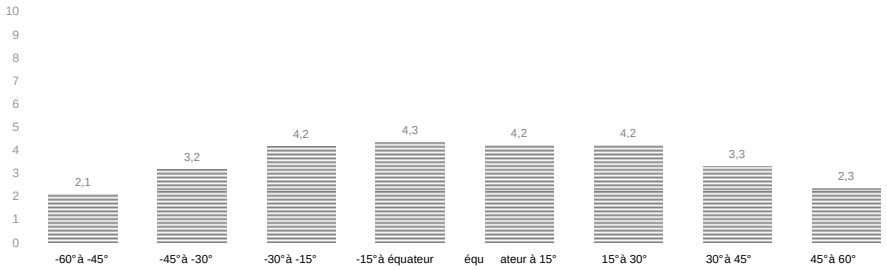


_HYPOTHESES URBAINES ET USAGE

autonomie	50%	[part de production énergétique dans le territoire urbain]
emprise	30%	[coefficient d'emprise au sol des ISU dans le terrtiroite urbain]
rendement	30%	[rendement de conversion solaire moyen des bandelettes des ISU]
usage	60	m²/pers [emprise moyenne par individu pour résidentiel, bureaux, commerces et équipements]

_RESULTATS POUR LES INFRASTRUCTURES SOLAIRES URBAINES

h_max	**2,1**	**3,2**	**4,2**	**4,3**	**4,2**	**4,2**	**3,3**	**2,3**
densité_max	**105**	**159**	**209**	**217**	**211**	**211**	**165**	**117**



Quelques représentations des ISU.

Une représentation des Infrastructures Solaires Urbaines au sein d'un tissu existant.

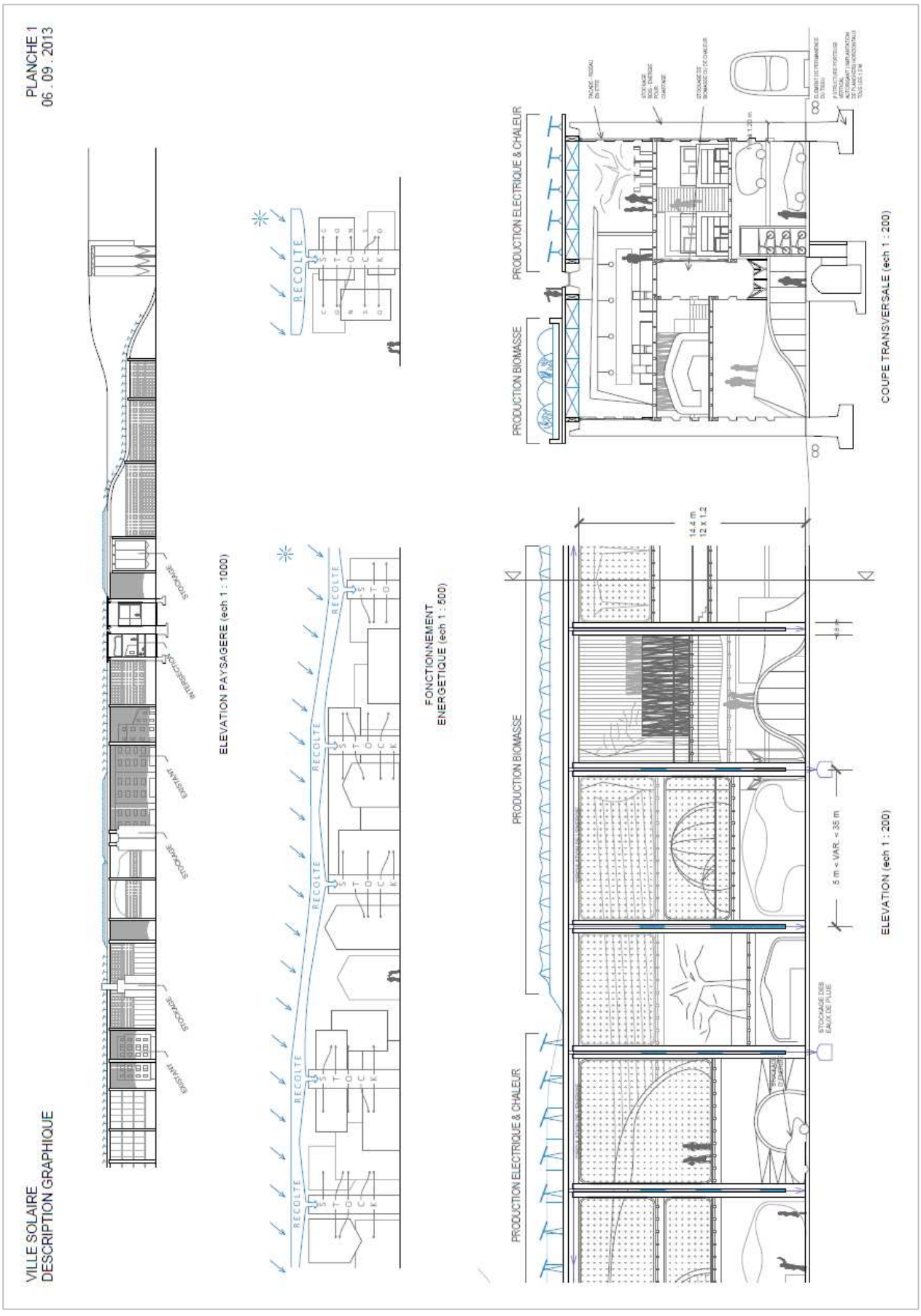


PLANCHE 1
06 . 09 . 2013
VILLE SOLAIRE
DESCRIPTION GRAPHIQUE
ELEVATION PAYSAGERE (ech 1 : 1000)
FONCTIONNEMENT
ENERGETIQUE (ech 1 : 500)
RECOLTE
STOCK
PRODUCTION ELECTRIQUE & CHALEUR
PRODUCTION BIOMASSE
COUPE TRANSVERSALE (ech 1 : 200)
ELEVATION (ech 1 : 200)
14.4 m
12 x 1.2
5 m < VAR. < 35 m
STOCKAGE DES
EAUX DE PLUIE

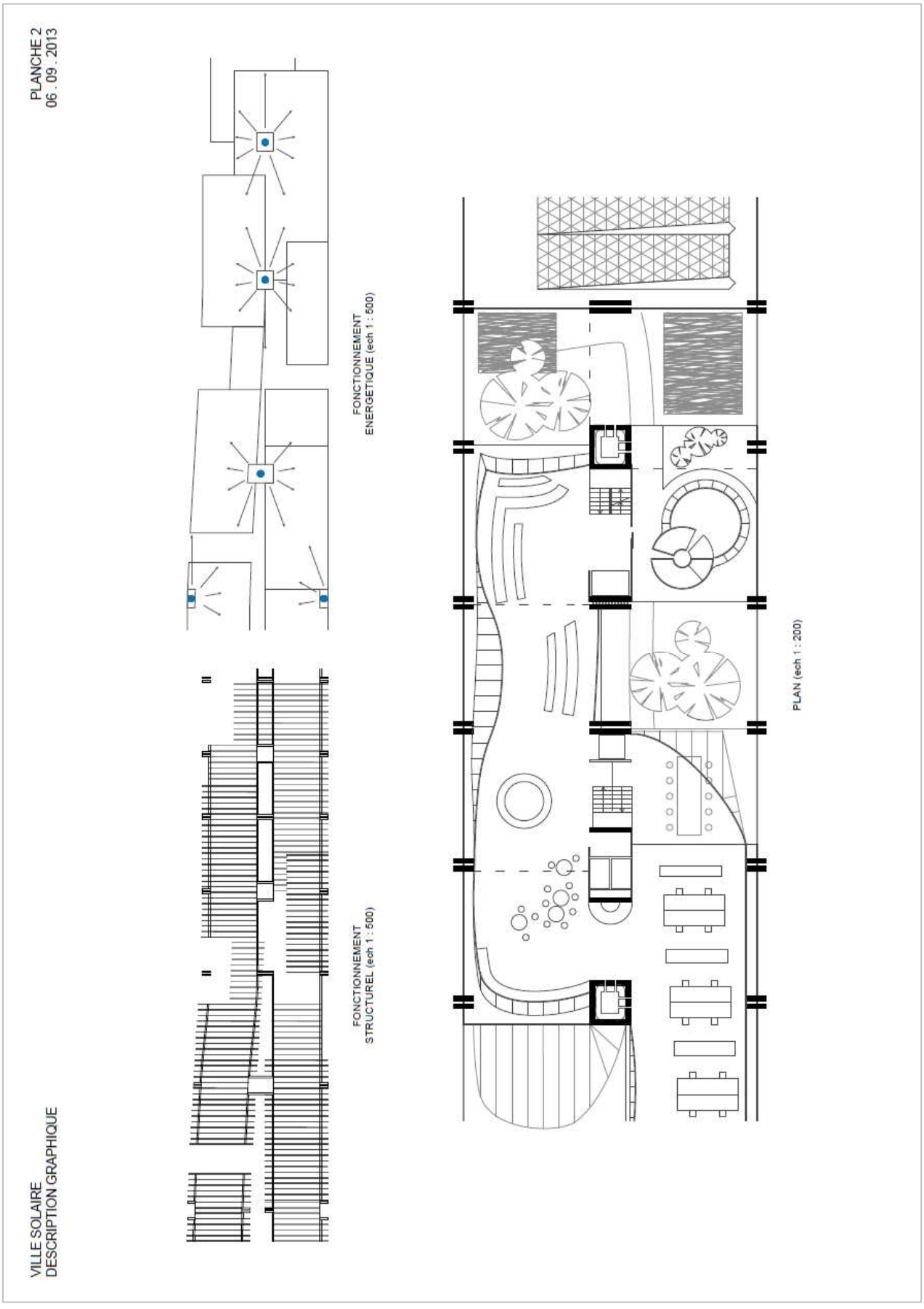
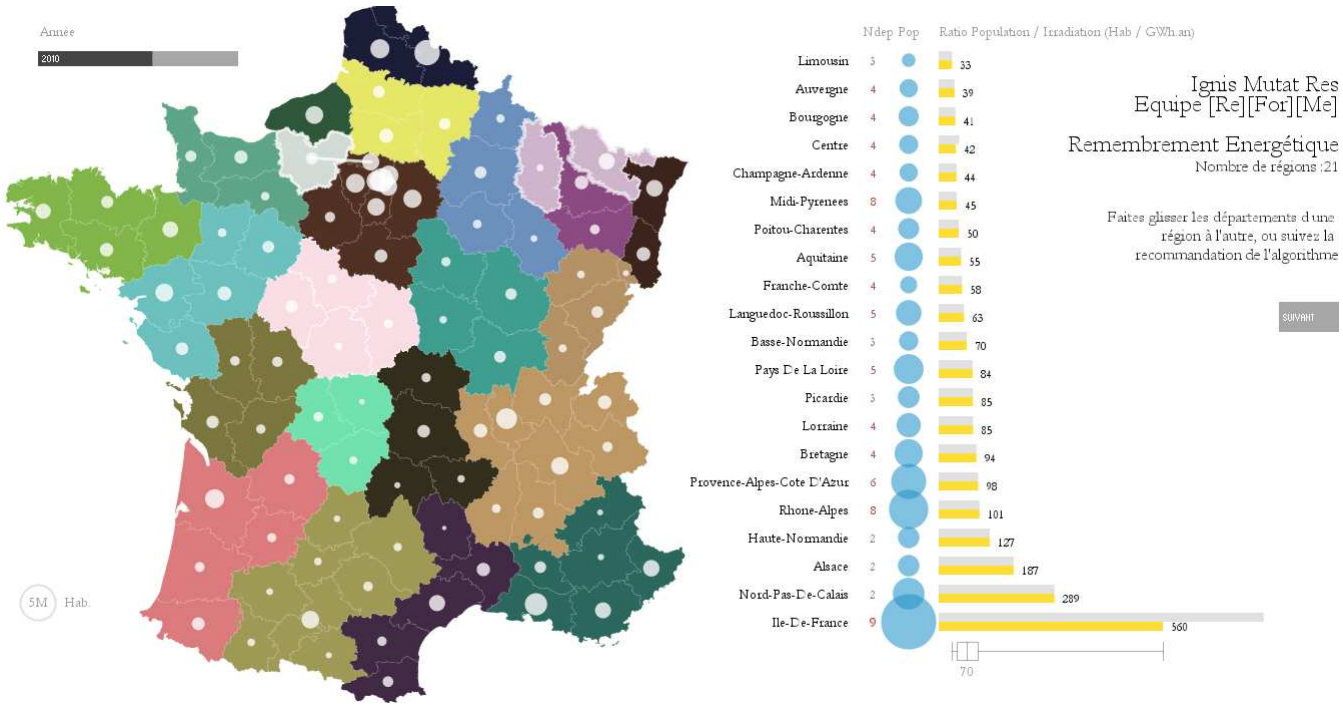
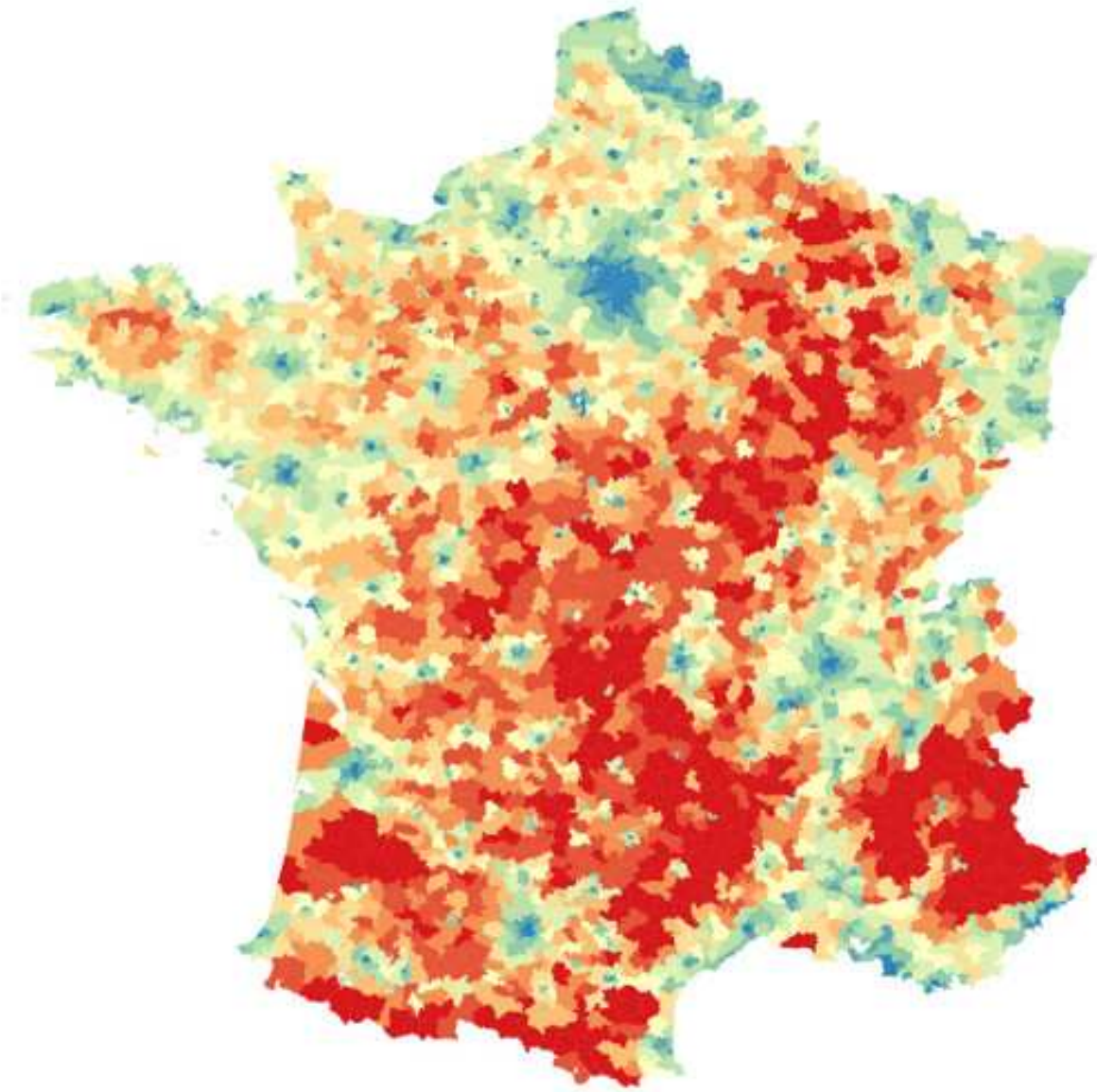


PLANCHE 2
06 . 09 . 2013
VILLE SOLAIRE
DESCRIPTION GRAPHIQUE
FONCTIONNEMENT
ENERGETIQUE (ech 1 : 500)
FONCTIONNEMENT
STRUCTUREL (ech 1 : 500)
PLAN (ech 1 : 200)

Une représentation des Infrastructures Solaires Urbaines au sein d'un tissu existant.



Livrable 3 : le logiciel territorial. Une application développée dans le cadre de Reforme et de la troisième partie, les Métamorphoses. Explorer la péréquation territoriale en vue d'homogénéiser les densités de demande et d'offre à l'échelle du territoire français métropolitain. Ce logiciel a pour objet de requestionner les bassins versants énergétiques pour chaque région française. L'histogramme de droite ordonne les classements successifs du rapport demande/offre. A chaque pas (« suivant »), l'application propose les regroupements territoriaux qui permettent d'homogénéiser les scores territoriaux



Carte cantonale de l'équilibre entre demande (nombre d'habitants) et offre (gisement solaire). La forme sinueuse rouge met en relief l'ensemble des territoires bénéficiant d'un rapport offre sur demande favorable. A l'inverse, les concentrations métropolitaines (en vert foncé et bleu) possèdent les ratios potentiels d'autonomie les plus faibles

Cas pratiques pédagogiques

Ils relatent les liens étroits que le projet *Reforme* a entretenu avec :

- La mise en place et la première promotion 2013-2014 du DPEA Architecture Post-Carbone à l'ENSAVT ;
- Les questionnements et les évolutions pédagogiques de la modernité enseignée à l'ENSAPB et notamment le projet du 30-30 ;
- Les réflexions constructives et architecturales dans le cadre des participations au Solar Decathlon avec l'ENSAPM

DPEA Architecture Post-Carbone

« *La construction, même durable, de nos villes et de nos bâtiments présuppose beaucoup d'hypothèses :*

- *la permanence de la croissance*
- *l'abondance garantie d'énergie bon marché*
- *la substitution aisée des énergies fossiles par des énergies renouvelables*
- *la résolution des problèmes sociaux par des constructions nouvelles*
- *la pérennité de nos styles de vie*
- *la continuité de nos systèmes politiques et économiques*

Les conséquences physiques et humaines qui découlent des profondes transformations environnementales en cours imposent à elles seules de réenvisager la façon dont nous faisons l'architecture et la ville. »

Dennis Meadows,
«*Preparing Cities for the Age of Declining Oil*»,
Conférence inaugurale du programme *Ignis Mutat Res*,
novembre 2011.

Introduction

Une formation née dans le sillage de IMR

Le contenu pédagogique du *DPEA Architecture post-carbone* a été développé au cours des années 2011 et 2012. La première promotion a débuté en septembre 2013 à l'Ecole d'Architecture de la Ville et des Territoires à Marne-la-Vallée. Le cadre général de la formation est le suivant :

• formation de 3ème cycle
• s'adressant à des architectes diplômés
• se fondant sur les spécificités de la formation des architectes
• partenariat avec l'*Ecole des Ponts ParisTech*, double diplôme
• complémentarité entre outils et conception
• complémentarité entre cours et projet
• caractère prospectif et exploratoire
• en prise directe avec les demandes du monde de la construction
• multi-échelle: du composant à l'îlot

Eléments du programme d'enseignement

Organisation

Programme des séminaires de l'année 2013-2014

Enseignements de projet

Deux projets en lien étroit avec Reforme

Nous décrivons dans ce qui suit deux enseignements de projet, nés en lien étroit avec les avancées de recherche du projet *Reforme*. Ces deux exercices présupposent en effet :

- Des adéquations et des réflexions fortes avec les questions climatiques ;
- Une appréciation par l'étudiant de la *demande* énergétique de son projet sur un certain périmètre d'usage ;
- La scénarisation de dispositifs de *stoks* et d'*offre* ;
- La mise en place de *représentations* novatrices au cours de l'élaboration du projet (diagrammes de Sankey, plans de récolte, …

Projet Cobaye

Enoncé du sujet

L'exercice a pour objet la définition d'une architecture de petite dimension, modeste mais précise, mise en forme spécifiquement pour une combinaison unique de lieu et d'usage. Elle pourra être nouvelle ou, au contraire, se greffer sur une construction existante. Elle permettra alors d'améliorer, de modifier, voire de détourner l'usage de l'architecture initiale.

Greffe ou nouvel organisme, ce petit projet reste le prétexte à l'invention concrète d'une organisation matérielle complètement aboutie et d'assemblages réfléchis et résolus. Cette organisation matérielle et concrète aura ici pour objectif, au-delà des vertus classiques et incontournable de l'architecture, de réduire radicalement l'empreinte énergétique du projet.

On s'intéressera autant à la consommation énergétique nécessaire à l'établissement d'un endoclimat favorable au sein d'un exoclimat spécifique qu'au contenu énergétique des matériaux et produits mis en œuvre.

L'exercice permettra donc d'imaginer puis de dessiner et enfin de valider numériquement comment médiation climatique, frugalité énergétique et nécessités physiques de la construction (propriétés physiques des matériaux, gammes des opérations et transformations possibles avec ces matériaux, économie de moyens, …) peuvent interagir pour alimenter la forme et l'usage du projet.

Nous vous demandons de créer une architecture minimale, un *tonneau de Diogène* énergétique. Il s'agit d'un lieu de travail et de vie, d'une surface limitée à 20m² et/ou 50m³ intérieur. Vous vous intéresserez à ce seul élément, sans hypothèse quant à sa multiplication potentielle.

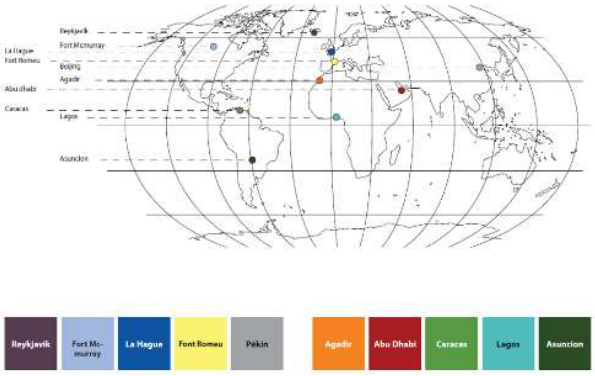
On devra pouvoir aussi y assurer les fonctions essentielles de vie : se laver et cuisiner. Ce fragment sera étudié parallèlement dans dix environnements climatiques distincts qui seront imposés aléatoirement à chacun d'entre vous :

1. Abu Dhabi (UAE)
2. Agadir (Maroc)
3. Asunción (Paraguay)
4. Beijing (Chine)
5. Reykjavik (Islande)
6. Caracas (Venezuela)
7. Font-Romeu (France)
8. Fort McMurray (Canada)
9. La Hague (France)
10. Lagos (Nigéria)

Dix villes, dix climats, dix modes de vie… Votre travail sera articulé en trois étapes. Il sera d'abord nécessaire d'analyser le climat de votre site:

- températures maximales et moyennes,
- humidité relative et précipitations,
- éclairement direct et diffus
- ensoleillement, intensité et position
- direction et intensité du vent (voire identification d'évènements extrêmes)
- et de le comparer à celui de Marne la Vallée sous la forme de tableaux, croquis et d'un cadran solaire adapté aux deux localisations.

Vous tacherez également de caractériser les dégré-jours pertinents en 2015 et 2050 (selon une température de consigne basse et éventuellement une haute). Vous tirerez de cette analyse les principes auxquels devra répondre le projet.



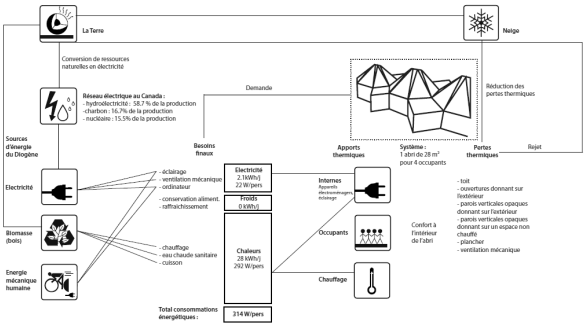
La carte des dix situations de projet du projet Cobaye (source DPEA Architecture post-carbone)

Dans un second temps vous imaginerez le projet comme un volume et comme une membrane, comme un espace et comme sa limite. Cet aspect tridimensionnel sera traité sous la forme de plusieurs maquettes d'étude (au minimum trois) au 1:50, accompagnées de diagrammes, de croquis à l'échelle et d'une note qui précise le fonctionnement, qui décrivent et explorent l'emploi de matériaux variés, sous la forme d'alternatives contrastées, et justifie ainsi l'emploi de des procédés constructifs raisonnés.

A ce stade, vous essaierez idéalement d'estimer les besoins énergétiques selon les usages (chaud, froid, etc.) selon les mois. En fonction des approvisionnements énergétiques renouvelables choisis, vous évaluerez les productions mensuelles. Vous estimerez ainsi les degrés d'autonomie atteint selon les mois. Vous tacherez parallèlement d'estimer le coût énergétique de la construction (énergie grise ou incorporée).

La mise au point du projet dans se concentrera sur l'étude des matériaux et des modes d'assemblage, sur l'intégration des problématiques énergétiques, dans le cadre des objectifs définis dans les phases précédentes du projet. Elle sera élaborée à travers une maquette du projet au 1:20, ou plusieurs, coupes et plans complets à l'échelle 1:1.

Vous conserverez méthodiquement la trace des évolutions du projet, sous la forme d'un carnet d'esquisses, de diagrammes, de croquis, de textes, de photos de maquettes et d'impressions de version provisoires des hypothèses que vous serez amenées à explorer.



Un extrait de rendu : visualisation de la demande énergétique (source DPEA Architecture post-carbone)

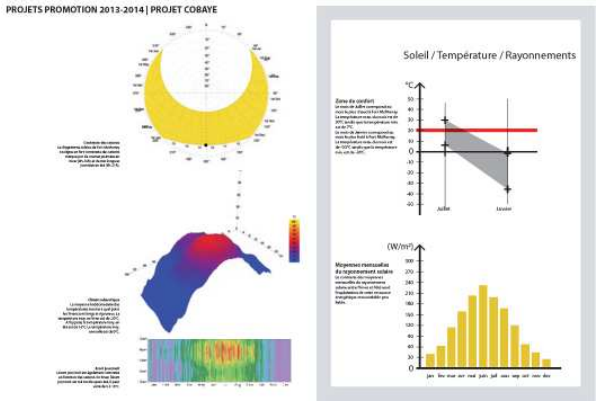
Enseignements pédagogiques

L'exercice pose une série de questions. Comment l'architecture réagit-elle aux différentes conditions géographiques et de votre choix :

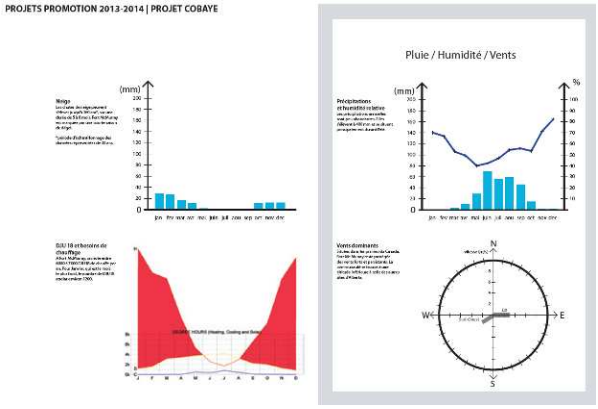
- par les espaces et les usages qu'elle génère ?
- par les formes d'efficacités énergétiques qui vous semblent devoir primer
- par la prise en compte des déplacements disponibles selon les contextes géographiques et territoriaux que vous choisirez

Quelles morphologies –à toutes les échelles—peuvent résulter de ces réflexions ? Quels matériaux, lourds ou légers, linéaires, surfaciques ou volumiques et modes d'assemblage répondent à ces préoccupations ? Quelle est la matérialité du projet ? Comment collecte-t-on l'énergie et à partir de quelles sources ? En fonction du climat et des usages, quelle adéquation trouver entre la captation d'énergie et les déperditions engendrées par un objet de petite dimension (syndrome du nouveau-né)
Comment ces résultats sont-ils obtenus de la façon la plus frugale possible ? Comment cette architecture saura-t-elle s'adapter à l'horizon 2050 ? (et vous tacherez de scénariser les incertitudes possibles et les réponses de votre projet à l'évolution du contexte)

Extrait de rendu

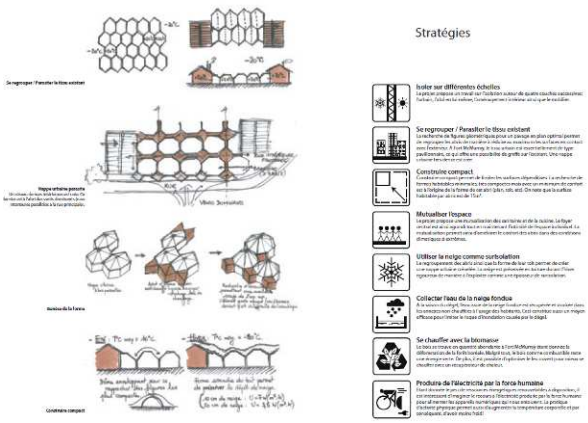


Un extrait de rendu : analyse climatique (source DPEA Architecture post-carbone)



Un extrait de rendu : analyse climatique (source DPEA Architecture post-carbone)

Maquette de rendu du projet situé à Caracas



Un extrait de rendu (source DPEA Architecture post-carbone)

Projet long : « 2000 personnes à 2000 watt »

Enoncé du sujet

L'exercice a pour objet la définition d'une architecture, ayant capacité à proposer une nouvelle typologie urbaine.

A horizon 2050 et dans un contexte géographique choisi, le projet devra élaborer une réponse morphologique et constructive, permettant d'assurer une autonomie et une robustesse d'approvisionnement énergétique pour des tissus neufs et/ou existants.

L'exercice permettra ainsi d'explorer des stratégies architecturales et urbaines permettant d'augmenter les capacités de production d'énergie des tissus urbains en fonction des situations climatiques et topographiques.

Le projet devra explorer de façon documentée :

Les capacités d'offre énergétique locale (de production d'énergies renouvelables) et élaborer des réponses pertinentes de récolte de cette énergie. A une emprise et une topographie donnée, quelles sont les stratégies permettant d'augmenter la « solarisation » des tissus urbains ?

Le contrôle de la demande (ou de la consommation énergétique) en analysant à la fois les valeurs de consommation individuelle et la densité urbaine. Comment mettre en adéquation densité et autonomie énergétique ?

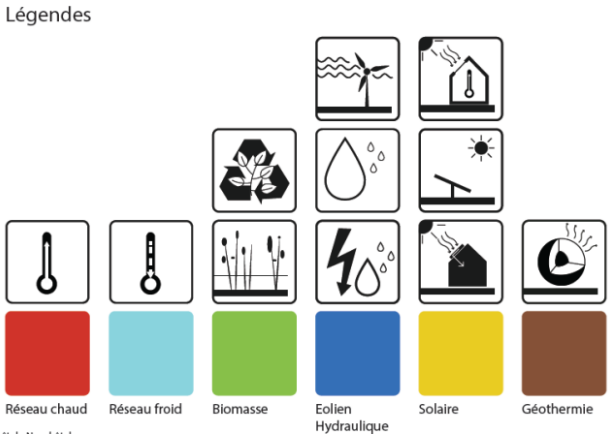
Les capacités de stockage énergétique selon les différents besoins finaux en situation urbaine (chaleur, froid, électricité, alimentation et mobilité) ;

Pour illustrer les points 1) et 2) et à titre d'exemple, l'équipe *Reforme* (dans le cadre de la première session du programme *Ignis Mutat Res*) a identifié les corrélations suivantes en fonction de la latitude. En fonction de l'emplacement du projet, ces valeurs devront néanmoins être précisées et scénarisées à horizon 2050.

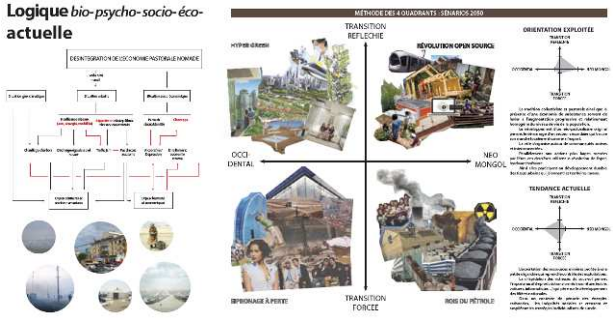
Toujours dans le cadre du programme *Ignis Mutat Res*, l'équipe *Réforme* a analysé cette question. Vous pourrez notamment interpréter la relation ci-dessous pour le dimensionnement des points 1) et 3).

Notez aussi que l'emprise d'usage est un terme important de cette relation d'équilibre. Vous devrez là-encore cette valeur de façon contextuelle (à titre d'exemple, l'emprise d'usage associé au logement est d'environ 40m² en Europe alors que cette valeur est plus proche de 15m² dans les pays émergents, et avec de grande disparité).

En 2050, au sein de votre contexte géographique et urbain, vous identifierez des hypothèses de consommation individuelle d'énergie selon quatre besoins primordiaux : alimentation, chaleur, froid et mobilité. (en W/pers)



Un extrait de rendu (source DPEA Architecture post-carbone)



Un extrait de rendu : scénarisation en 2050 en Mongolie (source DPEA Architecture post-carbone)

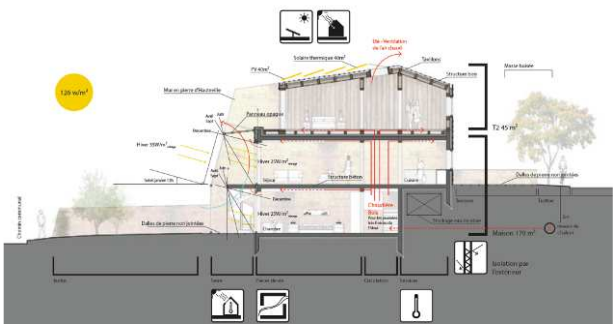
Parallèlement, votre projet devra également interroger la question constructive et l'obsolescence du bâti. A une échelle intermédiaire entre architecture et urbain, cette typologie devra dès lors proposer un dispositif efficace sur la totalité de son cycle de vie. Votre projet devra ainsi donc documenter les stratégies constructives permettant de réduire le poids de l'énergie grise, amortie dans l'évaluation de la consommation individuelle.

A titre d'exemple, la consommation d'énergie primaire pour l'édification d'un logement en France est de l'ordre de 1000kWh/m² construit. Si l'emprise d'usage résidentielle est d'environ 40m² par personne, le « coût constructif » par individu est de l'ordre de 40 000kWh pour la production de l'espace. Si la durée de vie de ce bâti est de 40 ans, alors l'amortissement est donc de 1000kWh par an et par personne soit environ 114W par personne.

Première partie : énergie

Nous vous demandons de proposer un ilot ou une collection d'objets bâtis ou un édifice unique, multi-programmatique permettant d'assurer l'autonomie d'usage de 2000 personnes. Votre projet devra permettre d'assurer la globalité des usages spatiaux pour ses 2000 habitants : logement, bureaux, locaux d'artisanat, commerces et équipement public. En fonction des contextes, vous définirez l'allocation programmatique. Ces analyses puis vos choix permettront alors de statuer sur l'emprise d'usage des 2000 habitants. Faut-il prévoir 50m² par habitant ou 25m² ? La somme programmatique de l'édifice sera alors comprise entre 50 000m² et 150 000m².

En fonction du climat et de vos hypothèses culturelles et techniques, vous évaluerez une estimation de la demande énergétique de vos habitants. En 2050 et au sein de votre site, consommeront ils 5000W, 2000W ou 1000W ? Vous dresserez cette estimation en évaluant six postes : électricité, alimentation, chaleur, froid, mobilité et amortissement de l'énergie grise.



Un extrait de rendu : coupe à Neuchatel (source DPEA Architecture post-carbone)

A partir de la carte des usages, vous développerez une réflexion technique sur les méthodes possibles de captation de l'énergie solaire (comprenant les potentiels directs ou indirects comme l'éolien ou l'hydraulique) depuis votre édifice (et pour certains sites de la géothermie).

En fonction du contexte urbain et selon votre choix, vous statuerez alors sur une hypothèse d'autonomie énergétique. Vous serez alors en mesure d'évaluer la hauteur équivalente en appliquant la relation proposée ci-haut.

Vous entamerez alors une réflexion morphologique pour l'insertion de votre édifice dans un contexte que vous aurez défini et de l'étude de site que vous aurez effectuée.
Seconde partie : forme et matière
La seconde partie d'élaboration du projet consistera dès lors à développer des stratégies constructives permettant d'optimiser le coût énergétique de votre construction (et de ses sous-parties) du point de vue de sa matérialité et de sa mise en œuvre.

Pour chaque stratégie, vous testerez les répercussions sur votre première estimation du sixième poste de consommation individuelle, à savoir l'énergie grise de votre édifice. Cette valeur sera divisée par la durée de vie que vous estimerez, selon la nature des matériaux employés et de votre choix de mise en œuvre. Cette valeur sera alors divisée par le nombre d'habitants. Vous pourrez alors évaluer la « dette constructive » de votre édifice en W par habitant.

Cette évaluation sera également un instrument d'arbitrage de design de ou des enveloppes de votre édifice : faut-il s'attacher par exemple à optimiser la réduction de la demande de chaleur pour le chauffage si le surcout énergétique d'une enveloppe sophistiquée est plus lourd ? Vous pourrez alors spécialiser votre projet dans des dualités du type lourd | léger, high tech | low tech, naturel | synthétique…

Cette question sera aussi directement relative à vos choix structurels et à la nature des schémas statiques que vous aurez définie. Vous intégrerez également une première approche des coûts énergétiques pour les technologies solaires ou de production renouvelable que vous aurez décidé d'installer.

Enfin, vous devrez également questionner la question des stockages énergétiques à l'échelle de l'édifice et ce, afin de préfigurer une adéquation entre offre énergétique (votre mix renouvelable intégré dans l'édifice) et demande énergétique (les courbes de charge des différentes consommations énergétiques).

Règles et sites

Pour ce projet « 2000 personnes à 2000W », vous serez en équipe de deux. Les cinq situations géographiques seront les suivantes :

1. Ulan Bathor (Mongolie)
2. Fès (Maroc)
3. Neuchâtel ou Marne-la-Vallée (Suisse)
4. Mexico (Mexique)
5. Tokyo (Japon)

Phase 1

1. Recherche et analyse urbaine : histoire organisation et forme présente ;
2. Analyse environnementale du site : climat, ressources, pollution ;
3. Analyse énergétique quantitative et qualitative : offre, demande, stockage ;
4. Formulation des hypothèses de base 2050 : alimentation, chaleur, froid, mobilité ;
5. Etablissement des documents de base : maquette physique et virtuelle 1/500, héliodon… ;
6. Mise en forme et présentation analyse et des hypothèses de travail.

Phase 2

1. Esquisse architecturale et urbaine, maquette 1/500 ;
2. Esquisses constructives, coupes ;
3. Estimation besoins énergétiques ;
4. Choix des stratégies de collecte d'énergies renouvelables ;
5. Mise en forme et présentation des esquisses.

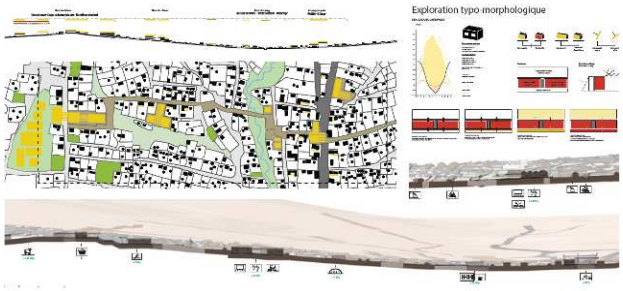
Phase 3

1. Définition de stratégies constructives contrastées, minimum 3, coupes 1/100 et 1/50 ;
2. Comparaisons énergétiques ;
3. Mise au point individuelle de deux solutions, plans 1/100, coupes 1/20 ;
4. Maquette 1/100.

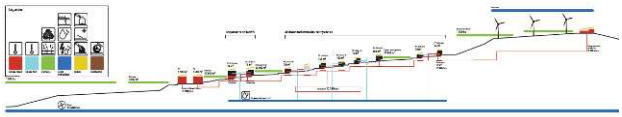
Phase 4

1. Reprise des maquettes ;
2. Reprise des dessins généraux et de détails ;
3. Reprise analyse et description énergétiques ;
4. Note de description des matériaux et des équipements ;
5. Synthèse et présentation graphique.

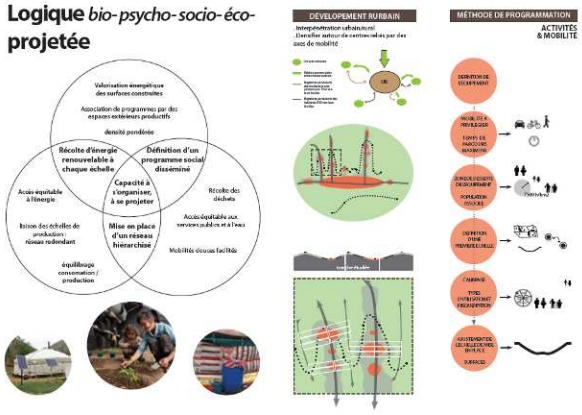
Phase 5 – Jury final



Un extrait de rendu : périmètre d'influence énergétique en Mongolie (source DPEA Architecture post-carbone)



Un extrait de rendu : coupe de récolte à Neuchatel (source DPEA Architecture post-carbone)



Un extrait de rendu : périmètre d'influence énergétique en Mongolie (source DPEA Architecture post-carbone)

Calculette énergie - morpho | janvier 2014 | version 0.1

Projet #2 | "2000 personnes à 2000W ?" | DPEA Architecture Post-Carbone | ENSAVT

Donnée de site

Gisement solaire horizontal moyen

1	Flux moyen	200	W/m²

Hypothèses du projet

Emprise d'usage

2.1	Logement	25	m²/pers
2.2	Activité	15	m²/pers
2.3	Equipement public	5	m²/pers
2	Total →	45	m²/pers

Rappel Société à 2000W

Identification de la demande énergétique

3.1	Chaleur →	690	W/pers
3.2	Froid	50	W/pers
3.3	Electricité	50	W/pers
3.4	Alimentation	300	W/pers
3.5	Mobilité	1 000	W/pers
3.6	Energie grise →	260	W/pers
3	Total →	2 350	W/pers

Calculette chaleur (3.1)

Chauffage	20	kWh/m².an
Cuisson	4	kWh/j.pers
ECS	10	kWh/j.pers

Calculette énergie grise (3.6)

Construction	1 500	kWh/m² construit
Obsolescence	30	ans

Rendement moyen de conversion solaire

4.1	Biomasse	5	% de la toiture et rendement moyen	1%
4.2	Photovoltaïque	40	% de la toiture et rendement moyen	15%
4.3	Solaire thermique	30	% de la toiture et rendement moyen	45%
4.4	Autres	5	% de la toiture et rendement moyen	10%
4.4	Fraction non productive →	20	% de la toiture	
4	Rendement moyen →	40	W/m²	

Conséquences projet

Cas 1 : je choisis mon autonomie

5	Autonomie visée	30	%
6	Nombre de niveaux max. →	2,6	niveaux
	Densité max. →	567	hab/ha

Cas 2 : je choisis ma hauteur

5	Nombre de niveau moyen	2	niveaux
	Densité →	444	hab/ha
6	Autonomie maximale →	38	%

La modernité après

Introduction

Enseigner *mieux* le projet d'architecture ? Où situer l'amélioration pédagogique dans l'enseignement de l'architecture aujourd'hui ?

Dans son ouvrage « L'architecture moderne », Alain Colquh'oun situe la fin de la modernité en 1965, Bernard Huet, dans sa dernière conférence à Belleville le 7 juin 2001, date et situe la fin la période moderne dès l'inauguration du couvent de La Tourette en 1953, Jean Patrick Fortin la datait au jour du premier choc pétrolier en 1973. La fin d'une énergie abondante et bon marché à usage occidental et sans conscience collective mondiale (incidence climatique, pollution, finitude des ressources) aurait sonné le glas de la période moderne. Nous sommes en 2014 ; 40 années de postmodernisme architectural se seront traduites, en réalité, par l'avènement de l'enseignement de l'architecture par le projet, selon des modalités aux fondements spécifiques. Pour l'évolution de cet enseignement, le recul critique du prisme de l'énergie permettra d'assumer de nouveaux choix.

Quelles sont les références de progression d'un enseignement du projet ? Les arguments de différenciation entre un enseignement sur le fond né de la modernité et un enseignement pré-moderne de la forme restent ils toujours à préciser ? Comment échapper, par exemple, à l'exercice de composition centrée, donc symétrique, des « neuf carrés[228] » ? …

J'ai appris de la recherche[229] de Michel Corajoud la manière dont Lenôtre appuyait géométriquement son travail de jardinier/paysagiste. Il y montre comment s'exercer au relevé sur le terrain, le conduit à passer de l'hypothèse de la déclinaison d'une grille au pas régulier, qui ferait de lui un concepteur classique, émule de la symétrie et de la stabilité, à l'hypothèse d'une conception baroque où se déploie la géométrie du rapport doré par l'inscription des angles et des figures dynamiques de la spirale et du pentagone.

Le croisement de considérations planaires, dues à l'inscription durable de traces de projet, ou programmatiques, en réponse à une maitrise d'ouvrage, et paysagères, sur les modifications induites par une matérialité vivante au profit de vivants, manifeste la complexité du projet versaillais. Michel Corajoud présume dans cette recherche que la science projectuelle de Lenôtre engage de notre part des investigations sur la coupe autant que sur le plan. Non pour confirmer un travail illusionniste d'une géométrie optique dévoyée, mais pour accéder à la cohérence d'une stratégie, territoriale, spatiale et artistique, de laquelle déduire un processus enseignable pour la formation d'un paysagiste de projet.

La grille favorise une expression abstraite par abscisse et ordonnée, indépendante du territoire où elle se développe. Globalisante, tout point lui appartient par multiplication ou division de son pas. Au contraire l'origine d'un système qui se développe vers l'infiniment grand ou l'infiniment petit procède d'un choix qui relève d'un fort déterminisme subjectif. Ce point d'ancrage n'a pas d'équivalence lors de l'emploi du découpage en « extrême et moyenne raison » remarqué par Euclide.

Quand Le Corbusier se propose de travailler sur un plan carré de plus de 20 mètres de côté il se différencie de Palladio en évitant la centralité du carré, le renforcement des médianes et leur symétrie. Le déplacement oblique de l'espace devient un enjeu architectural moderne rendu possible par la discontinuité du plan, sa liberté. La rampe continue est un élément du plan qui déplace le centre de l'édifice, relie tous les niveaux du sol au ciel et s'associe à la notion de promenade architecturale. De la dissociation du parcours du regard de celui du corps résulte une liberté « hors grille ».

Qu'en est-il de ces questions consubstantielles à la démarche projectuelle de l'architecte à l'heure du bilan Carbone ? Doit-on immédiatement renvoyer aux oubliettes des débats picrocholins ou esthétisant que je viens d'évoquer pour laisser place à l'avènement de l'architecture bioclimatique performante écocentrique et amnésique ?

[228] John Hejduk, Cooper Union (NY) dans les années 80', cité par Michel Kagan, Propos recueillis par Françoise Arnold et Daniel Cling, extraits de l'ouvrage "Transmettre en architecture. De l'héritage de Le Corbusier à l'enseignement de Henri Ciriani", paru en 2002 aux Éditions du Moniteur (248 pages).

[229] Un extrait de cette étude a été publié dans Les annales de la recherche, n° 18-19, 1983, sous le titre « Versailles : lecture d'un jardin »

Le 30-30 & le 30-30scope

Cohérence du cadre expérimental avec l'objet de la recherche.
Le cas pratique d'un studio d'architecture, lieu d'apprentissage du projet, sert de support à un questionnement sur l'évolution du rapport contemporain entretenu par pédagogie et milieu, compris sous l'angle de l'énergie.

Cadre académique du support pédagogique de l'expérimentation

Un enseignement du projet d'architecture en ENSA[230], à Paris-Belleville. Le studio « 30-30 », semestre 5 en 3ème année du cycle du diplôme d'études en architecture (DEEA), équivalent Licence de l'ENSAPB, est constitué autour d'un groupe de 25 élèves, encadrés par un enseignant structure et enveloppe, Jean Marc Weill[231], et le responsable du studio, Alain Dervieux, avec la collaboration de Raphaël Ménard et Paul Azzopardi, auteurs de l'outil pédagogique 30-30oscope.

L'expérience accumulée des années scolaires 2011-2012, 2012-2013 et 2013-2014 est sollicitée comme support d'expérimentation, d'analyse et de réflexion pour cette étude.

Légitimité de la démarche

Pourquoi une expérimentation pédagogique, pourquoi ce studio ? Actualité d'un exercice pédagogique, ou : le rapport entre énergie et espace par le plan libre.

Sous une conduite collective à laquelle je m'associe activement, le studio d'enseignement du projet d'architecture connu sous l'appellation 30 30, fait l'objet ou bénéficie depuis son invention (1980) :

- de plusieurs recherches financées par le BRA : *L'espace de l'architecture moderne* (C. Vié, H. Ciriani, A. Dervieux, avec différents rapports de recherches entre 1980 et 1989) et *L'espace 30 30, un enseignement moderne du projet moderne* (O. Gahinet et A. Dervieux), 1998-2000.

[230] École Nationale Supérieure d'Architecture.
[231] Jean Marc Weill est architecte dplg, formé à l'ENSA Nancy et ingénieur, CNAM et Harvard, professeur STA titulaire à l'ENSAPB. http://www.ceingenierie.fr/agence/equipe.php

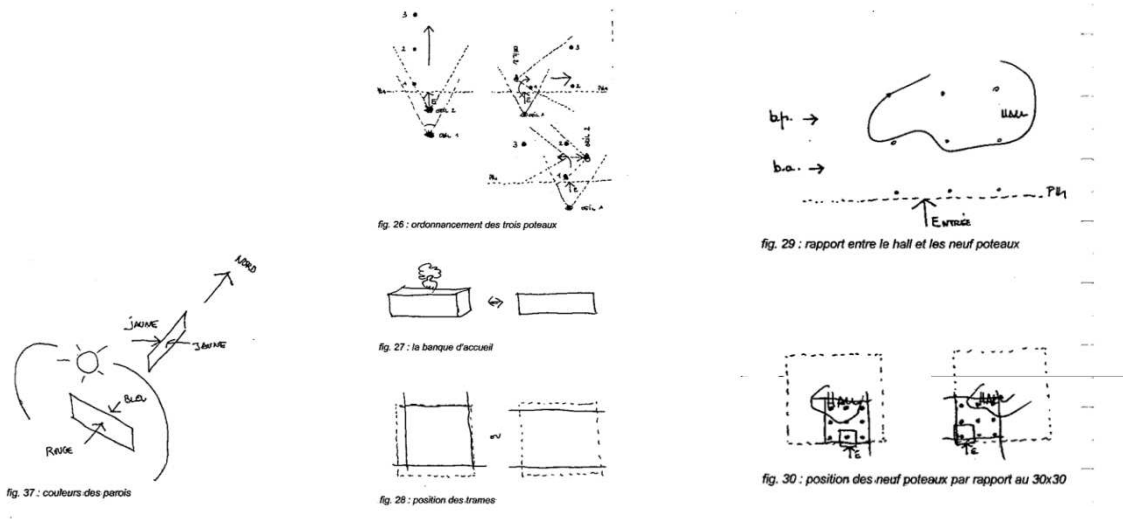


Illustration : travaux étudiants Ciel ENSAPB Mudri

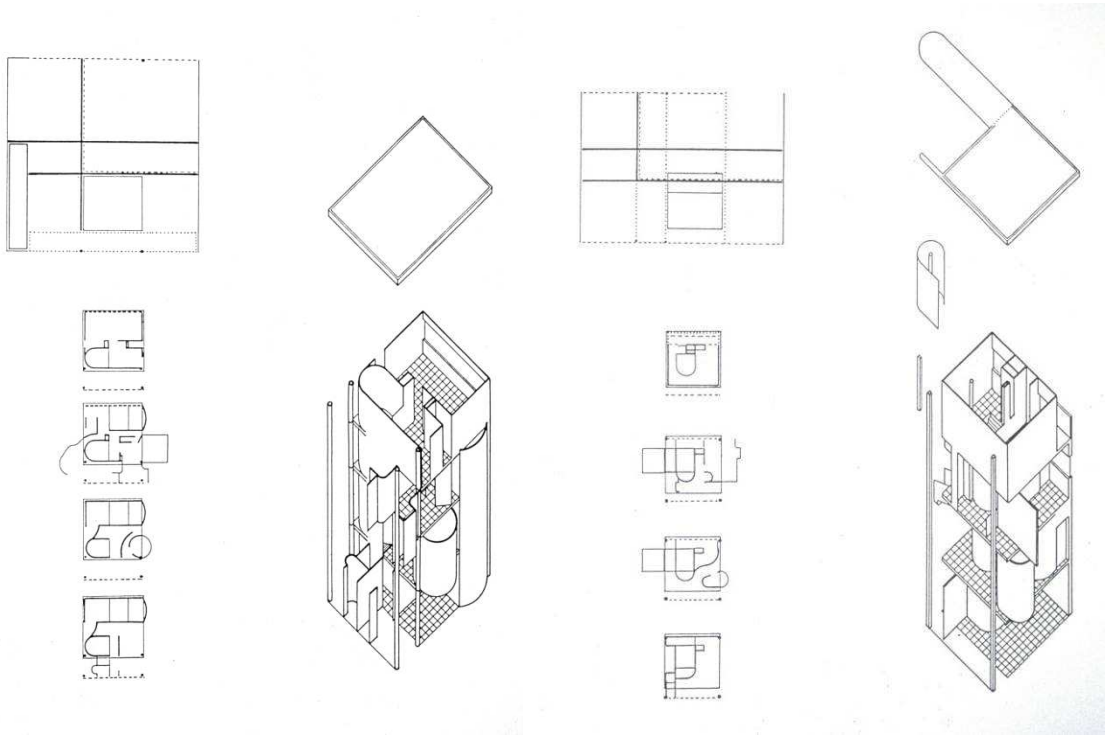


Illustration : extraits de deux recherches « L'espace de l'architecture moderne » : le thermos du projet des villas Meier de Le Corbusier, 1925 » et « 30mètres par 30 mètres ».

- D'expérimentations (2004-2007) avec Ljubica Mudri[232] (ingénieur, chercheur) sur les variations des mesures de la lumière (luminescence et luminosité) au cours de la conception d'un espace à la périphérie régulière et aux éclairements latéraux et zénithaux, par de micro caméras étalonnées.
- De développement du rapport structure, enveloppe et espace par convergence du chiffre et du trait dans l'enseignement conjoint du

[232] Diploma in Architecture from the University of Belgrade. PhD in Energy (Day lighting) from the École Nationale Supérieure des Mines de Paris. http://www.deluminaelab.com/download/presentation_deluminaelab.pdf

projet par un architecte et un ingénieur, avec Jean Marc Weill, depuis 2010.

Aujourd'hui une expérimentation mesurable du rapport entre les qualités lumineuses et thermiques d'un espace, avec ses qualités fonctionnelles et d'usage mises en rapport par le dessin d'un plan libre, est possible à mener. En effet, les recherches antérieures sur la nature de l'espace moderne, sur l'enseignement du plan libre, sur les mesures[233] de la lumière (comme facteur thermique et d'éclairement) préparent à l'étude de la coordination entre qualité spatiale et qualité thermique au service du projet. La maitrise du projet d'architecture suppose de ne pas inféoder ces notions l'une à l'autre et réciproquement. Le dessin, pris au sens strict du tracé du plan, peut régler le rapport de dépendance entre espace et énergie (reçue ou émise, à l'instant comme dans le passé et le futur). L'apprentissage du plan libre dans ce studio oriente et garantit par sa rigueur les expérimentations à mener dans ce domaine. Les conditions d'étude sont réunies et les outils d'expertise existent.

La principale hypothèse peut s'énoncer ainsi : Une expérimentation mesurable, du rapport simultané entre les qualités lumineuses et thermiques d'un espace avec ses qualités structurelles, fonctionnelles et d'usage, mises en rapport par le dessin d'un plan libre dans l'espace tridimensionnel, augmente la conscience projectuelle de l'étudiant. Elle traduit en ENSA, une pratique approfondie d'une interdisciplinarité hiérarchisée, dans l'enseignement du projet.

Conditions pratique de l'expérimentation.

À l'heure actuelle, la particularité de cet enseignement repose sur le refus de spécifier structure, enveloppe et architecture comme éléments hétérogènes à articuler. Dans un édifice à deux niveaux, le plan matériel en instance de définition du premier niveau sert à répartir la programmation en surface comme en sous-face et à développer une présence physique à la gravité contrôlée, ainsi qu'un déploiement de l'enveloppe chargé de contrôler les échanges avec le milieu où il se trouve. Les réactions en chaine ne sont pas hiérarchisées à priori. L'usage guide le dessin de l'espace qui guide celui du plan qui guide la répartition des efforts physiques qui guide le dessin de l'intériorité et ses limites ! Mais cet ordre logique est celui de la décomposition de l'apprentissage. L'interaction des éléments montre qu'une pensée hiérarchisée est nécessaire pour penser la complexité du projet mais que les éléments qui y participent sont interactifs et non hiérarchisés dans leurs valeurs. La démarche, peut débiter à un endroit quelconque, mais sa progression nécessite le recours à des synthèses partielles.

Dans l'objectif d'une amélioration pédagogique, plusieurs hypothèses peuvent être faites selon le semestre pendant lequel la relation de l'énergie au projet est posée. Dans l'exercice de projet L3 S5 : le 30 30, *il existerait une relation directe entre échanges thermiques quantitatifs (énergie captée, restituée, lumière, apport énergétique) et projet qualitatif de l'espace par le dessin (contour et incidences d'usage et de structure) du plan libre.* De manière complémentaire dans l'exercice de projet L3 S6 : 4 fois 1 égalent 5, *il existerait une relation directe entre échanges thermiques quantitatifs (énergie captée, restituée, lumière, apport énergétique) et projet qualitatif de l'espace par le dessin (topologie et incidences d'usage et de structure) de la coupe libre.* La combinaison potentielle de ces deux hypothèses conduirait à chercher comment un questionnement de l'enveloppe libre, comme combinaison du plan libre et de la coupe libre, serait à l'origine d'un concept pédagogique opérationnel et synthétique, utilisable dès le premier des deux semestres de troisième année.

Postulats du studio 30-30

Le principe du studio repose sur l'existence d'un volume aux contours volumétriques fixes (30mx30mx7m). Son exploration s'accompagne de la conception d'un espace, dédié aux usages qui traduisent le programme d'une bibliothèque publique, dans le mouvement même de sa découverte. À l'origine du travail la volumétrie est virtuelle. Dans un repère cardinal elle est définie par un carré qui ne présume pas du traitement des limites. Elle se matérialisera par l'arête d'un plan horizontal afin de suggérer le lieu de l'entrée.

Le travail initial de l'étudiant consiste à concevoir cette entrée. Il doit appréhender trois difficultés à surmonter : transgresser la périphérie du volume abordé (la présence architecturale), accompagner le passage du corps de l'extérieur à l'intérieur (l'usage), articuler la lumière solaire et la lumière[234] architecturale intérieure (la physique architecturale).

L'enveloppe de l'édifice fait l'objet d'un travail ultérieur. Dans une hiérarchie qui décompose l'articulation des espaces, les étapes chronologiques sont intitulées : L'entrée, (« Un poteau »), l'accueil (« 3 poteaux »), le cœur (hiérarchie des parcours principaux « 9 poteaux » accompagnés par l'escalier « Le hall »), établies en perspectives, puis les maquettes : « La maquette couleur, 1/200ème » répartie le programme par une figure spatiale, le plan libre ; « La maquette blanche, 1/100ème » est celle de l'intégration des usages à l'échelle du corps (parcours, de meuble, rangement et lecture); « La maquette meublée » comporte la face supérieure confortant l'éclairage zénithal ; « La maquette PH2 », avec enveloppe complète et lumière latérale ; « La maquette finale 1/50ème» figure la matière mise en œuvre conceptuellement au profit d'un questionnement de la matérialité.

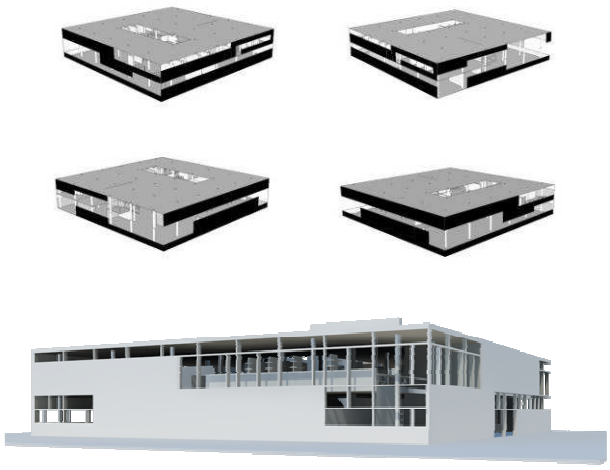
Cette décomposition inclut en particulier:

- La stratégie d'organisation du plan du sol *en diagonale* (par directions successives vers l'avant, nord, et vers le côté, est ou ouest) ou *en parallèle* (profondeur, vers le nord, par succession de directions est/ouest).
- La stratégie de relation entre niveau du sol et niveau supérieur.
-

Ces stratégies permettent de générer, de manière cohérente, une qualité d'enveloppe qui repose : sur les échanges lumineux (différenciées entre insolation et luminosité), visuels (sélection de vues pour chaque situation programmatique) et sur le contrôle des échanges thermiques.

Nous considérons que cette cohérence qualitative est un acquis du plan libre corbuséen, dont la manipulation progressive et consciente est proposée par cet exercice.

La façade de l'édifice n'apparaît comme question en soi qu'au moment de la recollection ultime. Synthétiquement les façades sont chargées de réaliser l'enveloppe et de nous conduire vers l'entrée, depuis toutes les approches.



Illustrations : dessin des façades rationalisant les nécessités de vue et de lumière exigées par l'espace intérieur et ses spécificités programmatiques (opaque/vide). Le travail, ici en cours, témoigne de la nécessité d'articulation entre les différentes faces du volume enveloppe. En particulier d'une dynamique y compris au passage des angles, vers l'entrée. Sans site, les questions de vis à vis, horizons urbains, etc., ne soutiennent pas la démarche du réglage de ces faces. L'enveloppe achevée montre comment les faces Nord Est, Ouest ainsi articulées (opaque et vitré) conduisent à l'entrée situé sur la face Sud

[234] Lumières que Le Corbusier se garde bien de différencier dans sa définition, « L'architecture est le jeu savant correct et magnifique des objets sous la lumière. », Vers une architecture, éditions Crès et Cie, Paris, 1923.

L'interprétation de l'enveloppe, perçue depuis l'intérieur (en maquette ou perspective) est conditionnée exclusivement par les effets qu'elle produit en sens unique. C'est la conséquence d'un enseignement réductionniste. D'un point de vue expérimental la mesure de l'interaction d'un corps étranger dans un milieu préexistant[235] est évidemment passionnante et explique l'usage[236] que font les architectes de l'Histoire de l'architecture quand ils la soumettent à l'analyse architecturale.

La façade ne participe pas d'un dialogue avec le site (il n'y en a pas) mais d'un monologue entre un édifice et son milieu. Le terme de réduction[237] est pédagogiquement revendiqué. Le réductionnisme sert ici à qualifier le plus précisément possible un rapport, mono orienté, situé au milieu d'un apprentissage de l'architecture par le projet. Il permet de se concentrer sur les données solaires, lumineuses, climatiques de la région Ile de France. Il est prévu d'expérimenter le studio à partir des données liées aux origines des étudiants Erasmus et en transfert.

Espace Structure Enveloppe

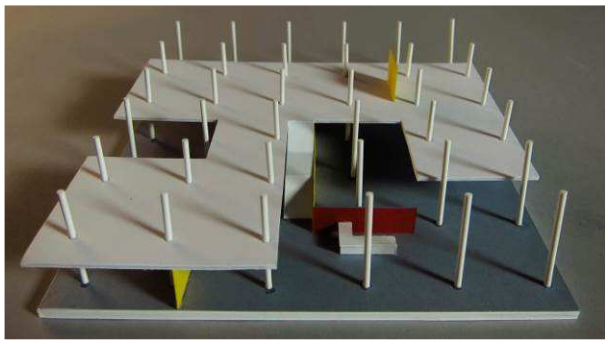
Ces trois axes de lecture des projets sont ceux que nous retenons pour élaborer l'exercice projectuel du studio : « 30-30, la maison du livre ». Cette triangulation, fruit d'une évolution récente, d'une envie pourtant ancienne, relève le défi[238] d'un enseignant du projet d'architecture contemporain. Différents collègues capables d'incarner la posture de l'ingénieur ont contribués aux expériences précédentes (Daniel Bernstein, Ljubica Mudri, Dominique Druenne[239]). C'est avec l'apport de Jean Marc Weill que la collaboration trouve sa pleine maturité.

Espace

L'espace comme mobile.

La notion d'espace est au cœur de la première recherche à laquelle j'ai participé comme étudiant puis comme diplômé et enseignant débutant : « L'espace de l'architecture moderne ». Avec d'autres études, françaises et étrangères,[240] les auteurs ont établis un corpus d'études et de définition qui ont affermit le déploiement d'un enseignement transposant de manière critique les acquis de la modernité dans le champ pédagogique. Ils ont ainsi participé ainsi à l'élaboration enseignement supérieur hors de l'académisme, des structures d'apprentissages et de compagnonnages.

La réflexion menée dans cette étude tient compte de ces acquis. La notion d'espace est instrumentalisée dans la démarche pédagogique. Elle sert au développement de la capacité à qualifier l'espace en relation avec ses conditions matérielles et sociales. Les termes d'usage, de structure, de confort traduiront cette attente à ce niveau d'étude. La richesse de la spatialité, dans ses dimensions sensorielles ou poétiques, est explorée de manière très limitée. Nous la concentrerons sur la relation stratégique qu'entretiennent *le plan libre et l'enveloppe*. On s'accordera à penser que la mise en œuvre pédagogique de cette relation est susceptible d'éprouver les capacités d'une maitrise de la tridimensionnalité voire de la spatialité.

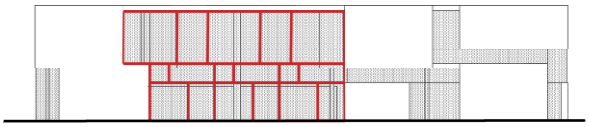


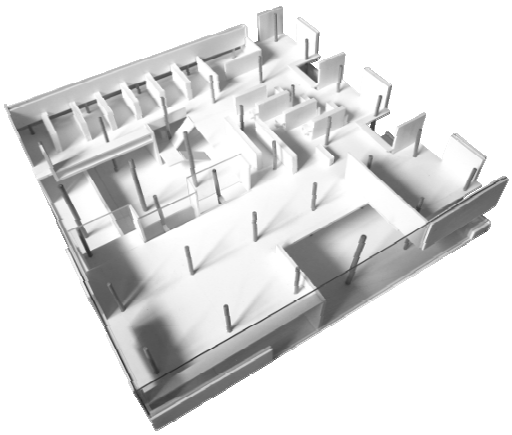
Illustration, la maquette de la figure du plan libre. Parois rouges orientées sud, bleues pour le nord, jaunes pour l'est et l'ouest répartissant les cinq grandes entités programmatiques de la bibliothèque. Escalier lent, en blanc, appartenant au PH1.

[235] Du type poussée d'Archimède.
[236] Pour notre part nous le réservons par exemple au studio suivant, S6 L3 et au cours de Théorie de l'architecture précédant, S4 L2.
[237] Établir ce qu'on enseigne a toujours pour corolaire de reconnaître ce que l'on n'enseigne pas.
[238] Je convoque ici mon expérience d'enseignant élu puis nommé à la Commission culturelle scientifique et technique du Ministère de la Culture et de la Communication, puis du Groupe de travail qui lui succède depuis 1998. Les tentatives d'articulation entre enseignements STA et TPCAU y sont effectivement lisibles dans tous les programmes en application des réformes de 1998 et 2005.
[239] Tous trois architectes et enseignants à l'ENSAPB.

[240] Suisses, Bruno Reichlin ou Lamunière, à Genève et Lausanne ou américaines, John Hejduk à la Cooper Union, Kenneth Frampton, pour ne citer que quelques exemples.

Penser l'espace en architecte. Sur quels supports étudierons-nous la relation entre plan libre et enveloppe ? Les principales variables que nous avons identifiées nous rappellent l'importance de :
- l'incidence de la figure du plan ainsi que sa surface et la position de l'escalier, sur le volume d'air compris entre le plan du sol[241] et le plan libre[242], ou entre le plan du sol et le plan supérieur[243], qui prend part à l'enveloppe de l'édifice.
- l'incidence sur la lumière et les échanges thermiques, selon la répartition entre opacités et ouvertures dans l'enveloppe, latérales et zénithales (façades et PH2) en fonction, d'une part, de leurs orientations solaires et, d'autre part, des besoins programmatiques. Les données analysées pour une vingtaine d'étudiants ; en voici un exemple pour l'étape du 1/100ème :
la liberté par le développement de l'autonomie relative de la structure, arrêts du PH, position du mobilier de stockage et de lecture, et l'usage de trames écossaises[244].





Illustrations : Trois exemples de façade relevant de la trame écossaise. La traduction en profondeur de la trame est visible en maquette : quand elle concerne aussi la structure, l'installation du mobilier…

Enveloppe

Le lieu de la synthèse des échanges intérieur extérieur, visuels, lumineux, thermiques.

De la façade à l'enveloppe. À l'étude des 4 compositions et des cinq points différentes remarques peuvent être faites sur la notion d'enveloppe. Le Corbusier emploie le mot sans se soustraire complètement au vocabulaire académique qu'il cherche pourtant L'attitude est ambigüe au regard de la valeur symbolique et urbaine de cette partie du bâtiment. Durant les années 20, en l'absence d'un système de proportion clairement établie autour des mouvements du corps (Le Modulor) la tentation du tracé régulateur garant d'une harmonie de façade sera forte.

Proportion vide/plein:	Sud: 1/2 Ouest:1/2 Est:1/1 Nord:1/1	
Le linéaire de périphérie du plan libre global: En contact avec l'enveloppe:	140.40 m 63.4 m	
La surface du plan libre: La surface de parois par orientation sud/nord: est/ouest:	612.50m2 124m2 75m2	
La taille (et l'orientation) de l'ouverture du PH2:	5m(est-ouest) x10m(sud-nord)	50m2
Le nombre de places assises pour les adultes et pour le livre:	50 places	

Mais par ailleurs ses dessins comme son attitude[245] tendent à en minorer l'importance[246]. Les expérimentations extra continentales[247] révèleront la nécessité de dissocier l'enveloppe de la peau de l'édifice et Le Corbusier, libéré, déploiera entièrement le propos des *Cinq points pour une architecture nouvelle*. Les exemples de la villa Curutchet (1949, Buenos Aires) ou de la villa Shodan (1955, Ahmedabad) en témoignent. Les brise-soleils vont en particulier permettre de dissocier distinctement le volume virtuel de la villa, de sa limite, entre intérieur et extérieur. La terrasse de la villa Savoie en préfigure les moyens : fenêtre en longueur, tablette, mobilier, structure.

[241] Nous nommons le plan horizontal, niveau zéro : *PH0*
[242] Nous nommons plan libre, le plan horizontal, niveau 1 : *PH1*
[243] Nous nommons le plan horizontal, niveau 2 : *PH2*
[244] On entend par trame écossaise : plusieurs trames aux pas différents et décalés dont la superposition traduit par un rythme aux effets dynamiques. Si les façades de Richard Meier en sont l'exemple didactique (musées comme habitation), celles de Xénakis au couvent de La Tourette en sont l'accomplissement musical.

[245] « La porte d'entrée serait sur le côté; et pas dans l'axe. Serions-nous passibles des foudres de l'académie? » Lettre à Madame Meyer, Le Corbusier, 1925.
[246] … au profit de la coupe et du plan comme représentations et du volume général, « axonométrique » pour ce qui concerne une analyse rapide des dessins.
[247] Asiatiques en Indes, à Chandigarh et Ahmedabad, et Américaines à La Plata (Argentine) et à Harvard, Cambridge (États Unis).

La maitrise de la périphérie de l'édifice ouvrira à la déclinaison en toute indépendance : premièrement de l'insolation par le brise soleil (son épaisseur orienté) et le toit parasol, secondement de l'indépendance structurelle, tantôt intérieure, en limite ou extérieure, troisièmement de la ventilation, par l'altitude et l'orientation des opacités, quatrièmement de l'étanchéité, par la loggia, le mur rideau.

Le mur porteur apparaît une synthèse peu souple des différentes fonctions modernes de l'enveloppe. La crise pétrolière de 1973 et les suivantes inciteront progressivement à la démultiplication de la façade en différentes couches guidées par une répartition économique (et donc le règlementaire) de ces fonctions[248].

L'enveloppe apparaît ainsi le filtre privilégié du monde, cantonné à sa dimension physique (longitude latitude, course solaire, climat) dans cette approche. Ce monde généreux et univoque, statistiquement quantifiable, ne permet pas d'entretenir le besoin du projet en dialectique. En l'occurrence je ne reconnais que l'absence de site, volontaire à cette phase d'apprentissage, a-culturalise le travail projectuel. En revanche, cette absence autorise d'aborder sérieusement les questionnements techniques et leur influence sociale (économiques et réglementaires). Mais surtout, la convergence, entre une pensée non linéaire[249] et des raisonnements reposant sur la maitrise de données complexes, devient un objectif pédagogique majeur et accessible. Nous considérons la capacité de concevoir une enveloppe à la lecture réversible (simultanéité du rapport intérieur/extérieur et extérieur/intérieur), comme objet d'un travail nécessitant une *maturité de second cycle*. Les questions spécifiques relevant de l'apprentissage du projet y sont résolues et celles de sa maîtrise se posent.

Le rapport entre façade et site, pour ne pas se borner à être une réponse pelliculaire et uniquement circonstancielle, passe par une étape d'étude où la question du sens de la présence d'une architecture dans un paysage[250] (qu'il soit urbain, suburbain, rural, ..) sera littéralement posée (semestre 6 du premier cycle, S6 L3). Le changement d'échelle nourrit une conscience non linéaire et non additive du processus de conception. L'exercice étudié ici (30 30) permet de constituer « depuis l'intérieur » une enveloppe comme élément de contrôle des ambiances et de leurs variations, vue (liée à l'usage), lumière (solaire puis intérieure) et thermique, engageant ainsi une échelle de réflexion liée à la taille de l'édifice.

L'exercice ultérieur[251] permet de considérer cette même enveloppe comme le terme focalisé d'un échange entre la vue simultanée, *depuis et sur* le paysage. Cette attitude, entrainant une confrontation entre la baie et la perception d'un paysage, engage des articulations d'échelles allant du meuble au territoire. Dans la progressivité spécifique de l'ENSAPB, un projet de second cycle (ADE équivalent master) permettra alors d'aborder l'enveloppe avec moins de précisions (telles celles qu'apportent l'usage du 30 30oscope) mais plus de synthèse[252]. L'édifice savant projeté vérifiera à l'échelle architecturale le croisement des différentes échelles qui affectent le dessin d'une enveloppe. Sa forme crédible s'illustrera en particulier lors du projet de fin d'études (PFE) et peut constituer un des critères d'évaluation de la maitrise du projet d'édifice.

La posture qui consiste à privilégier à ce moment des études le monologue intérieur/extérieur provoqué par l'absence de site, s'explique par une pédagogie du projet. Sa compatibilité avec d'autres postures pédagogiques contribue à spécifier la nature et les options d'une progressivité des enseignements. Celle-ci garantit une diversification des pratiques pédagogiques afin d'atteindre les objectifs fixés par cycle au niveau national, selon une grille propre à chaque établissement.

À ce niveau d'études (2,5 /5 années du diplôme d'architecte) le *savoir-projeter* recherché met en rapport une discipline (l'architecture dont l'entrée est ici privilégiée par l'espace architectural) et un sujet projetant … au détriment de la dimension urbaine. Le caractère public du programme, une bibliothèque, nous autorise cette impasse. La recherche de caractères d'une urbanité intérieure guide en effet l'articulation entre enveloppe et spatialité (au service de l'usage) par le plan libre. Le rapport de l'édifice au monde est provisoirement déprécié. Le studio du semestre suivant, clôturant le premier cycle est l'occasion de rejoindre un degré de complexité qui n'ignore pas l'altérité urbaine. L'architecture anticipe une relation du corps au territoire et transgresse les échelles.

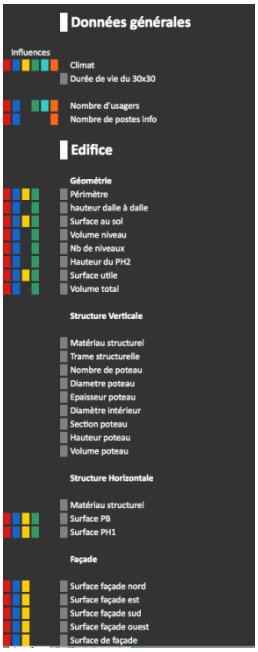
[248] Voir l'article de Jean Marc Weill et le cours donné pour le studio 30 30 sur les différentes « figures contemporaines de l'étanchéité ».
[249] Sur la démarche de projet, Christian Devillers, « lettre à Françoise Choay, sur l'histoire et l'analyse architecturale », Cahier de la Recherche Architecturale, numéro 26, Histoire, p.95-103, 2ème trimestre 1990.
[250] Les éclairages de la géographie, l'histoire, l'approche culturelle et anthropologique manifesteront leur importance.

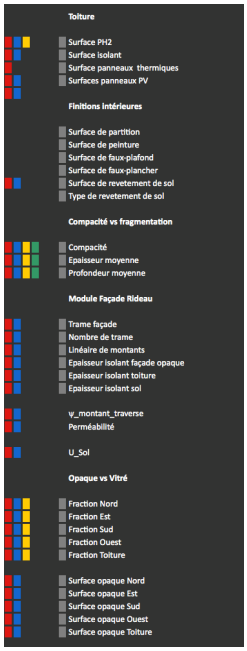
[251] La réalisation d'une baie dans le studio de 6ème semestre de licence : « 4 fois 1 égalent 5 ».
[252] L'invariabilité du semestre nous oriente systématiquement sur la nature d'un contenu maximum, maximisé, maximaliste … et sa limite.

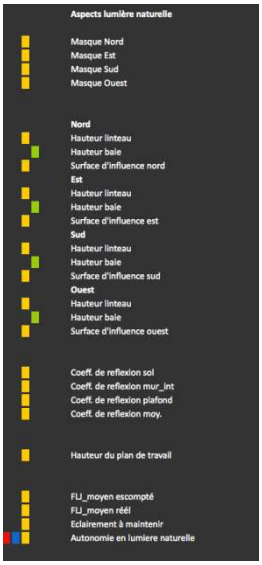
La performance du 30-30oscope

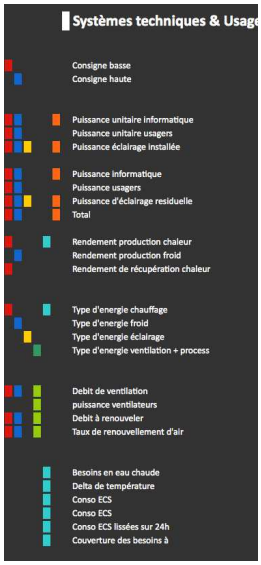
Bilan et prospective

Le 3030oscope est outil professionnel réalisé par Paul Azzopardi de la société EGIS. Il impose le respect aux étudiants, qui, initialement, sont restés timides à en tester la version Béta. Ces réserves sont compréhensibles au regard d'un travail considéré comme supplémentaire dans un studio très dense en investissement hebdomadaire









Les premières questions relatives à l'intégration de cet outil dans le studio dépendent de son apparente hétérogénéité. L'outil est complexe puisqu'il permet d'associer l'ensemble des facteurs qui influent sur l'énergie réclamée par l'édification tout au long du processus. Les mesures sont classées par catégories.

Elles recouvrent une multitude d'informations dont certaines sont spécifiquement architecturales. Leurs considérations peuvent donc s'opérer lors de l'apprentissage du projet. De nombreux paramètres sont à manipuler pour en expérimenter les effets ou leur absence sur des quantités d'énergie requises, au moment de la mise en œuvre de l'édifice et de la gestion de son fonctionnement, mais aussi d'opérations amont, origine et fabrication des matériaux, comme en aval, recyclage par exemple. La prise en considération de cycles temporels est une des données qui influence l'étudiant dans une démarche où la temporalité de la conception du projet domine son apprentissage scolaire.

Sans évidence de la hiérarchie des paramètres, les étudiants comprennent les nuances entre chacun, mais ne mesurent pas intuitivement leur nécessité. Or il apparaît qu'ils intègrent avec plus de facilité les outils dont ils ressentent le besoin immédiat. Par ailleurs le lien entre un tableur et ses algorithmes cachés et le dessin dont ils osent l'aventure doit être établi pédagogiquement. Cela nécessite des mesures de présentation et d'accompagnement.

Raisons

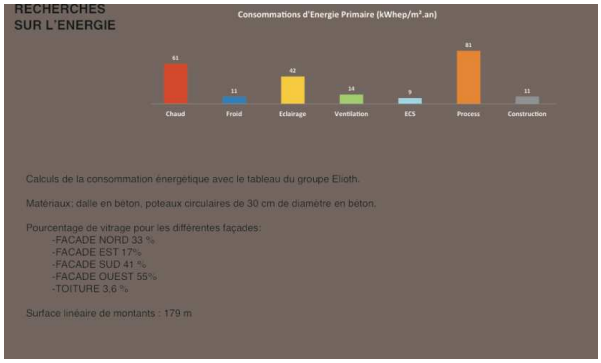
Le studio favorise par réductionnisme un travail extrêmement hiérarchisé : dans les paramètres manipulés (voir exemple de remplissage du tableur) comme dans leur mise en place hiérarchisée (démarche projectuelle). Est systématiquement privilégiée une approche pratique et élémentaire dans une arborescence directe (mais simpliste). Le dessin apparaît comme le vecteur privilégié d'une décision. En introduisant la mesure comme autre élément pour appuyer un choix, une concurrence entre deux objectivités semble se présenter. Un choix projectuel moins simpliste est à considérer par l'étudiant. Le potentiel d'une discipline voisine participe de plein droit à l'élaboration du projet.

Expliquer

Au cours du semestre cinq les étudiants se sentent loin des réalités d'un exercice professionnel qu'on leur présente comme complexe et nécessitant beaucoup de qualités (maturité) lentes à faire émerger puis contrôler. Ils se trouvent en effet au cœur de la discipline enseignée au le plus loin possible, et à égale distance, de leur formation générale et du métier accessible par leur diplôme. Dans cette situation une difficulté à synthétiser même partiellement s'explique mais freine la progression de l'apprentissage du projet.

Pour beaucoup l'enseignement se présente découpé en de nombreuses disciplines[253], souvent vues comme parallèles, ayant chacune une progressivité et un rythme d'apprentissage spécifique. Cela favorise une « digestion lente » où l'on ne peut provoquer fréquemment des situations de synthèses. Le rapport d'études, le portfolio, le carnet préparatoire à la sélection Erasmus, le mémoire (préparant à la démarche autonome de la recherche, en 3 semestres) le PFE, le mémoire professionnel, … sont tous à venir. Le système scolaire est encore très prégnant. L'effort de synthèse est repoussé en fin de cycle ou vers les suivants.

Les concepteurs (Paul Azzopardi / Raphaël Ménard) ont produits un outil remarquable. L'étude fine des 20 résultats permet de confronter outil professionnel et outil pédagogique. La question pédagogique : comment rendre du 30 30oscope entièrement cohérent avec le studio? L'accompagner, par des tests vérifiés, des comparaisons et une démonstration sur un cas existant. Le diffuser au bon moment. Anticiper l'approche de l'enveloppe. L'adapter. Les questions d'ergonomie et de mode d'emploi sont secondaire à celle d'un accompagnement essai/erreur pour faire naitre la conscience d'un choix.



version simplifiée

[253] Probablement le spectre le plus large de l'enseignement supérieur ? Il s'oppose, peut être avec raison, à d'autres enseignements disciplinaires ou techniques, universitaires ou scolaires.

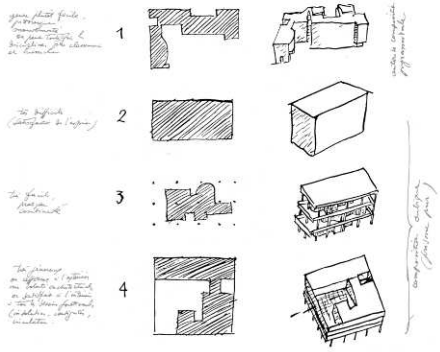
Pédagogie du projet

Sources d'un recul critique

Relation avec l'étude. Le projet d'architecture : Que faut-il enseigner ? Comment faut il l'enseigner ?

Le caractère exemplaire des projets mis en exergue dans l'enseignement permet d'identifier des objectifs compréhensibles et de faire de leur accession l'objet d'un questionnement disciplinaire. Hors d'une période de formation, la réduction a priori des questionnements est illusoire, comme l'est celle de principes stéréotypés pour réponse. L'architecture n'est pas une science exacte et la qualité du projet se partage, en particulier, entre intérêt théorique et pratique inspirée. La théorie architecturale relève elle-même de problématiques difficiles à accorder dès l'énoncé d'une définition par *firmitas, utilitas et venustas*… En quoi le 30- 30 appartient-il ou non à la catégorie « très difficile » énoncée par Le Corbusier dans « Les 4 compositions » ? Lui-même interroge cette partition initiale de ses propres projets par la notion de genre.

« Genre plutôt facile, très difficile, très facile, très généreux ». Genre : en termes d'action, ce qui est généré, engendré. Ni style, ni architecture. Dans les courts énoncés qui accompagnent sa proposition catégorielle, le terme *architecture* apparaît sous une forme adjectivée : « volonté architecturale ». Ce qui souligne une origine très cérébrale. Et qui est préparé par l'apparition de « (satisfaction de l'esprit) » associée à « très difficile ». Ce qui en propose l'accession par la pratique du genre.



4 compositions, Le Corbusier : 1 genre plutôt facile, pittoresque mouvementé on peut toutefois le discipliner par classement et hiérarchie 2 très difficile (satisfaction de l'esprit) 3 très facile, pratique, combinable 4 très généreux on affirme à l'extérieur une volonté architecturale on satisfait à l'intérieur à tous les besoins fonctionnels (insolation, contiguïtés, circulati

La mise entre parenthèses manifeste l'éloignement de l'objectif et la rareté de la réussite. J'oserai le terme contemporain de *projet,* que Le Corbusier n'emploie pas. Et son association à une forme d'abstraction. Avec la liberté que représentent les *cinq points pour une architecture nouvelle*, le volume à six faces autonomes apparaît une conquête. Cependant cette extrême liberté s'accompagne de la contrainte de faire naître une machine célibataire autiste ou autoritaire pour son environnement. Réduire le questionnement à deux faces (hachurées) offre une limite/réserve d'écoute et d'assemblage qui d'une extrême prudence et d'une grande difficulté si l'on ne renonce pas aux objectifs accessibles avec l'abondance des moyens architecturaux déclinables par les Cinq points ….

La comparaison des dessins que propose Le Corbusier montre qu'il compte sur la qualité d'une spatialité intérieure en devenir[254], pour compenser la perte de pittoresque, de générosité, dans le respect du prisme pur. Il ne donne aucun indice pour emprunter la voie qu'il ouvre. Par défaut nous pouvons déduire que la division systématique (de niveaux 3, de structure 3&4), l'addition (pyramidale 1 ou par superposition 3), la combinaison (ou même la combinatoire, de 2, Citrohan, 1922, Pessac, 1925) sont à éviter pour réaliser 2. On peut supposer que la figure 2 remédie au défaut de « discipline » de 1, nécessitant classement et hiérarchie et relève d'une composition cubique ; sa très grande régularité en témoigne dans une forme paradoxalement parallélépipédique. Contrairement au cube, les trois dimensions de l'espace, hauteur, longueur, largeur qui figurent ici sont différentes.

En 1930, Le Corbusier publie Précisions. Dans le chapitre consacré au « plan de la maison moderne »[255] il réécrit les 4 composition avec pour seul commentaire : « *auteuil, garches, Tunis, Poissy*[256] ».

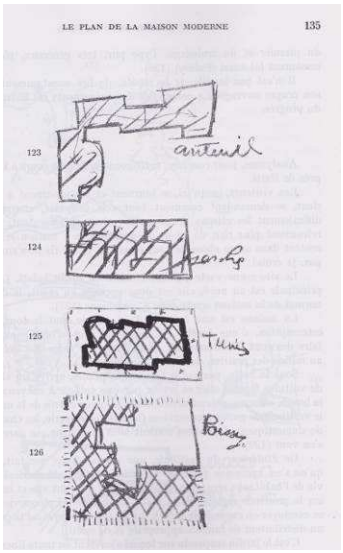


Illustration : 4 compositions, Le Corbusier in Précisions[257]*, 1930.*

Quelles pistes indiquent les autres termes employés dans ce manifeste ? *Insolation* : prédominance du rapport géographique (ou cosmique) au soleil ; *contiguïtés* : fluidité des rapports programmatiques dans une topologie et une territorialité; *circulation* dont on sait à quel point elle est décisive dans le dessin de la villa Savoie (rampe, escaliers, parcours automobile giratoire). C'est l'absence totale de repères et d'échelle qui rend l'investigation ambitieuse. Seul le hors échelle permet la fédération de valeurs énoncées ailleurs.
Ce projet autorise de poser simultanément les questions : Quelle structure, quelle lumière et quel soleil, quelle division et organisation (classement et hiérarchie), Comment échapper à la circulation, au pittoresque, au mouvementé, au facile ? En résumé, quelles sont les qualités présumées par l'intitulé « très difficile » ? Fluidité, abstraction, modernité, calme et ordre, spontanéité (contre combinatoire), classement et hiérarchie, retenu (généreux) et régularité, ne pas renoncer aux besoins fonctionnels (insolation, contiguïtés, circulation) mais en les transcendant : promenade architecturale, jardin intérieur, toit libre (proposition …). Développer la terminologie réelle et déduite…

[254] Espace que Le Corbusier se refuse de formaliser. À cause de sa singularité absolue ? Pour le réserver à des recherches futures? Pour en préserver l'originalité ? Parce qu'il en ignore (encore) la forme ?
[255] In Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme … » ; collection de « l'Esprit Nouveau », Le Corbusier, Les éd. Crès et Cie, 1930, Paris.
[256] Sic.
[257] Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme, Paris 1930, édition originale : Le Corbusier, Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme, Les Editions G. Crès et Cie, coll. « L'Esprit nouveau », 1930, in-8, 268 p.

Ordre des 4 compositions. Les documents sont clairement ordonnés 1, 2, 3, 4 et non simplement distingués (a, b, c, d). Facile, très difficile, très facile, très généreux apparaissant comme les différents chapitre du classement. Le bilan pourrait être chronologique, puisque ce n'est pas par ordre de difficulté. Ce pourrait être l'ordre de l'apparition du questionnement chez l'auteur puisqu'il se réfère explicitement à ses propres projets Intéressant de situer, après cette date, le classement de ses œuvres postérieures. Appartiennent-elles à cette lecture ? Y sont-elles toujours classables ?

Quant à l'identité des exemples, elle se construit au profit d'un travail autocritique de Le Corbusier sur son œuvre, puisqu'il n'y semble pas se référer à d'autres architectures. Trois projets sont évidents, par leur littéralité : Villa Laroche 1923, projet Domino et villa Baizeau, 1928, Villa Savoie, 1929. Le quatrième est ambigu, Villa Stein (ou autres villas blanches puristes, construites ou non, pavillon de l'esprit nouveau EN, 1925, Meyer, 1925, Cook, 1927). C'est donc un terme générique « villas cubistes[258] » qui donne lieu à de nombreuses expériences probablement insatisfaisantes ou simplement suspendues. Comment ne pas considérer la villa Shodan, pourtant contemporaine de la villa Sarabhai (résonnants aux problématiques posées par les villas Jaoul, datant de 1951 également), comme une nouvelle tentative de projet « très difficile ». On notera l'importance de la difficulté en fonction de la dimension de l'édifice 10mx10m (villa Cook), 15mx15m, 20mx20m (villa Savoie), 30mx30m, 40mx40m … Des problématiques homothétiques transgressent les questions d'échelle liées à la géométrie d'un volume à section ou plan carré.

On citera pour ces tentatives extrêmes, le projet de Palais des congrès de Strasbourg, dernier projet de Le Corbusier, ou la médiathèque de Sendai (Japon) de Toyo Ito, dont la lumière est distribuée dans le plan libre au lieu même des faisceaux de poteaux. Le gabarit de l'édifice japonais est de 50m équivalent au projet strasbourgeois. Il est évident que la recherche d'une *spatialité urbaine intérieure* fait partie de l'héritage corbuséen et il reste à comparer les édifices qui le revendiquent.

Illustration : Médiathèque de Sendai (japon), Toyo Ito, 2001, photographie Alain Dervieux.

Soit dans des édifices publics programmatiques qui confinent au gigantisme (plus grand …) soit dans l'exploit technique de la très grande portée (Vignoli à Tokyo) soit dans le rapport au sol et aux services des grands édifices de types tours de bureaux, banques ou centres commerciaux. Le travail des anglo-saxons (Forster, Rogers..), mais aussi de Renzo Piano,.., est à souligner dans ce domaine. Rem Koolhaas est le théoricien de cette *archipellisation* monumentale. Il faut souligner que la compacité exceptionnelle des édifices de Le Corbusier ou d'Ito, où l'éclairement naturel reste une composante essentielle, justifie le qualificatif d'urbanité. La question d'un microcosme qui tend à l'autonomie et aux qualités du macrocosme obsèdera l'architecte jusqu'à la station spatiale.

Ces quatre compositions font écho à une lecture rétrospective de la modernité depuis ses avant-gardes modernes. Quatre périodes de la modernité architecturales se distinguent assez clairement. Une continuité historique assemble ces périodes qui se caractérisent par des cahots et des dynamiques qui secouent les sociétés autant que les individus au cours du XXème siècle.
1 Les avant-gardes modernes :
Élaborations de l'espace, mouvements, expérimentations ; 1920/1940
2 Construire la modernité :
La guerre et la deuxième révolution industrielle comme mobile ; 1940/1960
3 La modernité critique :
Désindustrialisation et radicalisme (retour aux sources) ; 1960/1980
4 La modernité après…
Mondialisation, réactions et réactionnaires des mouvements modernes, 1980/
(Compléter par le texte qui différencie les 4 périodes de la modernité architecturale)

[258] J'ai fait la démonstration graphique de la prégnance de la géométrie de cubes, virtuels et emboités dans le travail de conception des villas Meyer (premier et second rapports de recherche du Bureau de la recherche Architectural, *« L'espace de l'architecture moderne », direction C. Vié et H. Ciriani,* 1989, 164 p., 130 p.)

Influence sur un enseignement contemporain

Problématique

À la moitié du parcours de la formation d'un architecte en cinq ans, dans le cadre d'un studio d'architecture dont la projetation[259] est le déterminant majeur: Quels éléments de convergence peut-on instruire pédagogiquement, dans la démarche de conception se traduisant par le dessin, entre la qualité d'un espace d'usage et la quantité d'énergie nécessaire à sa mise en œuvre ?

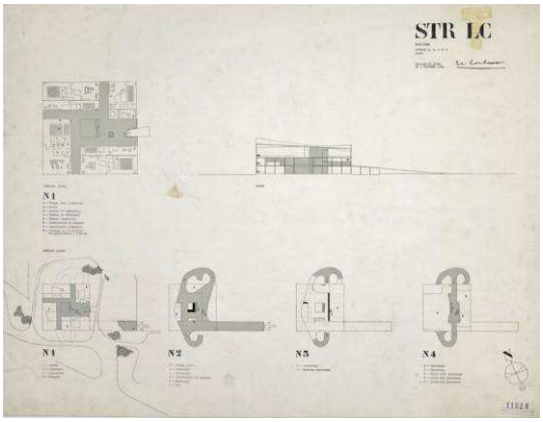


Illustration : Projet du palais des congrès de Strasbourg, Le Corbusier, 1962-64, fondationlecorbusier.fr .

1. Principe

La question de la projetation de l'espace contemporain repose sur la présupposition pédagogique d'un espace ininterrompu entre intérieur intime et extérieur public, du meuble au paysage. Le postulat est qu'il n'y a pas de discontinuité entre la poignée de tiroir et le sommet de la montagne. L'homme les pratique il les relie indépendamment des différences d'échelle par le mouvement de son corps : une chorégraphie individuelle et collective au delà des nécessités fonctionnalistes. Dans ce domaine les travaux de Michel Lussault[260] nous renseignent et nous confortent sur la contemporanéité de notre action.

Dans l'histoire de l'architecture, le paroxysme de la situation est atteint en architecture par le projet de la villa Farnsworth[261] qui ne possède aucune opacité en façade. Ce qui équivaut à décrire une villa d'un seul niveau dont la structure est extériorisée et où l'enveloppe intégralement vitrée du plan du sol à celui du toit est continue sur quatre faces. La limite de l'espace intérieur n'est donc pas la paroi transparente invisible, quasi virtuelle, mais la lisière de la clairière à l'intérieur de laquelle la villa est disposée. L'automne, l'interruption des opacités du plan du sol et celui du toit cadrent les troncs du bois qui bordent la clairière ; le printemps, la stratification de la lisière en prend le relais. Personne ne résisterait à la mise à nu de la mariée[262].

Illustration photographique: Ferdinand Dervieux : Le Grand Verre de Marcel Duchamp, « La mariée mise à nu par ses célibataires, même » ; 1915-1923, Musée de Philadelphie (USA).

L'obscénité de la situation dans la forêt de Plano a conduit Madame Farnsworth à faire poser des rideaux qui lui vaudront un procès de l'architecte, qu'il perdra. Faut il commenter ce résultat ? Considérons que l'éloignement de la forêt rend indistinct aux yeux des animaux l'intimité pourtant éclairée de la villa dévoilée. Il s'agit d'une question d'échelle qui rend évident le déséquilibre des relations intérieures extérieures et leur non réciprocités. En effet « voir et être vu » fondent le rapport de l'homme au paysage et non l'inverse. Organiser le rapport intérieur / extérieur, même en cas de transparence, est l'objet du savoir de l'architecte au bénéfice (d'une considération) de l'être au monde de l'habitant. Qu'elle est la compatibilité ce rapport de visibilité avec un rapport de variation de milieu tels l'humidité ou la température. Sont-ce la biche et l'ours qui font frissonner Mme Farnsworth, l'animalité ou le climat ?

[259] Néologisme formé dans les années 80 à partir du terme progettazione, en italien, qu'on pourrait décrire comme la science du projeter (acte de faire un projet).
[260] Michel Lussault, professeur des Universités en géographie à l'ENS de Lyon, L'avènement du monde : Essai sur l'habitation humaine de la terre, Le Seuil, 2013.
[261] Villa Farnsworth, Plano (état de l'Illinois aux États Unis), 1951, Ludwig Mies van der Rohe. Photographie Alain Dervieux.
[262] Selon l'intitulé duchampien : « La mariée mise à nu par ses célibataires, même », le Grand Verre, 1913-192 3. L'œuvre contemporaine de la villa, « Étant donnés : 1° la chute d'eau 2° le gaz d'éclairage » posthume, donne une version plus bucolique et cruelle voyeuriste et moins littérale de la transparence du Grand Verre.

La théorie de la façade épaisse[263] semble du point de vue de la contradiction du conflit entre protection/transparence, une gestion par la moyenne : la porosité. L'imbrication de l'intérieur dans l'extérieur, et son inverse, ressemble à la très fractale expérience de l'éponge, considérée comme façade. L'invention d'une épaisseur complexe, hiérarchisant par un entre deux les incidences fut utilisé comme rapport d'échelles par Henri Ciriani[264] et épaisseur programmatique par Yves Lion, la bande active[265].

Illustrations : Un dessin d' Yves Lion (la bande active) ; Une photographie du projet d'Henri Ciriani, la cour d'angle, 130 Logements, Saint Denis, 1978/82.

2. L'objectif

L'objet de l'architecture contemporaine est-il de réaliser le printemps éternel et tempéré à l'intérieur d'un réfrigérateur étanche[266] ?

À l'extérieur on ressent le frais sous un arbre, on ne transpire pas à l'ombre d'un mur, on prend le vent dans les espaces ouverts, on se chauffe au soleil d'une terrasse. Et à l'intérieur, dans l'amphithéâtre d'une école climatiquement règlementaire, on risque l'étouffement dans un volume claustrophobe. L'air se fait rare, la peau ne respire plus, la sensation de chaleur contredit la température objective. La dérive est patente. Elle caractérise une régression. Dans un climat variable donné, diurne/nocturne et saisons, l'architecture doit-elle servir à isoler son habitant du monde, le conforter dans un artifice a topique ? Ou doit-elle participer de l'ouverture au monde, offrir la diversité.

Le vocabulaire d'une offre architecturale climatiquement différenciée ne manque pas. Il s'est appauvri parce que le confort mécanique remplace les autres, que les recherches typologiques se sont taries dans la direction de la variabilité. La définition du logement se réduit à une équation économique autour d'un m² sans qualité qui empêche toute fiction.

Comment concilier le confort du citoyen urbain tolérant[267] et d'un impératif politique.
La paresse conceptuelle se traduit par une soumission à la fatalité du mécanique.
La neutralité d'un volume régulier, orienté sur les points cardinaux permet la compréhension des phénomènes lumineux et caloriques. Au détriment du rapport visuel, extrapolé par Mies van der Rohe, l'exercice d'une projetation sans site écarte délibérément la recherche d'un équilibre dans l'échange visuel intérieur/extérieur. On favorisera la nécessité de regard depuis l'activité

[263] Sous la direction de Michel Rémon; *La Façade épaisse - Mise en évidence et expérimentation d'un thème architectural*, Éditions du Plan Construction, Paris, 1980, 106 p.
[264] 130 logements, La cour d'angle, Saint Denis (93), 1978-82, Henri Ciriani, architecte.
[265] Yves Lion, 1987, « Domus demain, la bande active » L'Architecture d'aujourd'hui »n°252, septembre, p.16-20, avec François Leclercq et la collaboration d'Olivier Chaslin.

[266] « En faisant de la nuit le jour, de l'hiver un printemps, l'espace contemporain flotte aujourd'hui hors des rythmes astronomiques. Il stagne sur un midi de mai, dans une interminable pause du mouvement de rotation de la terre ». Philippe Rahm, Architecture météorologique, Archibooks, Paris, avril 2009, p. 59. Il souligne ainsi que cet immobilisme spatial est un immobilisme temporel, une recherche de l'éternité … quelle gageure immodeste ou qu'elle impudence que de s'opposer au mouvement universel et donc à l'un des postulats de l'architecture : la gravité ! Paradoxalement : si le mouvement s'arrête, tout tombe (et entre en mouvement). La recherche d'une architecture d'apesanteur est par contre d'actualité. Les figures de l'étanchéité, chère à Jean Marc Weil s'y radicalisent. Leurs références s'étendent plus facilement des travaux du mouvement De Stijl (Frederick Kiesler à partir de City of space, 1925) aux informations déduites par Camille Flammarion, La Pluralité des mondes habités : étude où l'on expose les conditions d'habitabilité des terres célestes discutées au point de vue de l'astronomie, de la physiologie et de la philosophie naturelle, édition Didier, Paris, 1877).
[267] Et non plus seulement occidental.

programmatique spatialisée. Le profit pédagogique se portera sur l'étude des variables qui influent sur l'échange de données entre extérieur et intérieur.
L'objectif est d'associer les outils pédagogiques expérimentés aux outils d'une réflexion En l'occurrence, le plan libre est ici considéré comme élément garantissant l'unité, la cohérence et la qualité spatiale relative aux usages déduits du programme, associé aux échanges lumineux, thermiques et visuels (dans cet ordre).

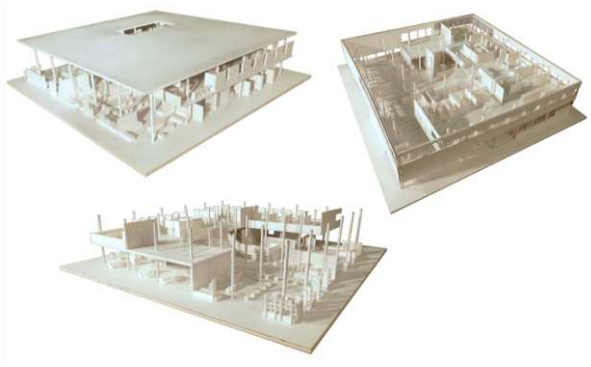


Illustration rapport du PH1, semblant définir le 30 30, avec le volume enveloppe qui le précède pourtant.

La dimension quantitative ne peut être dissociée de la dimension qualitative dans l'apprentissage du projet. Un enseignement par étape progressive permet de hiérarchiser une pensée projectuelle. Ici le propos est de démontrer que le dessin articule physiquement ces outils apparemment distincts. Le calcul, par la mise en place d'algorithmes qui font intervenir une relativité chiffrée, est considéré comme un moyen d'approche et de vérification d'une pensée qui cherche à réduire le doute par l'approximation. Le travail de l'architecte n'est pas dans la substitution au travail de l'ingénieur mais dans sa compréhension. Ceci afin de provoquer des dialogues orientés. L'architecte ne s'en remet pas aveuglement au savoir de l'ingénieur par incompétence. L'ingénieur ne choisit pas à la place de l'architecte. Il n'y a pas un rapport de question/réponse dans l'absolu, simplement parce qu'il y a projet, donc création. La hiérarchie ne signifie pas l'asservissement d'une discipline à l'autre, d'une décision à l'autre, d'une inféodation infériorité/supériorité.

3. Articulation des différents arguments de la démonstration

Incidence de l'hypothèse et de l'usage sur les qualités thermiques

La prise en considération de l'hypothèse et de l'usage dans le raisonnement projectuel

Le travail de la recherche du plan libre n'obéit pas à des règles de composition. L'introduction d'une hypothèse comme source de travail qu'on interroge avant de prendre une décision, apporte une dimension imprévisible (donc originale) mais rationnellement traitée. La rationalité en question, rend visible dans une arborescence de situations, le choix conscient de celle, plus élémentaire[268], qui convient le mieux à l'énoncé posé. C'est l'usage, comme capacité de comportements citoyens conformes à l'intérêt public (le programme, une bibliothèque, est celui d'un équipement public) qui fixe les critères acceptables pour mesurer l'efficacité du projet sur l'espace. L'hypothèse est un repère de sens : elle ordonne le projet dans un sens, elle donne du sens à l'architecture qui y (en) répond. Cependant la dimension programmatique bien qu'essentielle reste sommairement traitée et volontairement limitée pour une approche raisonnée.

La programmation renvoie principalement à l'expérience spatiale de l'étudiant et aucun programmiste ne vient proposer, à cette étape des études d'architecture, l'apport d'une complexité détaillée qui influeraient, jusqu'à la contradiction, la constitution des espaces. Un organigramme hiérarchisé permet d'identifier les articulations programmatiques. Cela constitue, par conséquent, une base qui s'essouffle vite, pour permettre d'affuter une réponse spatiale qui va au delà d'une juste[269] disposition en rapport au hall et sur l'un des deux niveaux. La connaissance du monde du travail permet d'identifier les différentes postures, besoin en lumière spécifique, aération d'espaces distingués sous le nom d'atelier, manutention, …

L'expérience de lecteur (loisir et travail, seul ou en groupe) est également basique chez l'étudiant et lui sert de

[268] Faire le plus avec le moins. La citation « Les is more » de Ludwig Mies van der Rohe, lue, ici sous l'angle d'une économie générale : de l'effort, de la matière.

[269] Cette étape n'est pas à négliger. Nous la considérons comme stratégique à un moment du déroulement du processus. Quant les perspectives, jusqu'alors séquencées selon un parcours logique et simple : Identifier le seuil, entrer, atteindre la banque d'accueil, s'orienter vers le hall et les deux principaux secteurs (adultes et enfants), épuisent leur capacité à distinguer la hiérarchie des parcours à emprunter depuis le hall et de la division verticale des parcours (dont l'accès à l'étage par l'escalier), une maquette synthétique s'impose. Au 1/200ème le plan de partition, dessus / dessous (le plan libre) apparaît pour la première fois comme une figure élémentaire complète en rapport avec le cadre de 30 mètres par 30 mètres. La projetation repose sur une capacité de distanciation pour opérer le recul critique nécessaire à l'auto-évaluation de la démarche.

référence. Les références ergonomiques des gestes spécifiques (s'asseoir, choisir et prendre un livre, lire, se tenir devant un écran, tenir une main courante, se mouvoir entre des rayonnages, monter-descendre un escalier), des rapports entre personnes (devant une banque d'accueil, de prêt, vitesse et politesse des déplacements), des attitudes (chercher au loin avec les yeux les signes d'une direction), donnent de l'épaisseur à l'interprétation d'un programme et une matière à spatialiser. La mesure, la transparence[270], le mouvement direct ou induit, la différenciation entre le parcours du regard et celui du corps caractérisent et nourrissent cette recherche de spatialité. Ils aident à définir un travail de l'espace architectural, disponible à une écoute de la société contemporaine. La liberté de l'architecte résonne ainsi de manière cohérente avec la société démocratique qu'il dessine et qui le dessine.

L'espace du travail s'appuie sur des caractéristiques démarquées puisque l'étudiant en est moins familier. La permanence des positions, la prise en compte de la gestuelle distincte en bureautique et de la manutention, le travail en public, alimentent la réflexion sur la traduction de l'usage dans le dessin des meubles, des emplacements et plus généralement du plan comme continuité.

Le tracé du plan libre au sens propre, comporte une dimension aléatoire ou une dose d'inachèvement qui permet de le confronter à d'autres exigences. L'arborescence des possibles, d'un strict point de vue qualitatif, accepte des interactions paramétrées qui aident à opter. La notion attendue de projet n'est pas celle d'une exclusivité ou d'un caprice mais d'une construction qui s'affirme et résonne aux sollicitations du monde. Le projet, ni le projeteur, n'ont intérêt à la défense, à l'autisme et à l'immanence. La dimension critique du projet, dans le sens d'une capacité *toujours* renouvelée à accepter des exigences a besoin d'une réserve innombrable de possibles. L'ouverture garantit la faisabilité du projet dans toutes ses dimensions, sociales, économiques, … Cette capacité à *rendre possible*, à toute étape du projet, relève de la compétence projectuelle de l'architecte.

Comment la qualité thermique intervient-elle comme notion projectuelle en architecture ?

Le questionnement sur le rapport entre édifice et architecture peut initialement être neutre : quel contrôle peut on opérer sur les « dépenses en énergie » pour réaliser telle ambiance ? Cela oblige l'étudiant à identifier, manipuler et articuler les paramètres en jeu pour en saisir l'incidence sur le dessin du projet. C'est une étape majeure de l'apprentissage, dans ce domaine ou d'en autres.
Certains paramètres sont techniques :

- unité de passage, comportement des matériaux au feu, surcharges,

D'autres sont géométriques :

- proportions, nombre d'or, modulor, rythme des composantes physiques,

Ou d'usage et de convenance, sociales :

- règle de Blondel, travail, étude, un ou deux escaliers, deux ou trois unités, fluidité des déplacements corporels, incorporation aux mobiliers (stock actif ou passif, surface de travail, assise),

Scientifiques :

- dimensionnement, capacité, résistance de matériaux différents en situations particulières (report de charge, trame, porte à faux, suspension, torsion, flambement), …

La complexité projectuelle est en partie relative à l'échelle traitée. Pour simplifier on peut à la fois traiter d'un petit ou grand édifice, petit ou grand équipement, un habitat, un groupement, un ensemble, mais aussi de l'échelle dessinée à laquelle on va conclure l'étude : 1/500ème ; 1/200ème, 1/100ème, 1/50ème, … 1/1, 2/1… La complexité est également repérable aux paramètres qu'on choisit de traiter, à l'approfondissement consacré au paramètre, au nombre de paramètres. Elle vient ensuite de l'articulation des paramètres et leur hiérarchie au profit de la complétude du projet, et de l'idée qu'on s'autorise à en avoir dans le cadre de 5 ans d'études d'une discipline dans l'enseignement supérieur public, contemporain, français.

Le choix d'un enseignement réductionniste ne s'oppose pas à celui de la complexité et de l'hétérogénéité, mais tient à en mesurer les limites. C'est à dire que les limites sont différentes selon les paramètres. Ce qui signifie aussi que selon les enseignements (donc les semestres) les incursions en direction des limites peuvent être différentes, voire ordonnées. La progression[271] est alors l'enjeu du positionnement des différents projets semestriels entre eux[272]proposés aux étudiants.

[270] Au delà de la distinction d'une transparence littérale et d'une transparence phénoménale dont l'avènement à la période des avant-gardes est décrit par Robert Slutzky et Colin Rowe (Article de 1963, in Perspecta , vol.8, ed. Yale school of architecture, pp.45-54 : Transparency : literal and phenomenal, devenue « Transparence réelle et virtuelle » dans la traduction française des éditions du Demi-cercle en 1992 à Paris.

[271] Idéalement les intensifs, workshops, semestres d'été pourraient habilement compléter ce dispositif au profit de l'hétérogénéité des élèves et de leurs parcours.

[272] Soient six sur un cycle de 3 ans, y compris la découverte de la discipline, spécifiée par sa fabrica.

Formuler une hypothèse pour se fixer une ligne de conduite, à la fois personnelle et rigoureuse, gagne à se déduire d'une critique de symptômes contemporains. Nous tiendrons compte du décalage entre : le temps de formation universitaire (cinq ans, ADE + Erasmus), universitaire et professionnelle (un an, Hmonp) puis professionnelle et universitaire (deux ans, DSA, trois ans, doctorat), professionnelle (trois à cinq ans, pour le suivi d'un projet de a à z) et enfin de l'exercice en nom propre, pour reconnaître au travail pédagogique la nécessité d'être prospectif. L'école ne répond pas aux conditions contemporaines d'exercice, mais prépare, par anticipation si possible, celle du futur de la profession. Tenant compte que la machination[273] industrielle et règlementaire gagne souvent en complexité avec le temps, une hypothèse disciplinaire (pérenne par essence) est gage de sérénité et d'autonomie pour l'architecte.

Comment le projet peut-il rendre compatible qualités thermiques et unité architecturale ?

Par éthique pédagogique nous formulons la nécessité d'une acceptation de la diversité qui nourrit la richesse de nos rapports au monde : Diversité des usages, des personnes, des pratiques de fabrication, des économies, des milieux et par conséquent des climats. La recherche d'une architecture microclimatique n'est pas nouvelle. Elle résout pourtant la rupture des climats intérieur/extérieur, issue d'une application radicale et simpliste d'un désir (mais est il exprimé, même par défaut ?) d'un dedans toujours constant et protégé d'un dehors toujours variable et agressif. Le zoning, la séparation des fonctions ont déjà été commentés[274] quant à leur conséquence sur des architectures monofonctionnelles, cités dortoirs et zones d'activité habitables en alternance. L'architecture peut elle rendre compatible, mitoyenne, réversible des ambiances différentes ? Les expérimentations modernes ont déployés le sujet de l'obsolescence architecturale dans plusieurs registres : c'est celui de la matière dans les bâtiments d'habitation construits pour une durée de vie limitée de Jean Dubuisson[275], celui de la temporalité par l'interchangeabilité des programmes dans l'espace avec l'exemple du musée et maison de la culture original du Havre, de Guy Lagneau, Michel Weill, Jean Dimitrijevik, Raymond Audigier, dont est issu la flexibilité du plateau libre de Beaubourg de Piano et Rodgers. Henri Ciriani l'a théorisée [276] par une partition au moment de la projetation entre ce qui est d'ordre pérenne et ce qui relève d'une obsolescence programmée. Ces dualités : servant servi, pérenne obsolète ou typique atypique, révèle une pensée binaire[277], d'opposition entre termes et relève d'une pensée du choix projectuel comme action.

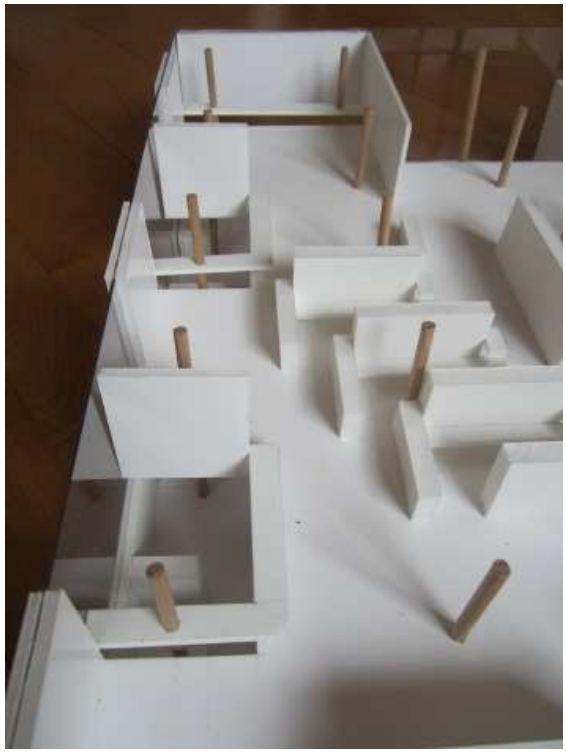


Illustration Variante d'un rapport du plan à l »enveloppe par la coupe aux incidences à mesurer par le 3030oscope

Si le PL[278] touche la façade, la communication des programmes se fait du côté de son bord, libéré en fonction de son traitement. La signification de cette relation change selon qu'une allège transparente ou opaque, basse ou haute, occupe le bord. Si c'est un meuble, la différence de perception, du haut vers le bas ou du bas vers le haut, est renforcée. Les cas possibles sont multiples. Les effets sur la circulation de lumière sont également différenciés par niveau. Cette étude se prolonge par une réécriture du plan. Nous pouvons en apercevoir la complexité à partir de l'exemple ci-contre.

[273] Et non seulement la machinerie industrielel
[274] Références de Raphaël ???
[275] Jean Dubuisson citation sur la durée limitée de vie d'un ensemble de logements, due au procédée constructif employé ?
[276] Obsolescence et pérennité de l'architecture moderne, article d'Henri Ciriani. ???

[277] Elle s'applique bien entendu dans le domaine numérique ou la numérotation 0, 1, ouvert fermé, oui/non, conditionne des modes de calculs d'une très grande complexité. On l'opposera à des systèmes évoqués par l'anthropologue Maurice Godelier dans l'histoire des numérations. 1/un (moi), 2 (moi et toi), beaucoup (indifférencié). Trois est l'origine du multiple, de l'indénombrable.
[278] Dans la terminologie du studio, le plan libre est nommé plan horizontal n°1 (*PH1* ou PL), il est l'objet principal de l'étude. Le plan du sol est le plan horizontal n°0 (*PH0*). Ce plan est une donnée initiale. Il est continu, infini et neutre. Puisqu'il n'y a pas de site, il n'a pas d'identité sauf au lieu de sa superposition par le *PH1*, selon sa découpe. L'espace y est qualifié par la présence du *PH1*. Le plan supérieur est le plan horizontal n°2 (*PH2*). Il n'est pas conçurent du PHL, il se contente de le conforter en laissant la quantité de lumière zénithale nécessaire éclairer les plans inférieurs.

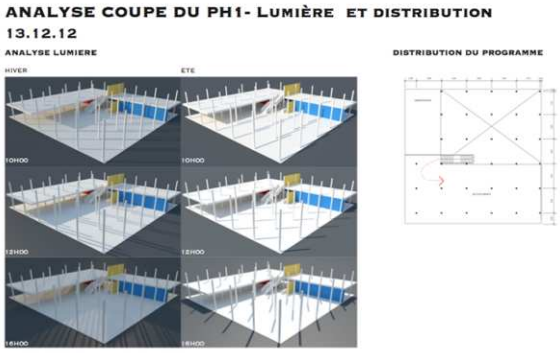
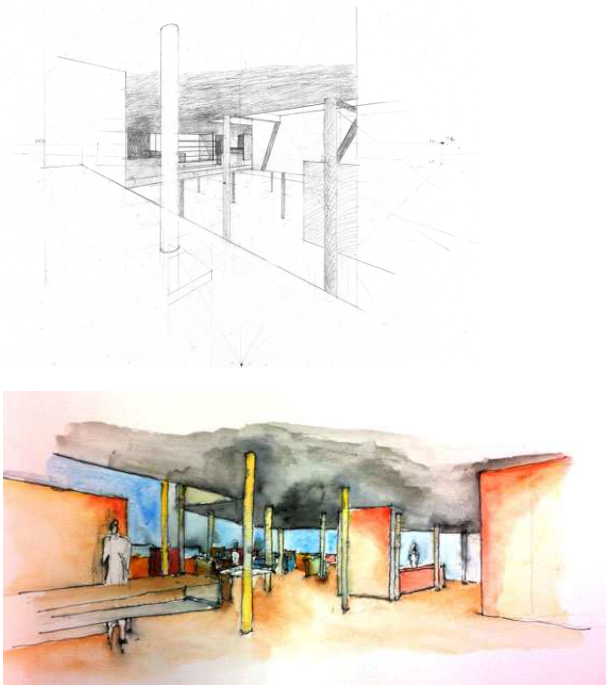


Illustration L'ncidence solaire est compréhensible avant la présence de l'enveloppe qui contribuera à filtrer et distribuer

La possibilité d'usage du sol change selon que les activités sont : en retrait du PL, à l'aplomb du plan ou en débord du plan. Les rapports qui en résultent provoquent des situations qui enrichissent le rapport de l'architecture à ses destinataires. Faut-il montrer la réparation de la couverture du livre à l'enfant qui l'aurait abimé ? Sous quelle topologie, quelle forme, quelle circonstance ?



L'acceptation de la condition climatique par microclimats

Les qualités d'un microclimat extérieur, la zone humide où la brume apparaît, l'arbre sous lequel la fraicheur du couchant est la plus douce, le mur derrière lequel l'ombre est plus drue, l'angle du chemin à partir duquel le souffle du vent est frontal, le dénivelé où l'on vient s'asseoir le matin pour voir la vue sans contrejour. Là où le premier verglas apparaît avec l'hiver, l'arbre qui ne retient pas la pluie chaude des orages d'aout, l'obstacle qui barre la continuité des jeux au soleil, le pont qui décoiffe au dessus du torrent en sont les pendants désagréables. L'art du projet d'architecture et de paysage en relève le défi.

À quelles situations ces cas correspondent-ils en intérieur ? Quel intérêt y-a-t-il à produire des variations microclimatiques ? Quels sont les nouveaux paramètres qui influent sur le couple, central en pédagogie, le rapport d'économie entre qualité/quantité ?

La condition en est la maitrise des mouvements de l'air. L'air chaud, agité de turbulences, est soumis aux effets de convection. Par similitude le comportement de l'eau, gravitaire dans son état liquide, du ruissellement à la flaque, pourrait être domestiquée. La limitation de l'entrée d'eau, sans l'interdire, serait une mesure pragmatique à ré-apprécier architecturalement.

Sans aller jusqu'à la question d'accueillir la neige dans un bâtiment, faire un bâtiment accueillant pour la neige montre la dimension programmatique et simultanément poétique d'un élément. La dimension poétique de la neige, par exemple, est essentielle et ne relève pas simplement de sa convocation dans la maitrise de l'art de construire. Doit-elle en devenir l'axe principal de motivation du projet ? Pas plus qu'un autre il me semble, mais pas moins. On peut convenir qu'il soit légitime, pour répondre à un besoin d'équipement touristique, d'édifier en haute montagne. Et par conséquent tenir compte de la modification de la lumière et de la perception du paysage qui contrastent fortement avec l'été. Mais comment convoquer cet axe en compatibilité avec d'autres ?

Dans notre cas, le plan libre, qui s'appuie sur une fluidité tant horizontale que verticale permet de nuancer en permanence, de manière subtile à brutale, la prédominance de qualités d'un espace en perpétuelle variation (mouvements). Il facilite la possibilité de l'alternance de ces qualités. Il rend extrêmement difficile d'en contrôler toutes les articulations. Il est évident, qu'enfermé dans le Tupperware de l'amphithéâtre central, dans mon amphi printanier, j'ai besoin d'air parce que je parle loin, fort et longtemps, je me déplace et me meut pour conserver l'attention sur mon propos et les documents projetés, je me concentre, pour exercer une continuité de sens compréhensible. Pour tout cela il faut de l'oxygène, dans mes poumons comme sur ma peau. Or dans ce même amphithéâtre les élèves sont immobiles,

réceptifs devant leur feuille de notes ou écran. L'écart entre activité et passivité programme différemment cet amphi à l'espace unique et partagé. La condition climatique l'a rendu étanche, sans fuite et donc sans « courant d'air ». Par chance le courant d'air persiste dans le plan libre. Mais son indiscipline reste à programmer …

Les éléments, en tant que manifestations naturelles, participent de l'impression de confort. En particulier parce qu'ils se rappellent à nous, même désagréablement, par variation des ressentis. L'architecture sophistiquée est au contraire celle de l'éternel printemps ou celle qui accueille, simultanément toutes les saisons aux endroits souhaités ? L'hypothèse du caractère défensif s'oppose à l'hypothèse de la diversité des caractères. Pour l'arbre la mousse sur son tronc signe l'orientation nord. Que signe-t-elle sur le mur de la maison ? Comment rend-on un mur moussu ? Le travail de l'artiste Michel Blazy[279] illustre la capacité de tolérance à la décomposition, la mutation, à l'acceptation des cycles vitaux. Tout comme Marcel Duchamp le préconisait, il utilise des cycles énergétiques mineurs, à peine provoqué pour qu'un univers (microscopique) s'avère, se développe et se meurt. Duchamp[280] renvoyait aux énergies vitales : la production de larmes (le pleur), de sueur (la transpiration) et toutes les humeurs imaginables dont on ne fait rien et qui se perdent malgré leurs manifestations visibles (donc artistiques) et répétées.

Le rapport entre air et température se traduit par une convection. Ce mouvement entraine une aspiration qui génère des turbulences. Le phénomène s'étudie dans le détail en soufflerie. Il dépend évidemment fortement du plan du secteur concerné. À l'approche des façades, avec une double hauteur étroite, le phénomène est amplifié. L'orientation de la façade est, ouest, sud participe au déclenchement du phénomène en fonction des échanges thermiques et en particulier du rôle du soleil : nombre d'heures d'ensoleillement, variation de son action en intensité en fonction de son inclinaison. Des parois perpendiculaires à la façade aident à conduire l'air et servent à accélérer le mouvement. Au contraire, une simple hauteur minimise la convection verticale et interdit la convection oblique (en direction de la surface du plan supérieur). Du simple tissu médiéval à la périphérie massive et porteuse en passant par le mur rideau, la différenciation entre enveloppe et façade[281] est une longue histoire alternative éclairée par la contribution majeure[282] de Gottfried Semper ou plus récemment encore de Richard Scoffier.

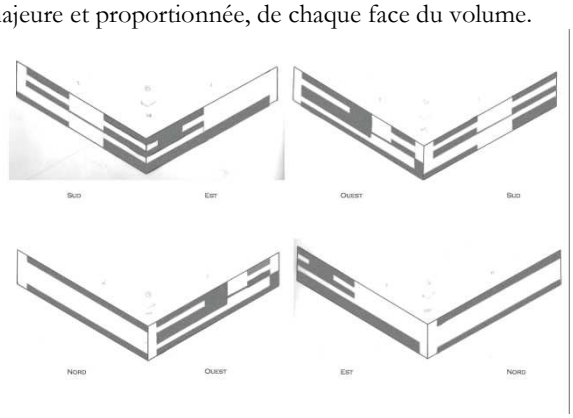
[279] « Projet d'intérieur aux insectes" – "Les fontaines de la bonne volonté"; centre d'art du Crestet (26), 2008, Michel Blazy.
[280] Duchamp du signe, éd. Flammarion, Paris, 1975.
[281] Pavillon de l'arsenal ; Université populaire : « Où va l'architecture » ; (Cours n°2, 11 février 2012). http://www.pavillon-arsenal.com/videosenligne/collection-29-376.php
[282] Du style et de l'architecture, écrits 1834-1869, Marseille, éd. Parenthèses, 2007, Gottfried Semper.

Le changement d'échelle accompagne la traduction dessinée des questions entre enveloppe et thermique

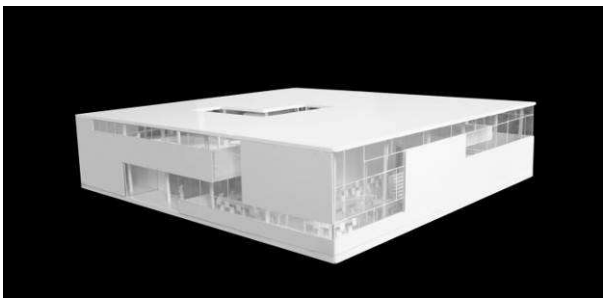
À quel objectif pédagogique concourons-nous ?
Si l'enseignement de l'architecture s'efforce de réduire l'écart entre projet et apparence, le changement d'échelle y tient une place essentielle. Il permet de mesurer cet écart par étapes. Le passage d'une abstraction à une réalité. Cette hypothèse radicale se résumerait à une explication du projet selon laquelle projeter serait la réitération d'une idée essentielle, différemment exprimée jusqu'à l'accomplissement.

Évidemment, l'excellence du projecteur reposerait sur sa capacité d'énonciation initiale. On entend plutôt ici que l'énoncé lui même gagnera autant à se préciser que le dessin qui l'accompagne. Pour illustrer le défi de cette précision nous partirons de l'exemple du passage de l'enveloppe, de l'échelle du 1/100ème à celle du 1/50ème.

L'enveloppe est déterminée par deux facteurs prépondérants qui entrent en conflit au moment de son dessin. Elle se doit de laisser entrer la lumière nécessaire à l'activité sur et sous PH1 nécessaire aux activités situées en profondeur jusqu'à 6 mètres environ (rapport extérieur/intérieur). La taille des ouvertures et l'incidence climatique (soleil, saisonnalité, horaire) sont les paramètres principaux. Ils conditionnent, par la retenue, le filtrage ou la transparence de rayons lumineux, la température « traitée » par cet écran. Inversement depuis l'intérieur, l'enveloppe qualifie le rapport intérieur/extérieur comme filtre de la vue. L'idée principale de l'enveloppe va décider de la partition majeure et proportionnée, de chaque face du volume.



Exemple de 4 façades associées, commentaire sur leur la mise en mouvement destiné à désigner l'entrée depuis une approche quelconque.



Exemple de 5 façades, ouverture du PH2.

Cette partition à l'échelle du 1/100ème se joue autour du tracé d'une ligne à l'effet de césure.
À cette échelle, le débat avec mon complice Jean Marc Weill porte sur la signification de cette ligne. Elle n'est ligne qu'à cette échelle. En effet cette ligne est l'expression d'une simplification : alternativement bord d'opacité ou limite d'ouverture. L'échelle interdit en maquette qu'une complexité interfère simultanément avec les décisions majeures. Une fois la ligne située, elle est d'abord vérifiée dans son efficacité quantitative (mesure des surfaces, puis des volumes, d'air et de matière), arithmétique et géométrique (proportion). Mais sa nature et sa complexité restent à penser et constituent une couche d'interrogation supplémentaire à traiter ultérieurement. Leurs résolutions appellent dessin et maquette à une autre échelle qui suscitera une prise de position. Il est évident qu'une simple ligne ne partage pas le rapport entre une opacité et une ouverture vitrée. Il est même compréhensible que faire disparaître ou déplacer l'une des lignes, représente un effort conceptuel manifeste. Le clair de vitrage nécessite dans la maison Fisher[283] de L.I. Kahn, une capacité de son concepteur à se représenter simultanément l'intérieur et l'extérieur, afin d'offrir une perception différente, et de « plier » la ligne pour la faire participer à la définition d'un volume. Ce volume Kahn en maîtrise tous les aspects. Il connaît le comportement tridimensionnel de toutes les arêtes, jusqu'à l'échelle de la matière mise en œvre. Les éléments de cette complexité sont le mur, qui lui même est décomposable en plusieurs matières articulées, l'huisserie qui cadre, porte étanchéifiée, et le verre qui cadre, fixe ou mobile, la transparence de la lumière et du regard. Cet angle dépasse la simple nécessité d'une fenêtre : elle articule deux faces verticales de la maison et son toit, et assure un usage intérieur qui s'accompagne d'un meuble qui épaissit la fenêtre jusqu'à l'échelle de l'incorporation des habitants. La distanciation critique vis à vis du projet est facilitée quand une même ligne assume une polysémie de l'intention à la réalité.

[283] Louis Kahn, Fisher House, Hatboro, Pennsylvanie, USA, 1967. La baie d'angle de la maison Fisher est étudiée par tous les étudiants de 2ème année de l'ENSAPB dans un exercice de traduction dessinée, d'après l'idée et sous le contrôle de Jean-Marc Weill et son équipe d'enseignants STA : Gérard Pras,

Le changement croissant d'échelles encourage la traduction dessinée des questions entre enveloppe et thermique et dynamise la démarche projectuelle. Transformer la ligne en joint va constituer l'enjeu initial du 1/50ème. Cette échelle permet de percevoir la division de la ligne initiale en trois : deux bords de matière et un interstice. Le moment où ces trois éléments vont devoir être définis en épaisseur, passer de la surface au volume, introduira le prochain changement d'échelle. Chaque échelle est comprise entre deux servitudes. L'une est nécessité par le dépassement de l'échelle précédente, l'autre par la nécessité de son propre dépassement. Chaque échelle est ainsi l'enjeu d'une complétude dynamique. Puisqu'elle est appelée par la précédente, elle induit un re questionnement où le dessin (changeant d'échelle) gagne en propriété. Ces propriétés sont celle transmise par passage de la ligne unique au joint, puis à la matière. En l'occurrence la partition binaire entre carton et vide, signifie le rapport entre opaque et transparent. Le joint, qui apparait entre deux surfaces, engage l'articulation physique de ces surfaces par une huisserie. Enfin les limites matérielles engagent la division d'un matériau transparent ou opaque en différentes parties à assembler, dans le contexte d'une façade légère mais variable en hauteur (3,5m à 7m).

Illustration : Exemple de répartition des ouvertures/opacités au 1/50ème en maquette

Cette capacité de l'échelle atteint ses limites après que ses lignes aient consacré une expression dessinée du sens à cette échelle dans le respect de ce que l'échelle précédente avait défini. En effet, il ne s'agit pas de remettre en cause les acquis de l'échelle précédente mais de les confirmer, de les compléter en cohérence avec elle. Toute échelle s'articule avec la précédente et la suivante. Le dessin de conception est pris comme un *work in progress* qui accompagne la précision d'une pensée s'affirmant en des choix progressifs et conscients. Ce dessin est celui qui confirme, en les précisant, les décisions prises par le dessin préalable, tout en manifestant une incomplétude suffisante pour rendre indispensable un dessin à l'échelle

supérieure. L'alternance de validation et de trouble, convoque-t-il une capacité psychasthénique ? Ou de simple perfectionnisme ? La dynamique d'une satisfaction relative est sollicitée. Elle permet d'autant mieux de comprendre en quoi le trait dans son évolution reste parallèle à la réduction de l'approximation d'énergie qu'il engage.

À chaque échelle, quel est le lieu du dessin qui donne lieu à une incidence thermique ?
L'exemple de l'écart entre les apports dans le processus de conception entre les échelles du 1/100ème vers le 1/50ème montre qu'il engage une vérification à rebours. Il montre aussi, qu'à chaque écart, il existe un type d'apport différent. L'incidence de l'épaisseur progressive du trait et son passage en trois dimensions influence beaucoup le calcul d'énergie engagée. Non seulement en terme quantitatif puisque le comportement de ces épaisseurs n'est pas le même que celui des vitrages potentiels[284]. Mais aussi en termes qualitatifs. La répartition de la transparence en surface, entraine la conscience de différences entre types de façades légères et leurs structures afférentes, et celle de la position respective de différentes épaisseurs : étanchéité à l'eau, air et isolations. Ce sont des décisions qui entrainent le second œuvre et les finitions. Quelle apparence donner aux différentes surfaces de matières données à la vue ? Le chemin vers la matérialité trouve une expression non arbitraire dans la démarche de projet. Le choix de conception est à faire entre des possibilités étayées par des données. Il est susceptible de s'exprimer hors de la démarche de projet. Il quitte le mystère conceptuel pour être appréhendé par les autres acteurs, ingénieurs, maître d'ouvrage.

Au 1/200ème « la maquette couleur » permet au contraire des décisions stratégiques liées à la recherche du plan libre. Les critères à hiérarchiser, retenus pour évaluer la liberté du plan sont réunis en quatre points :

- la capacité de l'escalier à « bien » distribuer les fonctions situées sur le PH1, à partir de sa « juste » position au PH0,
- la *figure du plan* en termes de simplicité/efficacité/identité, sous l'influence de l'hypothèse depuis le choix de l'entrée, du premier arrêt, du contour général.
- la correspondance programmatique avec le plan en rapport à l'orientation solaire, à la lumière, à la proximité, à la mitoyenneté des fonctions,
- l'autonomie, dans l'espace et dans le temps[285], de la périphérie du plan à la limite de trente mètres par trente mètres[286],

Ces critères entrainent des décisions auto-référentes, dans la mesure où elles prennent également part à la définition de la liberté du plan. Cependant, on notera, au niveau méta structurel, qu'elles induisent des relations dynamiques et interactives avec la notion d'énergie. Celle qui nous semble primordiale à cette étape de la conception est liée au rapport : *Figure du plan* / Orientation solaire. Le plan de base est carré et rigoureusement orienté sur les points cardinaux. Ceci afin de rendre conscient du rapport entre cette neutralité modulée et les invariants solaires et climatiques du site.

Une figure résultante caractérise le plan et induit des qualités thermiques (et lumineuses) différenciables

Le rapport tracé/géométrie se traduit directement par une figure caractéristique et synthétique dont on constate l'apparition involontaire dans les projets. Depuis la périphérie un plan d'une profondeur de 30m offre la perception d'un espace trop sombre pour vous inviter à entrer. Seule son interruption, livrera le cœur du projet à la lumière et rendra opératoire la fonction distributive du hall. Le plan de base carrée et son orientation cardinale induisent pour l'interruption une orientation : Nord-Sud ou Est-Ouest. Ce choix présidera au dessin du nouveau contour du plan qu'on appelle ici figure.
Les figures sont en I, en L, en T, en U ou en G, en F, en Z[287], en H … Elles sont déterminées par une, deux ou trois branches. La figure est a priori simple, puisque des arguments de complexité manquent, à cette échelle. Sans atteindre de contradiction, elles seront amenées à évoluer pour convenir plus finement à une question opportune et chiffrée, fonctionnelle, spatiale ou climatique.

L'adéquation entre figure de plan, programme, enveloppe virtuelle, est recherchée au 1/200ème. Le climat influence le processus de projet avant même l'introduction de l'enveloppe. C'est le plan libre, dont le dessin est déterminant durant l'ensemble de la démarche (plan référent à tous les arguments de projetation) qui reçoit le premier les informations venant de l'extérieur. C'est en fonction de sa potentialité que les choix fonctionnels et de répartition programmatique sont faits. Sa *figure* joue donc un rôle stratégique dans l'articulation dessin des contours orientés /influence énergétique. Un premier classement des situations rencontrées est fait et peut donner lieu à calcul à des fins d'identification quantitatives. Exemple linéaire de // en contact ou détachés de chaque face orientée. Ce qui équivaut à identifier la surface d'écart entre plan libre et périphérie du 30 30.

[284] Double, triple vitrage, épaisseurs du verre, … mais aussi transparent, translucide, filtrant, occultant, variant, etc. …
[285] Le gage de liberté du plan est qu'il semble avoir décidé des autres éléments au bénéfice de sa liberté. Il n'est pas « composé », c'est lui qui compose avec l'espace. Il n'entretient donc pas de relation de dépendance mais il est le résultat d'une négociation positive.
[286] Figurée ici par la matière grise (neutre) du *PH0*, avatar du sol.
[287] En baïonnette pour être plus précis.

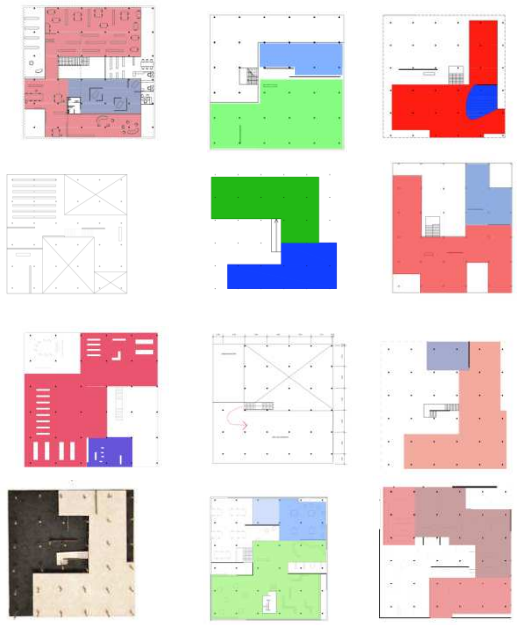


Illustration : Différentes figures du plan libre effectivement produites dans le cadre de l'enseignement du 30 30.

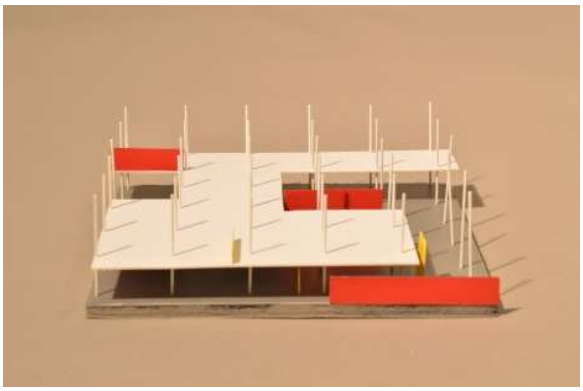
Il est possible de catégoriser les bords du PH1 dans leur rapport majoritaire à l'axe nord /sud ou à l'axe est/ouest. Cette dominante caractérise l'axe du parcours dans le plan. En entrant au sud on propose implicitement de traverser le plan pour rejoindre le nord et d'accomplir ainsi un parcours de reconnaissance. Les limites orthogonales du PH1 vont donc rythmer ce déplacement en l'accompagnant dans une direction parallèle (nord sud) ou le contrariant dans une direction perpendiculaire (est/ouest). Ceci nous permet de comprendre en quoi l'orientation solaire devient la variable décisive, autant qualitativement que quantitativement, des variations d'échange d'énergie venant de l'extérieur[288], qui accompagnent le plan[289]. Ultérieurement l'importance du linéaire de périphérie du plan libre, le périmètre, ramené à leur parallélisme avec les quatre orientations solaires se mesure à son influence sur le delta énergétique d'un mètre linéaire de bord de PH1. 1mlPH1/N, 1mlPH1/S, 1mlPH1/O, 1mlPH1/E.

[288] À travers l'enveloppe constitué de cinq faces : quatre façades et le *PH2*.

[289] Initialement découpé pour les seules raisons d'échanges lumineux.

Conclusion provisoire

Il faut donc donner au 3030oscope le moyen d'accompagner la démarche de relativité quantitative dès le choix de la figure du plan libre. Et non le réserver au calcul a posteriori, constatant fatalement les incidences d'un choix. En conclusion, il faut ajouter un cinquième critère de décision à l'évaluation de la liberté du plan au 1/200ème. La conscience d'établir un choix stratégique gagne en intérêt si il peut ensuite se confronter (se mesurer) aussi à l'orientation, nuancier de facteur thermique. Dans un premier temps il s'agit d'interpréter l'influence de l'orientation solaire comme apport de qualités lumineuses aux éléments du programme ; ceci à partir de la séquence dynamique entrée/hall. C'est un premier facteur du positionnement stratégique. Ensuite la dimension quantitative de la lumière et des échanges thermiques pour les grands ensembles fonctionnels (administration, secteur adulte, secteur enfant, salle polyvalente, secteur numérique, …) alimentent le second positionnement stratégique avec une finesse croissante par étape. La cristallisation progressive de l'enveloppe accompagne en effet la possibilité d'une mesure progressive de son incidence sur les échanges lumineux, thermiques et visuels en question.
La première étape rencontrée, au 1/200ème, est celle de la définition de la figure du plan libre qui rencontre une situation sans enveloppe. C'est à dire que toute la lumière entre en direction de l'espace sous et sur PH1, depuis les quatre faces verticales et la face supérieure horizontale. Sans ces cinq faces : les changes thermiques sont incontrôlés. La maquette, par les parois colorées[290] induit le recourt à des qualités différenciées selon les orientations.



Illustration, maquette couleur

[290] Une paroi bleue est orientée vers le nord, elle est *froide*. Une paroi rouge (au dos d'une bleue) est orientée vers le sud, se *réchauffant* de la lumière, solaire, *verticale, permanente*. Une paroi jaune orientée vers l'est ou l'ouest est baignée le matin ou l'après midi d'une lumière solaire, *horizontale, symétrique*.

Il faut alors pouvoir corréler chaque face avec un potentiel d'éclairement et de température d'ambiance. Méthodologiquement parlant, il faut refermer l'enveloppe jusqu'à un équilibre plausible entre la lumière nécessitée par chaque fonction et les échanges thermiques affectés par la présence d'ouvertures dans les opacités. La découverte de ce potentiel nécessite une connaissance approfondie de la figure architecturale et de sa formalisation au cours du processus projectuel.

La figure dans l'enseignement du projet **architectural**

Contribution à une théorie de la figure architecturale.

Références du terme
À l'origine, le terme figure appartient au champ de la rhétorique. Dans l'enseignement de l'architecture, la **figure**[291] est une notion qui a longtemps été dédiée à l'analyse. Mais initialement la source du terme se trouve en rhétorique : « Il y a une différence entre ce qui peut être imaginé et ce qui peut être pensé. Cette distinction implique qu'une figure représente une idée. (…) Ce concept comprend aussi une distinction entre la figure et le contenu. La figure donne une approximation aussi fidèle que possible d'un contenu qui reste ineffable. (…) L'efficacité des figures réside dans leur pouvoir de synthèse. Ils rassemblent et cristallisent une série d'expériences complexes qui sont diffuses et imperceptibles. La figure est donc une condensation dont l'effet immédiat est de suggérer la richesse et la complexité de la réalité. »[292]

Le choix de décrire un édifice, en tant qu'unité, sans en évoquer l'apparence, la ressemblance, le style, au travers d'un terme qui le définisse de manière unique est nécessaire pour l'évoquer en son absence. La figure transcende alors la notion de type, essentiellement dédiée au mode d'organisation.

La figure permet a posteriori de porter sur l'architecture un regard critique synthétique. C'est un élément de vocabulaire qui rend compte d'un édifice, sa présence, son essence. Citation : … De manière plus originale, ce terme est volontairement employé depuis sa fondation[293] par le groupe UNO[294] à des fins pédagogiques, comme un des éléments sur lequel repose l'explicitation d'un enseignement progressif du projet. Il est couramment utilisé à partir de cette période dans les textes de recherches[295].

Dans l'ouvrage consacré à sa pédagogie (« Catalogue UNO », 1980, page 27), l'auteur écrit à propos d'un studio d'architecture de fin d'études : « La pièce urbaine »:
« L'approche du projet se fait par l'élaboration de figures dont les limites se différencient d'une représentation de la matière dont seront faits les édifices. Le travail s'effectue à petite échelle, en maquette, pour éviter que l'étudiant identifie chaque élément de la maquette à un bâtiment. La figure … doit répondre à 4 conditions qui, suivant les hypothèses de chaque étudiant, satisfont à des spécifications différenciées :
Site ; Extérieur reconnaissable ; Intérieur identifiable ; Libérer par extrapolation de densité ».
Dans ce texte sont posés : le caractère abstrait de la figure et celui de sa capacité d'anticipation, l'instrumentation de la réduction de l'échelle et de ce qui est représentable, l'unité articulée de la figure en dépit de sa composition par parties.
Pour compléter le savoir rassemblé depuis la période d'expérimentation de la figure, un extrait d'Interfolio, n°2, en 1994, où j'écrivais[296] : *« Le travail sur la figure relève de la contextualisation des données et des intentions. »* Formaliser une idée, parce qu'elle opère dans un contexte polysémique traduit par une physique anthropique (donc tangible et perceptible), permet d'opérer une synthèse instantanée dans une phase initiale du projet. Le recul critique au projet en est favorisée par l'échelle et le vocabulaire formel, au moment où seuls les éléments principaux offrent une hiérarchie lisible. La figure sert ainsi une phase stratégique de mise en place des choix fondamentaux en matières d'identité, d'identification, et d'articulation : programme/architecture/milieux. La figure est donc principalement un élément d'arbitrage de la dialectique intérieur-extérieur. Le choix topologique élémentaire de la répartition d'un programme complexe obéit avant tout à une rationalité fonctionnelle. En échange, le sens que ce même programme peut prendre au regard de son contexte se traduit par une affirmation de visibilité apparemment indépendante de la fonctionnalité. La figure, comme outil de synthèse, s'impose entre idéalité formelle et fonctionnelle d'un programme dans son contexte.

L'outil pédagogique

[291] En psychologie : tendance d'une forme réceptive à se détacher du fond et à se constituer en structure autonome. Linguistique : modification de l'emploi des mots. Géométrie : dessin servant à la représentation d'êtres mathématiques. Verbes : se figurer, configurer. Expressions : prendre figure ; en arts : la figuration en peinture.
[292] Alan Colquhoun, « Forme et figure », Oppositions 12, printemps 1978, pp. 26-37.
[293] Pendant le séminaire enseignant d'UP8 en 1978.
[294] Dont les fondateurs en 1978 sont les architectes : Henri Ciriani, Jean-Patrick Fortin, Édith Girard, Claude Vié, rejoints d'abord par Laurent Salomon et Alain Dervieux, ...

[295] Plusieurs exemples : Enseigner le projet d'architecture ; actes du séminaire de Bordeaux, 1 & 2 avril 1993 ; Figures de la conception architecturale : manuel de figuration graphique/ Philippe Boudon, Frédéric Pousin. - Paris : Dunod, 1988.-112 p. ; « La figure architecture, un enjeu esthétique » Patrick Berger, Christian Eychenne, Collège International de Philosophie, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1988.
[296] « Point projectuel et foyer spatial » ; Alain Dervieux, Interfolio, n°2, 1994.

L'expression de la contradiction explicitée ici nécessite la manipulation dans l'espace d'éléments incomplets mais précis. La continuité, la contiguïté, la proximité, la position topologique (en haut, en bas, dessous, dessus, devant, derrière, à gauche, à droite, posé, soulevé), la proportion, la relation d'échelle, l'orientation (solaire ou géographique), la quantité relative, la manifestation synthétique, qualifient cette précision. La nature tridimensionnelle de l'espace reste à cette étape du domaine de l'incomplétude: épaisseur, division, répétition, stratification, périphérie, distribution, sont en attente de qualification. Installer des surfaces, par définition bidimensionnelles, dans une situation tridimensionnelle, par tension et pliage, permet de gérer la simultanéité du binôme incomplétude/précision.

La figure a par conséquent une valeur limitée dans un processus pédagogique. Sa pertinence se résume à la résolution d'un conflit entre l'attente publique (compléter une situation partagée) et la dimension singulière d'un édifice (satisfaire un programme et ses usagers). Son efficacité s'estime à une échelle très grossière. Pour l'étudiant, son avantage est de pouvoir être réalisée très facilement par pliage ou collage d'éléments réguliers simples, des carrés, à moins qu'une dimension l'emporte sur l'autre, ce qui impose le rectangle. Aucune possibilité d'enclore l'espace n'est possible puisque l'on choisit deux des trois dimensions à représenter et une de ses deux dimensions (au plus) à privilégier. Une forte hiérarchie s'installe entre les trois direction de l'espace : l'importante, la secondaire et celle qui reste à définir spatialement : une intériorité en devenir. La maquette qui en résulte est facile à faire et presque autant à (in)valider. Les défauts des décisions figurées, comme dialogue avec le programme et avec le site, apparaissent très vite. Et la balance entre elles s'établit sur l'évidence ou la difficulté d'une hiérarchie qui ressort de sa lecture. Suspendre la question de la nature spatiale de l'épaisseur oblige de la figurer autrement, en perspective notamment[297]. La démarche d'enseignement s'appuie sur la capacité de certains outils de représentation à accéder à des questionnements projectuels et d'en révéler leur limite. La dynamique du projet nait de l'usage gourmand d'un instrument conduisant à l'inaccomplissement et dont le dépassement ne peut se faire que par l'intermédiaire d'un déplacement[298] du questionnement, donc un changement d'instrument.

Manipuler la figure

De simples rectangles de papier rigides, perpendiculaires ou parallèles, verticaux ou horizontaux, articulés ou mis en tension, sur leur grand ou petit côté, suffisent à décrire une infinité de dispositifs qui vont du plus élémentaire : l'équerre ou la parallèle (Illustration) entre deux éléments, au plus compliqué … Héritiers des *architectones* de Kasimir Malevitch, des compositions spatiales de Katarzyna Kobro et des constructions vides de Jorge Oteiza. (cf. Illustrations) :

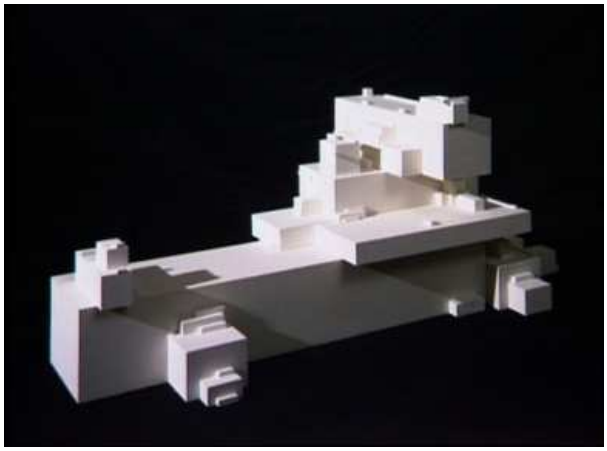
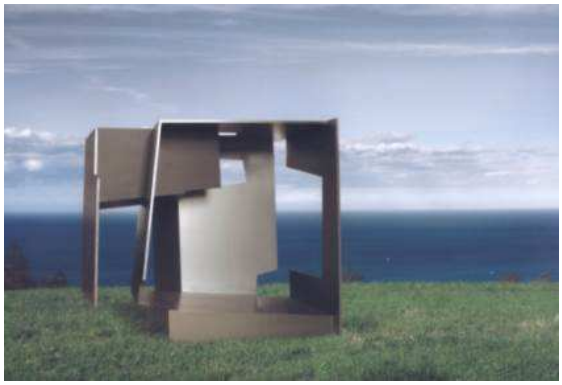


Illustration : Alpha, 1923-1978 ; Plâtre et verre, 33 x 37 x 84,5 cm, Kasimir Malevitch, reconstitué en 1978 par Paul Pedersen ; Musée d'art moderne de la ville de Paris (Centre G. Pompidou).

Illustration: "Spatial Composition" de Katarzyna Kobro (1898-1951) 1928; métal peint,40 x 64 x 40 cm; Musée Sztuki Łódz (Pologne).

[297] Décrites en particulier dès Interfolio 2 ou dans la recherche « 30 mètres par 30 mètres, un enseignement moderne du projet moderne », A. Dervieux, O. Gahinet, recherche BRA, 1999.

[298] Dans le sens de l'approfondissement sous une autre forme ou une autre échelle.



Illustrations : « Construction vide», Jorge Oteiza, 1957 à la biennale de Sao Paulo (Brésil) installé à St Sebastien (Espagne), 2002 ; Boîte vide avec grande ouverture, 1958, Métal, 46 × 45 × 39 cm). Musée Guggenheim à Bilbao.

Leur minceur privilégie leur espacement, leur épaisseur virtuelle et le mouvement quand leurs ainés du mouvement constructiviste favorisaient la masse et la cohésion. Monochromes évitant les caractères distinctifs, ils présentent les caractéristiques d'un vocabulaire abstrait pour un langage destiné à argumenter du rapport entre intentions et ordres sur la forme. La couleur permettra d'en codifier le rapport aux contextes (programmatique, urbain, …). Le savoir développé reprendra les capacités d'organisation simultanée en trois dimensions, de géométrie dans l'espace, de proportion relative, …, de synthèse. Le potentiel de chaque élément matérialisé réside dans la dissociation de chaque surface par une épaisseur.

Dans un programme complexe, la formulation d'un programme typique (dont le type est répertorié) par opposition aux parties atypiques du programme par essence banalisées et répétitives influencera dans la figure, la topologie et la géométrie des formes chargées d'incarner ces incidences. Le programme typique s'exprime par une forme reconnaissable, son accès est primordial comme son orientation et son articulation au sol et au site. Le programme atypique s'organise par une coupe qui offre la régularité des permanences d'orientation de lumière et de mesure sur une face, d'une part. Et l'expression du caractère distributif et de service sur l'autre face, d'autre part, dans un dessin d'ensemble chargé de l'expression du statut de l'édifice.

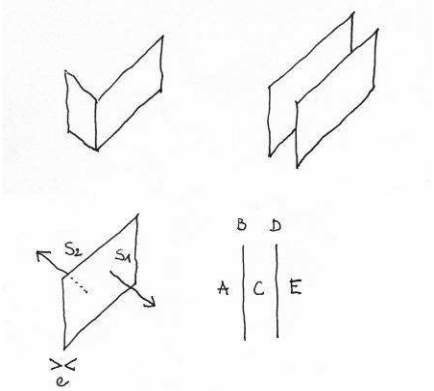


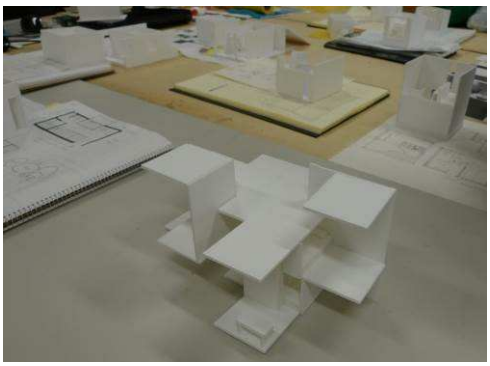
Illustration 2 : Les parallèles et l'équerre ; le potentiel d'épaisseur et d'orientation

La figure architecturale en différentes situations pédagogiques

Un workshops de cinq semaines

Par convention entre le Shibaura Institute of Technology de Tokyo et l'ENSAPB depuis 1995, devenu triangulaire avec HangYang University en 2011. Entre ces trois établissements et en particulier dans le cadre de ces workshops, une pédagogie issue de l'enseignement du groupe UNO a pu se développer une pratique originale du projet. Dès les phases initiales, la place de la maquette et celle du dessin perspectif tiennent une place importante. Le dessin numérique sert le développement du projet, le bon partage des tâches et la synthèse des expérimentations.

Après l'élaboration d'un diagnostic commun à des étudiants de culture architecturale contemporaine dispersée, le recours à la figure permet de partager une proposition qui exige de s'accorder sur les intentions principales et leur formulation hiérarchisée. La figure se développe aux échelles suivantes par l'intégration du travail de répartition programmatique spatialisée.



Illustrations : Workshop Septembre 2013, à Séoul. Figures de projets, développements jusqu'au projet final.

La figure comme outil de conception

La figure peut trouver sa pertinence dans un travail progressif de conception à différentes échelles d'application. En effet la notion de site et de problématique programmatique est transposable à l'échelle du mobilier, de l'édifice ou de la pièce urbaine.

À propos de la figure dans son enseignement de la Pièce Urbaine[299], Henri Ciriani précisait :

« Il vaut mieux pour faire une pièce urbaine, que sa figure, sa trace formelle soit simple. Sans figure simple, impossible d'utiliser des bâtiments riches... La figure complexe dans un bâtiment complexe est à bannir. Des figures simples, constituées par des bâtiments linéaires, bâtiments-lignes, vont permettre de traiter les rapports entre l'espace commun de la pièce urbaine et l'espace privé du logement. Si la figure n'est pas simple, si le bâtiment n'est pas extrêmement linéaire, il devient difficile de travailler les perpendiculaires à cette linéarité, dans laquelle on va résoudre tous les problèmes d'articulation, de pratique urbaine, entre le trottoir et les logements. Il est fondamental que la figure soit simple... »[300]

Les exemples pédagogiques, issus de la période fondatrice du groupe UNO, sont toujours explorés à l'ENSAPB en particulier par : Lorenzo Piqueras dans l'exercice du Logis[301] (cycle Licence), Laurent Salomon pour des projets d'équipements majeurs et de projets urbains (cycle Master) ou dans l'assemblage de maisons individuelles[302] conçues du meuble au paysage (4 fois 1 égalent 5) que j'encadre en 3ème année. Mais la figure comme outil pédagogique peut aussi conduire à un emploi prospectif. Je le développe pour l'identification du caractère du plan libre dans petit équipement public (EL 57, ex 30 30) également en 3ème année. Classer les propositions élémentaires du plan, faites par les étudiants, permet d'envisager consciemment le rapport qu'entretient le plan libre (plan du premier niveau) avec le volume enveloppe de base carrée (30x30x6m).

[299] En cinquième année cet enseignement du projet à l'échelle territoriale correspondait au développement d'un morceau de ville de 4ha environ, sur une aire « inoccupée » mais située.
[300] Pratique de la pièce urbaine, ma petite utopie, le 30 mars 1994, 69 p., édition : 1996 [Paris] Éd. du Pavillon de l'Arsenal.
[301] Ces exercices sont pratiqués, en France comme à l'étranger, dans plusieurs établissements, dont l'ENSA Normandie.
[302] À propos de cet exercice qu'il a également enseigné à Paris-Belleville, Simon Pallubicki déclare : « La figure des quatre logements occupe selon moi une place particulière ... La figure constitue, dans ce cas, un regard analytique et rétrospectif de l'étudiant sur son propre travail : être capable de voir et dégager ce qui est « essentiel ». Elle permet accessoirement à l'enseignant de mesurer le degré maîtrise et la capacité de rationaliser le processus projectuel de l'étudiant.

Dans cet exercice projectuel, le programme est organisé sur deux niveaux, le sol et un niveau dont les contours sont à définir mais dont les limites sont fixes, trente mètres par 30 mètres. Le déploiement de ce plan[303] dans les façades, le plan du sol et le plan de couverture font comprendre que les choix de périphérie du plan libre ont une incidence sur les échanges qu'il entretient avec son milieu. En particulier, les échanges lumineux guident le travail de construction de la spatialité au service de l'usage. Les échanges thermiques en fonction de l'orientation solaire et du climat (en Île de France pour cet exemple) sont actuellement au cœur d'une étude approfondie. Les conséquences de la relation entre plan libre et enveloppe sur l'énergie déployée dans tous les cycles liés à l'édification d'un équipement influencent la démarche pédagogique. Le choix comportement énergétique global dépend du choix du plan libre, dont la figure est le premier facteur identifié.

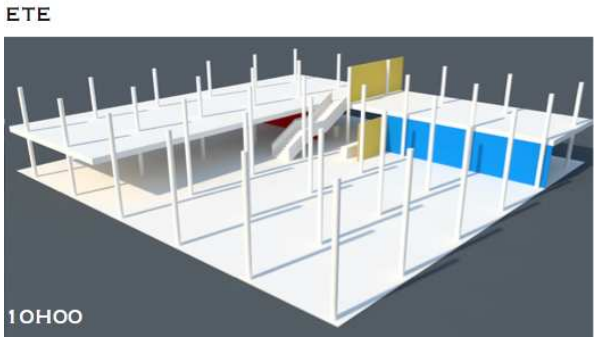


Figure en L, éclairée par la lumière d'été du matin.

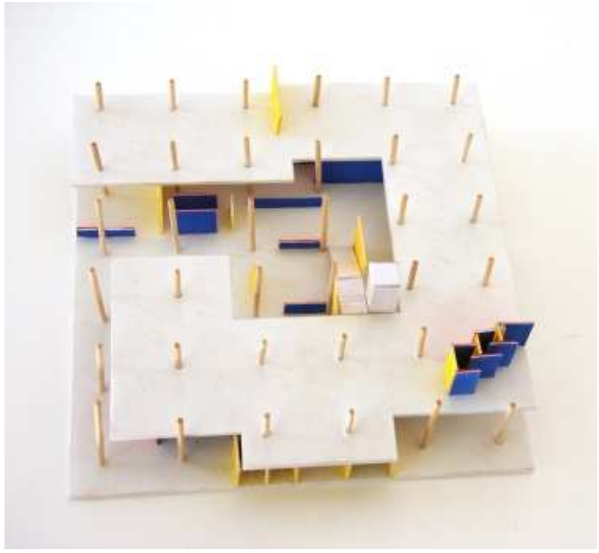
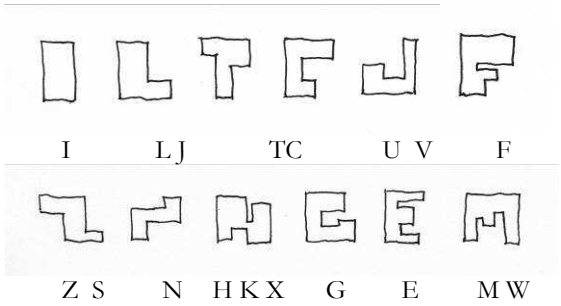
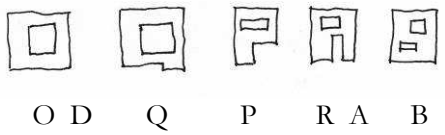


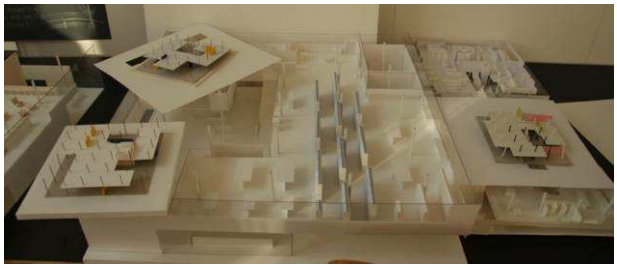
Figure complexe.



Illustrations : les figures élémentaires du plan libre.



Figures non opérationnelles : figures à cour ou trémie :



Figures initiales, et évolutions au 1/200ème, 1/100ème, 1/50ème. Calcul des échanges thermiques.

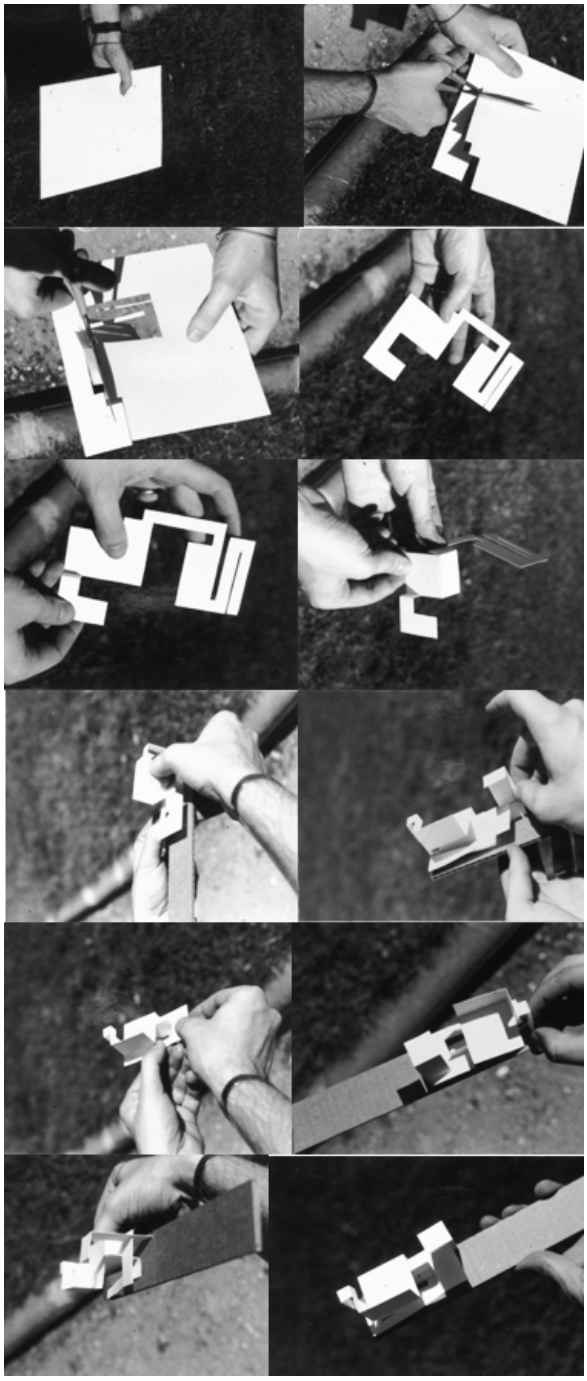
Illustrations : les figures du plan libre sous la lumière solaire; la couleur manifeste un potentiel d'usage selon la luminosité et l'horaire de l'éclairement.

[303] La liberté, du plan libre corbuséen considéré ainsi, a un très fort potentiel tridimensionnel. Contrairement au « plan fluide » missien (Pavillon de Barcelone, villa Farnsworth, etc.) qui influence le plan en deux dimensions seulement, longueur et largeur, neutralisant la verticalité par une symétrie horizontale.

La figure comme outil d'analyse

Si la figure a la vertu de guider le passage de l'idée vers la forme architecturale par une étape intermédiaire et spécifique on imagine que le processus est réversible de l'édifice à l'idée[304]. Il devrait être possible de déduire, à posteriori de sa réalisation, la nature figurale d'un édifice. Voici un essai en forme d'origami, mené à l'ENSAPB par un étudiant, F. Guynot de Boismenu, à propos de la villa Curutchet[305]. L'intérêt est de vérifier la cohérence d'un édifice dont les parties significatives peuvent, après réduction en deux dimensions, se combiner en un ensemble synthétique, porteur de l'essence du projet. Il est à remarquer qu'il est difficile de restituer sans bavardage la complexité d'un édifice par un document unique, qu'il soit graphique ou textuel.

La figure est un outil projectuel dynamique entre la réalité du site et de la commande fonctionnelle amorçant une esquisse du projet dont la nature spatiale, mise en attente, est à explorer en rapport avec les directives qu'elle incarne. Les contradictions qui apparaitront seront à arbitrer sans pour autant remettre en cause les acquis. La figure, contribue à la construction dialectique d'un enseignement du projet. En ce sens, elle devient un outil scientifique du raisonnement projectuel architectural[306]. Sa mise en interrogation nécessite un travail collectif de type séminaire (ou correction commune) où est commentée l'adéquation du résultat matériel avec l'énoncé des intentions. Il s'agit donc de la première figuration dans le processus de projet, du premier passage à la physique architecturale. Développé dans son apport conceptuel à la démarche de projet il reste à profiter de sa capacité dans la sphère physique de l'architecture : la structure et l'enveloppe, soit la matière et l'énergie. C'est une épure ni géométrique, ni constructive, ni spatiale, qui présume au plus prêt des intentions situées des engagements … *vers une architecture.*



12 Illustrations : Figure de la villa Curutchet, analyse, construction et maquette.

B.

[304] Sur la réversibilité du processus projectuel Christian Devillers a publié un article très intéressant où il met en question le déroulement logique et déductif du projet in : Christian Devillers, « Réponse à Françoise Choay », in cahier de la Recherche Architecturale, n°26, 2e trimestre, 1990, p. 97.
[305] Villa Curutchet, 1948, La Plata, Argentine, architecte Le Corbusier.
[306] Comme le sont les étapes perspectives du *foyer spatial* et du *point projectuel*, décrites dans Interfolion°2.

Conclusions

Modifier le 3030oscope.

Au delà des décisions synthétiques que l'échelle du 1/50ème permet d'appréhender simultanément pour un équipement public de cette taille (bibliothèque de 1500m²), une étape présumée de la relation du bâtiment est celle de la mise en cohérence de la matérialité avec celle de sa mise en œuvre détaillée. En cycle licence , le 6ème semestre nous autorise à nous aventurer dans la direction du détail guidant la matière. Elle se traite autour d'une baie « entre usage et paysage ». La dimension emblématique de cet ouvrage de 3,66m par 3,66m. L'enseignant qui accompagne se déploiement est Jean Marc Weill.

En deçà du 1/200ème, l'exercice, se déroulant hors situation, sollicite l'usage comme site. Il s'agit de construire l'espace répondant au programme autour du corps du pratiquant en mouvement. Les échelles territoriale et urbaine, inféodées à une compréhension du paysage, sont à associer au projet d'installation humaine. Je propose un enseignement au 2nd semestre en complémentarité du 1er. La question de l'énergie prend en considération les règles urbaines et celle de la conurbation.

D'un point de vue pédagogique, afin de rejoindre les capacités du 3030oscope, la modélisation du projet de l'étudiant peut apparaître comme la conclusion logique au 1/50ème de l'ensemble des questions abordées. Pourtant ce ne sont pas les questions résolues ! Une itération serait nécessaire, avant le recours à une échelle supérieure. Une nouvelle partition du projet, sans possibilité de représentation unitaire, en étant d'ailleurs presque automatiquement la conséquence. La modélisation peut être prise comme la meilleur « somme des parties » accessible à ce niveau d'études ? Cela ne doit pas occulter la nécessité d'une figuration synthétique de la question posée par le projet … La projetation éprouve la capacité du projeteur à installer, à chaque instant, dans une chronologie, les décisions partielles comme anticipations d'une unité à venir. Pour des raisons purement scalaires, la représentation unitaire d'un petit équipement au delà du 1/50ème oblige le recours à une représentation non détaillée alors que la définition du projet se détaille. C'est un paradoxe qu'il faut dépasser dans les enseignements de projet de second cycle. La continuité de la démarche se traduit par une discontinuité des représentations. Nous faisons l'hypothèse qu'il en résulte dans la démarche projectuelle une divergence entre les résultats en terme de spatialité et de matérialité, au moment où ils deviennent interdépendants. La question de la matière ne peut s'aborder sans le progrès substantiel provenant de la connaissance de sa mise en œuvre plus qu'à celle de sa décomposition détaillée (subtile ou non). L'outil projectuel réclamé met en rapport simultané deux échelles. Dans un autre ordre de difficulté et pour asseoir une pensée spatiale, l'étudiant de premier cycle s'est vu proposé la maitrise de l'articulation entre le plan et la coupe et l'intégrité de l'édifice associant par réversibilité le contenu et le contenant.

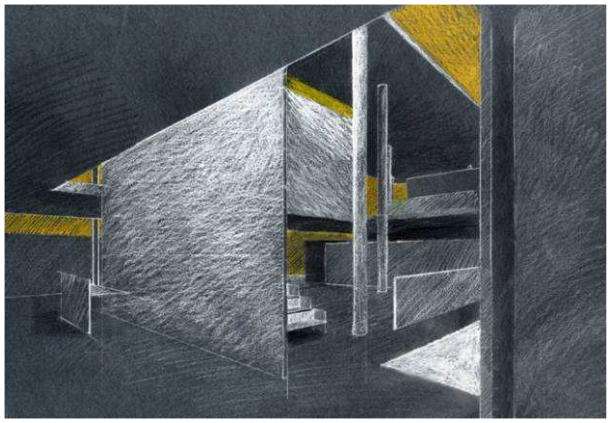


Illustration : Perspective du hall, Paerspective de la diagonale majeure du projet.

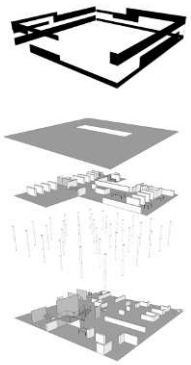
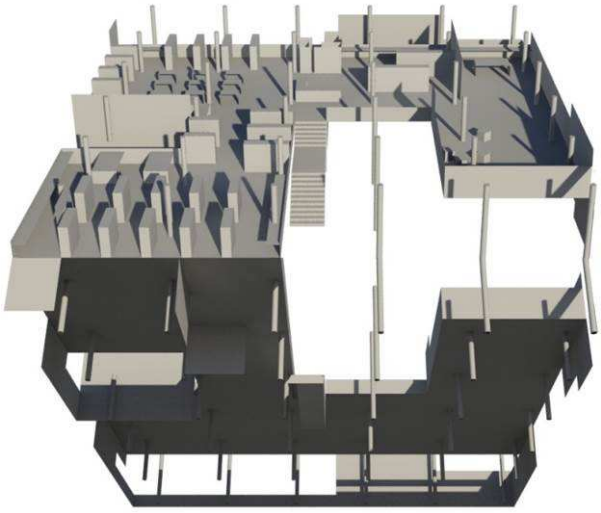
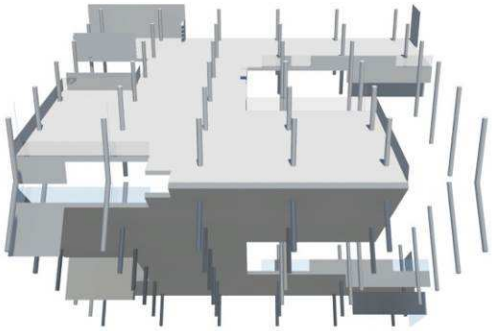


Illustration : Dessin du plan libre à l'issue du processus de 15 semaines, essais 2014.





Plan libre/Énergie/Échelles

3 versions du 3030oscope

Version 1/200ème
Au 1/200ème les informations essentielles concernant le rapport entre le plan libre et l'énergie dépendent de la figure du plan. Un répertoire des figures ultérieurement développées classe les familles de réponses formelles à cette étape du travail. Les grandes entités programmatiques : secteur adulte, secteur enfant, secteur numérique, administration, salle polyvalente, hall, en réponse aux quatre points précités. La figure du plan libre détermine l'ensoleillement potentiel du PH0 et du PH1 en fonction des surfaces offertes et recouvertes selon la course du soleil.

La qualité de réception lumineuse n'est pas dépendante de l'enveloppe (il n'y en a pas encore) mais de l'orientation solaire des arrêts majeurs du PH1. La quantité significative à mesurer ici par le 3030oscope/200ème est celle de la surface de PH0 et de PH1 éclairée par le soleil en fonction de la durée d'insolation. Au delà du potentiel de luminosité à servir le programme cette quantité représente le potentiel d'énergie devant être contrôlée au profit du confort recherché. Jusqu'à présent le binôme hypothèse/programme guidait la recherche d'une spatialité à la lumière juste et volontaire. La mise en maquette sous la lumière, révèle la dimension stratégique d'une masse énergétique résultante de l'installation topologique du programme. Au delà du prétexte d'éclairement, dont le contrôle est prématuré, c'est l'ensoleillement (comme quantité et emplacement) qui caractérise le choix de la figure du plan.
La répartition topologique du soleil comme enjeu de la maquette couleur. L'étude a été réalisée pour la lumière, la transposition pour la thermique

Version 1/100ème
Au 1/100ème l'attention à la diversité des usages à leur établissement et à leurs articulations se traduit par l'apparition d'opacités et de meubles. La complexité se traduit par une découpe plus ajustée de la périphérie du PH1. À cette échelle le plan gagne en précision et la spatialité se divise. La progression de la lumière cesse d'être littérale, elle est contrariée dans ses déplacements avant d'atteindre le sol. La sous-face du PH1 révèle des espaces à la lumière insuffisante. Éloignés des façades c'est par la surface supérieure (PH2) du volume enveloppe que peut provenir la luminosité naturelle suffisante.

L'enveloppe va se constituer à partir de la nécessité d'ouverture dans le PH2. Favorisant ainsi la pénétration d'une lumière zénithale et d'un ensoleillement privilégié axé nord/sud ou est/ouest. En l'absence de façades le 3030oscope/100ème va rendre compte des surfaces

ensoleillées par l'ouverture en PH2 et toutes les faces verticales.

Version 1/50ème
elle s'approche de la version ultime du 3030oscope. L'incidence dans les façades de la répartition ouvrant dormant, transparent/translucide/opaque et de leur comportement à la lumière et aux échanges thermiques est majeure. La manipulation de ces paramètres doit être mise en exergue pour que soit visible la valeur relative de leurs interactions. L'ouverture du toit devra trouver, grâce à cette version, une valeur d'incidence zénithale mieux identifiée. Le toit comme surface opaque homogène peut trouver une valeur dans le cadre d'une captation solaire. Cette version permet, en résumé, de mettre en parallèle les décisions stratégiques du choix de la nature de l'enveloppe et ceux de leur représentation en maquette (valeur de la coupure, du joint) et en dessin dans leur version préparatoire de l'étape suivante … vers la matière et l'imaginaire de sa mise en œuvre.

Remerciements
Remerciements aux étudiants du studio « 30 30 » des années 2011/2012, 2012/2013 et 2013/2014 qui, par leur participation active, leur intelligence du sujet et leur travail, m'ont fourni la documentation nécessaire à cette recherche pédagogique.

Bibliographie spécifique

- Bruno Reichlin, "Programme" avec Yves-Alain Bois, "Le Corbusier vs De Stijl", "Mallet-Stevens vs De Stijl", Catalogue de l'exposition "De Stijl et l'Architecture en France", Liège, 1985.
- Bruno Marchand cours de théorie Epfl : http://ltha.epfl.ch/enseignement_lth/theorie/polycopie_th4/polycopie_th_4.pdf
- Jacques Lucan, article, La coupe libre, article in AMC
  Composition, non-composition, Architecture et théories, XIXème-XXème siècles, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (Suisse), 2010
- Henri Ciriani, article p26 in « Corbu vu par », Pierre Mardaga éditeur, Liège, 1987
- Alan Colquh'oun : «Déplacements des concepts chez Le Corbusier» in A. Colquh'oun, Recueil d'essais critiques. Architecture moderne et changement historique, Pierre Mardaga Éditeur, Bruxelles, Liège, 1985
  Essays in architectural criticism, Cambridge, 1985
- Robert Slutzky et Colin Rowe, Transparence littérale et phénoménale, Droits et regards, éditions du demi-cercle, Paris, 1992, traduction de «Transparency: litteral or Phenomenal», Perspecta, n°8, 1963
- William J.R. Curtis, L'architecture moderne depuis 1900, Phaidon, 2006
- Willy Boesiger, Le Corbusier, Œuvres complètes, 8 tomes, ed. D'architecture Artemis, 1991
- Michel Corajoud avec Jacques Coulon et Marie-Hélène Loze, Lecture d'un jardin, recherche et article: les annales de la recherche urbaine éditions Dunod, N°18-19, juin 1983 *http://corajoudmichel.nerim.net/10-textes/01-versailles-lect.htm*
- Christian Devillers, Réponse à Françoise Choay, in cahier de la Recherche Architecturale, n°26, 2e trimestre , 1990, p. 97.
- Kenneth Frampton, L'architecture moderne, une lecture critique, Philippe Sers éditeur, Paris, 1985

Recherche

- *« 30 mètres par 30 mètres : un enseignement moderne du projet moderne », avec O. Gahinet,* 1997-2000, 168 p.
- *« L'espace de l'architecture moderne », direction C. Vié et H. Ciriani,* 1989 rapports intermédiaire et final, 164 p., 130 p., 183 p.

Catalogue, Revues

- Le catalogue UNO-UP8, Une année d'enseignement 1982-1983, Paris, Éd. Enseignement et Pratique, 1983, 63 pages, catalogue exposition à la Cooper Union.
- La revue Oppositions n°12, printemps 1978.

Articles pédagogiques

- « Apprentissage des outils de transformation de l'espace par des exercices projectuels » in Enseigner le projet d'architecture, actes du séminaire de Bordeaux, coordination Guy Tapie, École d'architecture de Bordeaux, 1993 ; avec Pierre David, 19 pages.
- « Point projectuel et foyer spatial » in Interfolio n°2, mars 1994, pages 13 à 15.

Solar Decathlon

Contexte

Les recherches *Reforme* ont été menées en parallèle avec la participation à deux concours Solar Decathlon Europe, celui de Madrid 2012 et Versailles 2014. Le Solar Decathlon Europe (nommé simplement SDE dans la suite) est une compétition universitaire, organisée par le gouvernement espagnol en accord avec le gouvernement des Etats Unis en 2010 et 2012 et par le gouvernement français en 2014, dont l'objectif est le développement de la recherche et la transmission des savoirs dans le domaine de l'énergie solaire.

Le concours vise à sélectionner sur la base de dix critères, la meilleure équipe universitaire ayant réalisé une maison individuelle alimentée exclusivement par l'énergie solaire incident sur sa parcelle. Dans la suite de ce document on considère le contexte de la compétition connu au lecteur.

En 2012, l'ENSA Paris-Malaquais a coordonné l'équipe *Astonyshine* en partenariat avec l'Université de Ferrara, le Polytechnique de Bari et l'Ecole des Ponts ParisTech, avec le support des ministères de la culture et de l'environnement et de 18 industriels. Placé en liste d'attente de janvier 2010 à mars 2012, *Astonyshine* a été réalisé en moins de six mois et présenté à Madrid en septembre 2012 en obtenant la 17ème place. Le coût consolidé de l'opération, inférieur à 260 k€ était très inférieur à celui de la plus part des équipes.

Le projet s'est déroulé sur trois semestres, mais l'ENSA Paris-Malaquais n'est intervenue avec deux studios de projet que dans les deux derniers semestres. Après avoir passé leur premier semestre à concevoir un habitat passif, basé sur l'énergie solaire et leur second semestre à dessiner les plans d'exécutions et construire eux même le prototype de la maison nommée *Astonyshine*[307], le groupe de douze étudiants de l'ENSAPM s'est envolé pour Madrid le 30 Aout 2012. Leur objectif était de remonter l'ensemble de la maison en 12 jours, afin de rentrer dans la compétition avec les 19 autres équipes de différents pays du monde.

La seconde moitié du mois de Septembre 2012 a été consacrée aux visites de professionnels et de particuliers. Ces deux semaines furent aussi le temps pour les 9 jurys d'évaluer les performances (architecturale, énergique, durabilité…) des maisons tout en évaluant en permanence leur température, leur humidité, leur qualité de l'air et leur luminosité.

[307] www.astonyshine.com

Projet Astonyshine

Dans cette section, on présente d'abord la stratégie de suivie vis-à-vis des évaluations prévues dans la compétition, on décrit ensuite le projet du point de vue de la distribution des espaces et des fonctions, des matériaux, de la structure et des systèmes constructifs.

Astonyshine vise l'intégration de nouvelles technologies dans l'architecture des maisons alimentées par l'énergie solaire et la définition de nouveaux concepts dans le projet d'architecture qui soit appuyés par ces technologies, avec le but ultime de la proposition de solutions innovantes et de l'augmentation des performances des solutions traditionnelles.

La vision globale de la question énergétique mène à la recherche d'une construction impliquant la moindre anergie grise et donc réalisée avec un maximum de matériaux biosourcés ayant subi un court cycle de transformation et pouvant être recyclés ou réutilisés en l'état. La minimisation de l'énergie grise prime sur celle de la consommation annuelle, dans le limites actuelles du bilan présenté dans ce document sur ces deux facteurs (l'énergie grise est actuellement l'équivalent de 50 ans de consommation).

Six entrées définissent cette stratégie:

- L'emploi de la pierre de taille qui, grâce aux avancées technologiques et aux nouvelles méthodes de projet numérique, promet des avantages du point de vue du comportement énergétique, hygroscopique et thermique, de la durabilité, de l'esthétique et du processus de fabrication et de construction.
- Le recours à des systèmes solaires à concentration, photovoltaïques et thermiques — pour répondre aux besoins énergétiques de la maison avec une plus grande efficacité et des coût inférieurs à ceux qui peuvent être obtenus par des panneaux photovoltaïques standard —, par la proposition de nouvelles idées sur l'insertion morphologique et technologique de ces systèmes en architecture.
- Les systèmes à concentration permettent l'utilisation de cellules photovoltaïques à haute performance sans grandes augmentation des coûts et optimisent la quantité de matière utilisée en réduisant les pressions sur les stocks (par exemple de polysilicone).
- Le contrôle distribué du champ photovoltaïque incorporé dans chaque module et piloté pour extraire le maximum d'énergie. Ce contrôle permet la reconfiguration dudit champ, qui peut se rendre nécessaire par conséquent de facteurs externes qui réduisent au moins partiellement la production d'énergie, dans le but de minimiser le décalage des modules let les pertes dues à l'ombrage de manière plus efficace que par les convertisseurs MPPT centralisés actuellement utilisés.
- La recherche de nouveaux détails, matériaux et technologies pour l'interface entre les modules solaires et la structure du bâtiment, pour l'imperméabilisation, le contrôle de la température, la ventilation, la préfabrication et la réduction du coût.
- La recherche d'un éclairage optimisé, naturel et artificiel, pour satisfaire aux critères de quantité et qualité lumineuse et pour créer des effets spatiaux et lumineux.
- L'intégration du projet d'architecture et de sa structure avec la logistique de projet, pour réduire le coût générale de la production et de la construction en augmentant leur qualité et la durabilité de la filière et en réduisant les risques du travail.

Ces points, qui ont été traité conjointement, ont conduit aux résultats suivants:

- *Astonyshine* était une maison en pierre de taille et bois. Les parois en pierre exploitent une typologie constructive qui a été inventée en France à la fin du XVII^{e} siècle sans jamais avoir été appliqué de manière significative. Les recherches conduites pour *Astonyshine* aux Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau ont permis la réalisation de la première voute en pierre de taille en forme de selle jamais construite, une forme qui a été conçue pour marier les avantages de la structure concave et les besoins de convexité propres de la captation solaire.
- *Astonyshine* intégrait un brevet, le "*SolarFLight*" qui rend la concentration solaire possible en s'intégrant à l'architecture. Comme indiqué au point précédent, la forme de la toiture de *Astonyshine* correspond à cette intégration sur une structure en pierre.
- Les systèmes de contrôle distribué récemment développés par STMicroelectronics (SPV100 et SPV1020) ont été utilisés pour la première fois dans un contexte de logement.
- La structure en pierre était entièrement préfabriquée et transportable. A notre connaissance il s'agit du premier exemple de construction en pierre préfabriquée, avec un temps de pose de la construction de l'ordre de la semaine.

Tous ces résultats dérivent de la volonté d'organisation du projet autours des thèmes de l'économie énergétique, qui se réfléchît sur les choix des matériaux et des technologies constructives, le choix de la méthode de conversion de l'énergie solaire et le choix du système de fabrication.

Au cœur du projet *Astonyshine* se trouve l'idée que l'intégration des nouvelles technologies ne peut pas toujours se faire sans une révision de la forme architecturale et des éléments de l'architecture. Il en suit la volonté de montrer les systèmes qui s'ajoutent à la maison pour en accroître les capacités de conversion d'énergie et en réduire l'empreinte écologique, plus que cacher ou incorporer ces systèmes dans les formes habituelles

Le second souffle de *Astonyshine* est l'idée que l'architecture doit retrouver un langage pour la pierre de taille. L'emploi de ce matériau à reçu une attention renouvelée dans les dernières années. En partant de l'étude du passé, des chercheurs contribuant à *Astonyshine* ont conçu des nouveaux systèmes structurels, basés sur la stéréotomie, pouvant conjuguer efficacement l'aspect esthétique et des qualités environnementales.

La pierre de taille est en effet intéressante pour l'environnement, en particulier si son lieu d'extraction n'est pas loin du lieu de construction (la valeur de 1000 km est souvent indiqué comme limite de rentabilité écologique, mais il faut souligner que la pierre peut se transporter lentement, ce qui peut réduire sensiblement l'empreinte environnementale de la tonne-kilomètre pour ce transport), elle peut être récupérée lors d'une démolition et réemployée ou en tout cas recyclée sans inconvénients; elle génère une pollution de l'eau et de l'air très limitée lors de la construction. La coupe de la pierre ne génère pas de gaz à effet de serre, elle ne comporte aucun risque de toxicité, produit des poussières totalement contrôlées et fait un usage totalement contrôlé de l'eau.

De plus, la pierre est une ressource inépuisable.
La taille de la pierre est aujourd'hui une industrie technologique, basé sur la conception et la fabrication assistées par l'ordinateur, qui produit peu de pertes de matière et se sert efficacement de l'énergie. La pénétration des structures en pierre de taille dans le marché de l'immobilier est néanmoins aujourd'hui très limitée, à cause du manque de solutions techniques capables de répondre à la liberté de forme propre de l'architecture d'aujourd'hui et du coût des opérations de chantier liées traditionnellement à ce matériau.

Le problème fondamental quand on aborde la question de la recherche d'une forme architecturale cohérente avec la captation solaire par concentration et la construction en pierre de taille se trouve au centre de l'architecture: quelle forme donner au toit sachant que la concentration de la radiation solaire requiert des formes convexes alors que la descente des charges par stéréotomie requiert des formes concaves?

La réponse de *Astonyshine* est totalement nouvelle. Une voûte en selle en pierre de taille capable de porter des charges par sa courbure et, en même temps, donnant un support optimal pour suivre la course du soleil. La surface réglée ainsi obtenue porte les éléments « *SolarFLight* » brevetés par l'Université de Ferrara.

La voute a été projeté en adaptant un brevet de l'académie des sciences du XVII^{e} siècle pour créer des composantes préfabriqués mobiles qui peuvent être mis en place sans l'aide de faux œuvres. Il s'agira de la première voûte en selle jamais construite en pierre de taille. Le volume couvert par une forme si complexe devait être le plus simple possible. Par conséquent le plan carré a été choisi et la maison a été projeté pour révéler la forme ainsi résultante d'un prisme idéal coupé supérieurement par la surface en selle. La pierre est traitée sur les façades pour donner une impression générale de pure géométrie et le rendu d'un solide primordial mais non primitif, alors que la selle est la seule surface extérieure non en pierre.

Le bâtiment s'inscrit dans un prisme de 10 m x 10 m x 6 m, restant au centre de la parcelle de 20 m x 20 m accordée par le concours. L'empreinte architecturale totale de 100 m^2 permit de générer un espace habitable de 100 m^2 dont 70 m^2 au rez-de-chaussée.

La forme de l'intrados de la toiture reproduit celle de l'extrados, avec un système structurel qui minimise le plus que possible les apports pouvant déranger la pureté de la forme et l'appareillage de la pierre créant un dessin qui, évoquant celui d'une œuvre de vannerie, suggère une sensation de légèreté.

Le volume intérieur est partagé dans une zone principale de séjour et une bande contenant les chambres et les services. Le séjour à double hauteur, situé du coté sud du bâtiment et communiquant vers le jardin par une grande baie vitrée sur la façade sud, embrasse toute la voûte d'une seule vue. Les autres locaux se trouvent dans une bande à double hauteur située dans la partie nord. On y trouve, au rez-de-chaussée, la cuisine, la salle de bain, une chambre et le local technique, à l'étage deux chambres non clôturées.

Le projet de la structure se base sur deux points forts typiques de la conception moderne des structures en pierre: avoir une descente des charges avec poussée minimale et reprendre cette poussé avec des éléments appropriés et créer un système globalement cohérent pour la reprise des actions horizontales, spécialement en zone sismique.

En même temps les solutions envisagées ont été conçues pour réduire le besoin de faux œuvres et pour permettre la préfabrication et le transport de pièces de grande dimension. Les connaissances utilisées ont été acquises au cours des dernières années grâce aux recherches menées dans le laboratoire *GSA Géométrie Structure Architecture* de l'ENSAPM.

La préfabrication, le transport et le levage des éléments en pierre de taille de la construction ont été les préoccupations principales pendant le projet. *Astonyshine* part de l'idée que ces opérations sont essentielles pour la pénétration de la pierre de taille dans le monde de l'architecture contemporaine et c'est pour atteindre cet objectif que le groupe *Fagioli*, leader mondial dans la logistique de projet, a été invité à participer au partenariat. Le résultat de cette collaboration est une construction modulaire, transportable par éléments de dimension maximale de sorte à réduire les temps d'assemblage en chantier et maximiser les opérations de préfabrication et préparation en usine.

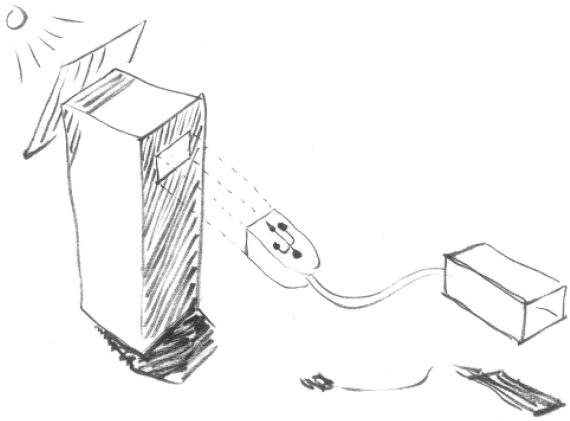
La pierre de taille a plusieurs propriétés positives pour la construction. La première est la ventilation naturelle générée par sa perméabilité (supérieure de deux ordres de grandeurs de celle du béton), qui évite les risques qui dérivent de l'étanchéité des enveloppes.

La seconde propriété est sa bonne qualité en climat chaud: l'inertie thermique apportée par la masse de la pierre permet au bâtiment d'exploiter le décalage des températures internes par rapport aux externes, ce qui est intéressant où des fluctuations thermiques se produisent quotidiennement (nuit fraiches et journées chaudes). De plus la pierre permet de régulariser l'humidité de l'air et réduit la température ressentie avec un effet de parois froide utile en été et facilement contrôlable en hiver (par superposition de tapisseries).

Le troisième effet positif qui peut être obtenu par l'emploi massif de la pierre est la réduction de l'effet de montagne solaire. Par rapport à d'autres matériaux de revêtement la pierre a une couleur plus stable et souvent claire, ce qui permet de réduire l'albédo (maximisé par exemple par une surface asphaltée) et réduire par conséquent l'effet incontrôlé de remontée thermique en proximité des villes qu'on appelle montagne solaire.

Le besoin global de chauffage calculé, compte tenu des apports internes est de 2,4 kWh/m², celui de climatisation de 1,0 kWh/m². Sur un an ces besoins sont respectivement de 4,0 kWh/m²/an et 0 ?5 kWh/m²/an. Les besoins électroménagers et d'éclairage ajoutent une consommation électrique de 2300 kWh/an en moyenne. Le besoin électrique pour l'eau chaude produite par chauffe-eau solaire s'élève varie entre 0 et 200 kWh/an en fonction du nombre de capteur placés.
A partir de ces considérations le besoin estimé de surface CPVT est de 20 m².

Projet « LivLib »



En 2013 l'Université Paris-Est a été admise à participer au concours Solar Decathlon Europe 2014, dont la phase finale se tiendra en juin à Versailles, avec un groupe d'écoles de l'Université contenant l'ENSAPM. L'équipe [Re][For][Me] se trouve ainsi à nouveau active dans cette compétition.

En 2014 la compétition a été orientée vers la question urbaine, un thème très important pour la ville de Paris que nous représentons. L'idée du projet, qui s'appelle « *LivLib* » se base sur celle *d'Infrastructures Solaires Urbaines* : si la densification de la ville de Paris soumet les futurs propriétaires à un prix du sol plus important que en banlieue et la demande d'une économie verte impose des niveaux d'investissement plus élevées, c'est la création *d'Infrastructures Solaires Urbaines* (les ISU) qui peut fournir la solution en mitigeant le prix à payer pour habiter durablement en ville.

« *LivLib* » propose la réalisation d'un système de « *hubs* », c'est à dire des ISU capables de collecter et gérer l'énergie, de traiter l'eau et les déchets, de créer les connexions locales au réseaux urbains. Chaque « *hub* » contiendra un certain nombre de ports, dans lesquels viendrons s'attacher (« *to plug* ») des capsules contenant des appartements ou d'autres activités (télétravail, studio, crèche, etc.). Les « *hubs* » seront le reflet de la ville et de sa politique urbaine, les « *capsules* » seront le résultat du libre marché de l'habitation. Tout échange d'énergie et de matière étant canalisé par le couple « *port* » et « *plug* », la responsabilité individuelle pourra être valorisée.

D'un autre coté les capsules pourront se détacher d'un « *hub* » pour s'attacher dans un autre, afin de réduire les transports et permettre aux propriétaires de garder leur habitation toute la vie. Grace à leur construction et assemblage modulaire, les capsules pourront s'associer pour créer des espaces de vie de la taille voulue.
Le projet est actuellement au début de la phase d'exécution. Il présente une réelle innovation sur le plan du rapport entre la ville et les individus et pour une gestion durable des énergies et des masses dans la ville.

Annexes

Elles comprennent :
Des compléments sur les *Représentations*
Des compléments sur la *Formalisation*
Des compléments sur les *Métamorphoses*

Compléments pour les Représentations

Extrait d'état de l'art des représentations

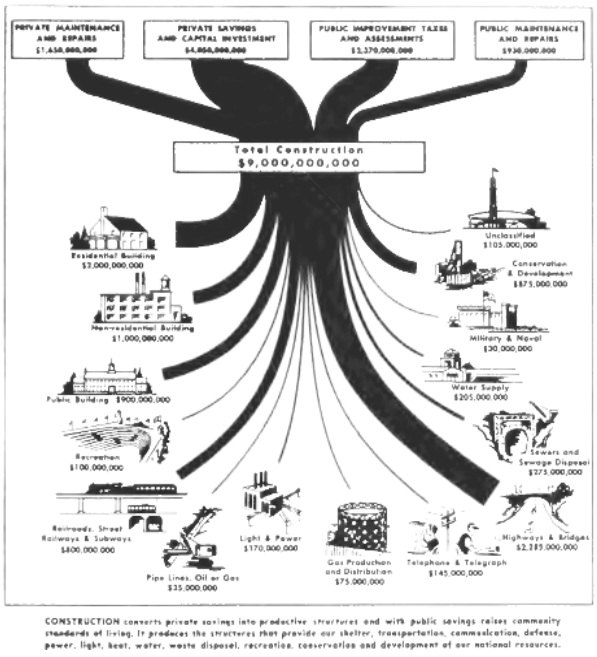
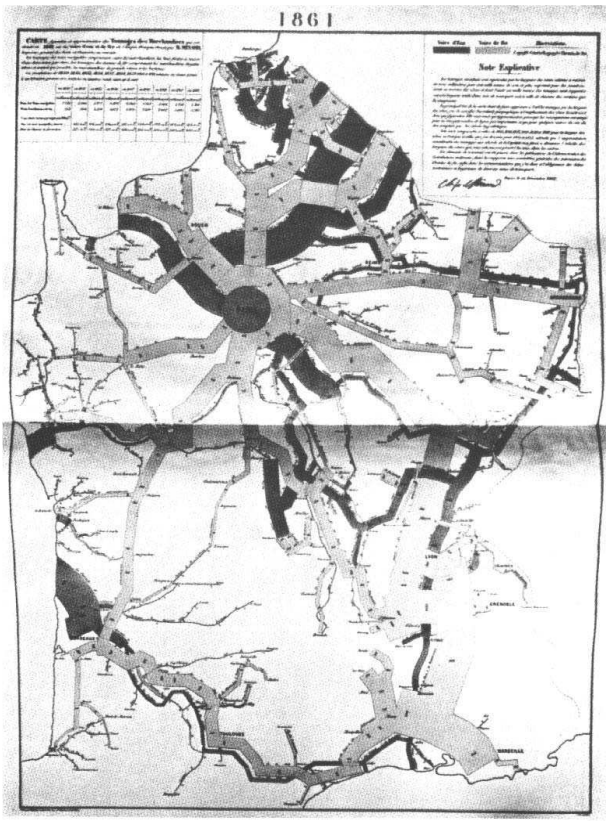
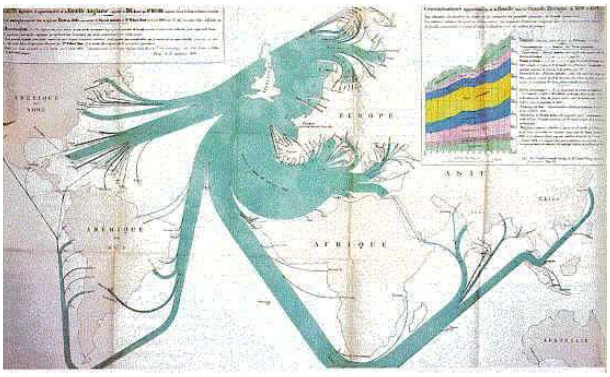


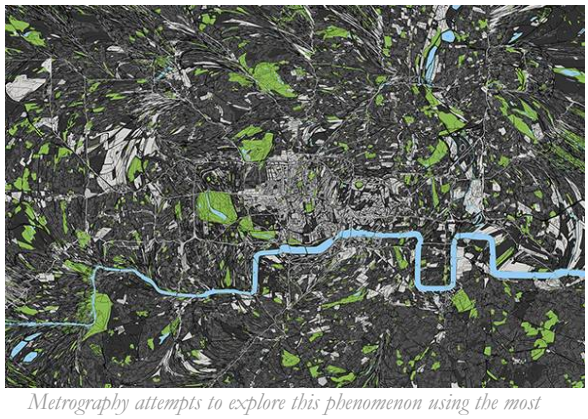
Diagramme de flux et loi de conservation Flow Map Layout, Doantam Phan, Ling Xiao, Ron Yeh, Pat Hanrahan, and Terry Winograd, Stanford University.



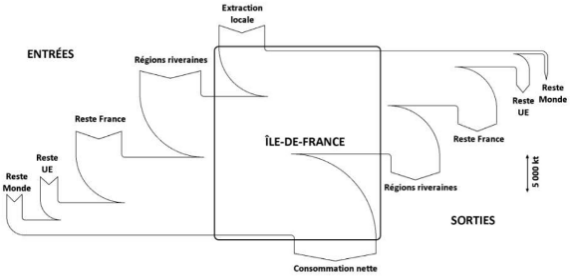
Carte figurative et approximative de l'étendue des marchés de houilles et de cokes étrangers dans l'empire français autours de 1858 (Minard, C.J.)



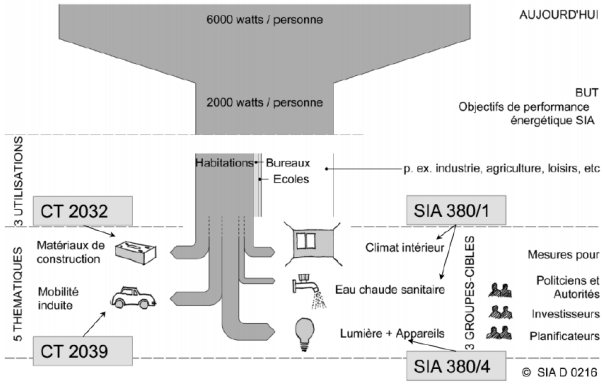
Carte figurative et approximative de la houille anglaise exportée en 1860 (Minard, C.J.)



Metrography attempts to explore this phenomenon using the most famous of transit maps: the London Tube Map. (The representation distorts actual geography according to the grid of the Tube Map.)
http://looksgood.de/log/downloads/metrography_map/index.html



Flux de produits agricoles et alimentaires en Ile-de-France, 2003 (d'après S.Barles)



Cahier technique SIA 2040, Société à 2000 Watt

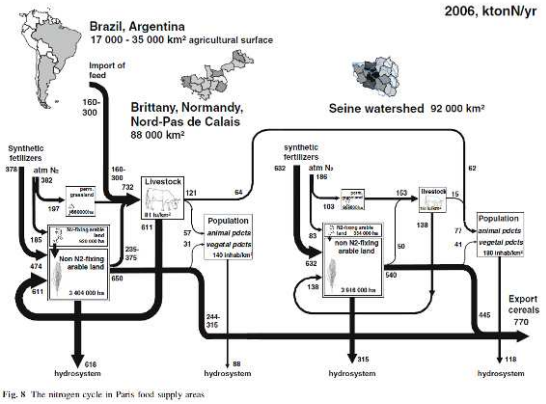
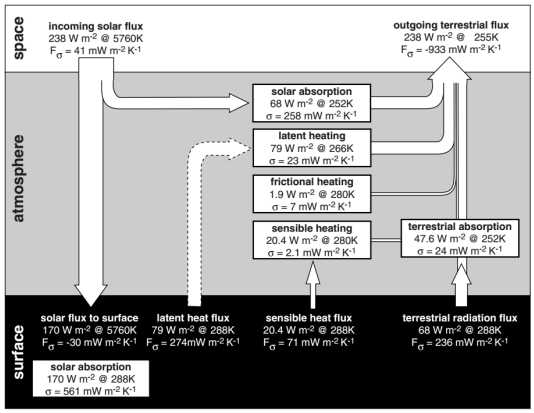


Fig. 8 The nitrogen cycle in Paris food supply areas

Le cycle de l'azote dans les zones d'approvisionnement alimentaire de Paris, 2011 (d'après G.Billen)



Global budget of entropy production by diabatic Earth system processes. Based on Peixoto et al. (1991). Note that the latent heat flux has been corrected from Peixoto et al.'s estimate, ibid

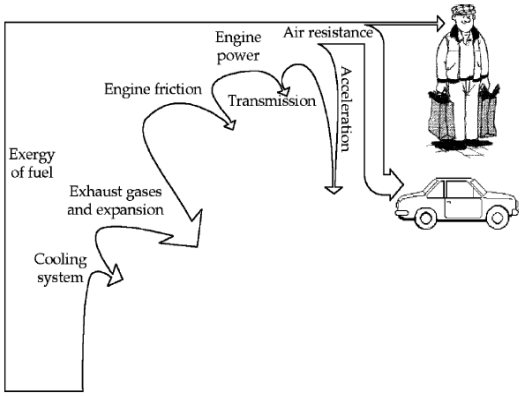
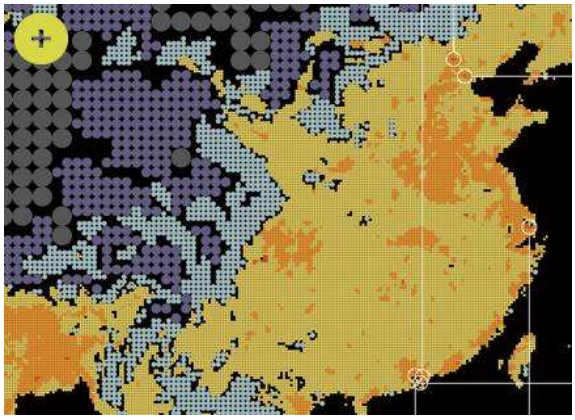


Diagramme représentant les transformations successives du flux d'exergie pour une voiture (Mei Gong et Göran Wall[308])

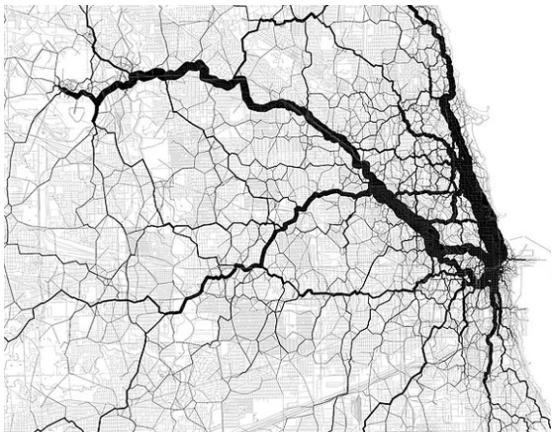
This representation reveals energy consumption through color codes that depict each singular area situation, with the mouse over you get further information on the singular "pixel". http://modi.mech.columbia.edu/nycenergy

[308] *On exergy and sustainable development—Part 2: Indicators and methods, Exergy Int. J. 1(4) (2001) 217–233*



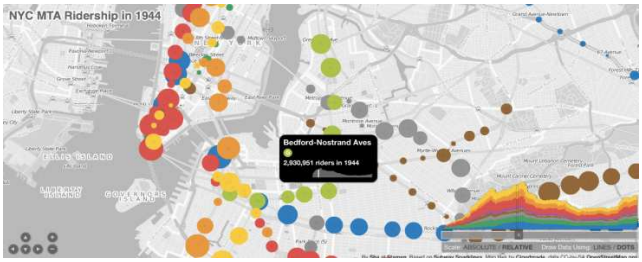
This visualization maps population density using circles of various size and hue. Larger, darker circles show areas with fewer people, while smaller, brighter circles highlight crowded cities. Representing denser areas with smaller circles results in additional geographic detail where there are more people, while sparsely populated areas are more vaguely defined. http://fathom.info/dencity/

A multi-layer dynamic and interactive visualization that reveals connections between researchers: the main part is not geo-localized, it returns the dimension and the relationships between the network (number of lines, dimension of circular elements); on the right while the exploration change the interface reveals geographical informations and statistics as well. http://max-planck-research-networks.net/



Visual model: defining dimension of cells and thickness of lines depending on numbers of contributions and distance between contributions. http://www.fastcodesign.com/1665884/infographic-of-the-day-could-twitter-help-us-create-smarter-transit-routes

An interactive visualization that allows users to select an area of interest, start a specific query on carbon consumption and get information on related climate change scenarios. http://viz-carbontool.appspot.com/



A visual exploration through time and space that depict the number of users of the different underground lines (color code) of New York. Map based navigation with a time slider, visualization could be switched from a dot-map to a line-map; informations on singular points are provided (mouseover) possibility to switch from absolute to relative data visualization http://diametunim.com/shashi/nyc_subways/

Static visualization that reveals movement of people between different districts of the city of Geneva, with entrance and exit fluxes enlightened, and with a time-trend provided as well. http://villevivante.ch

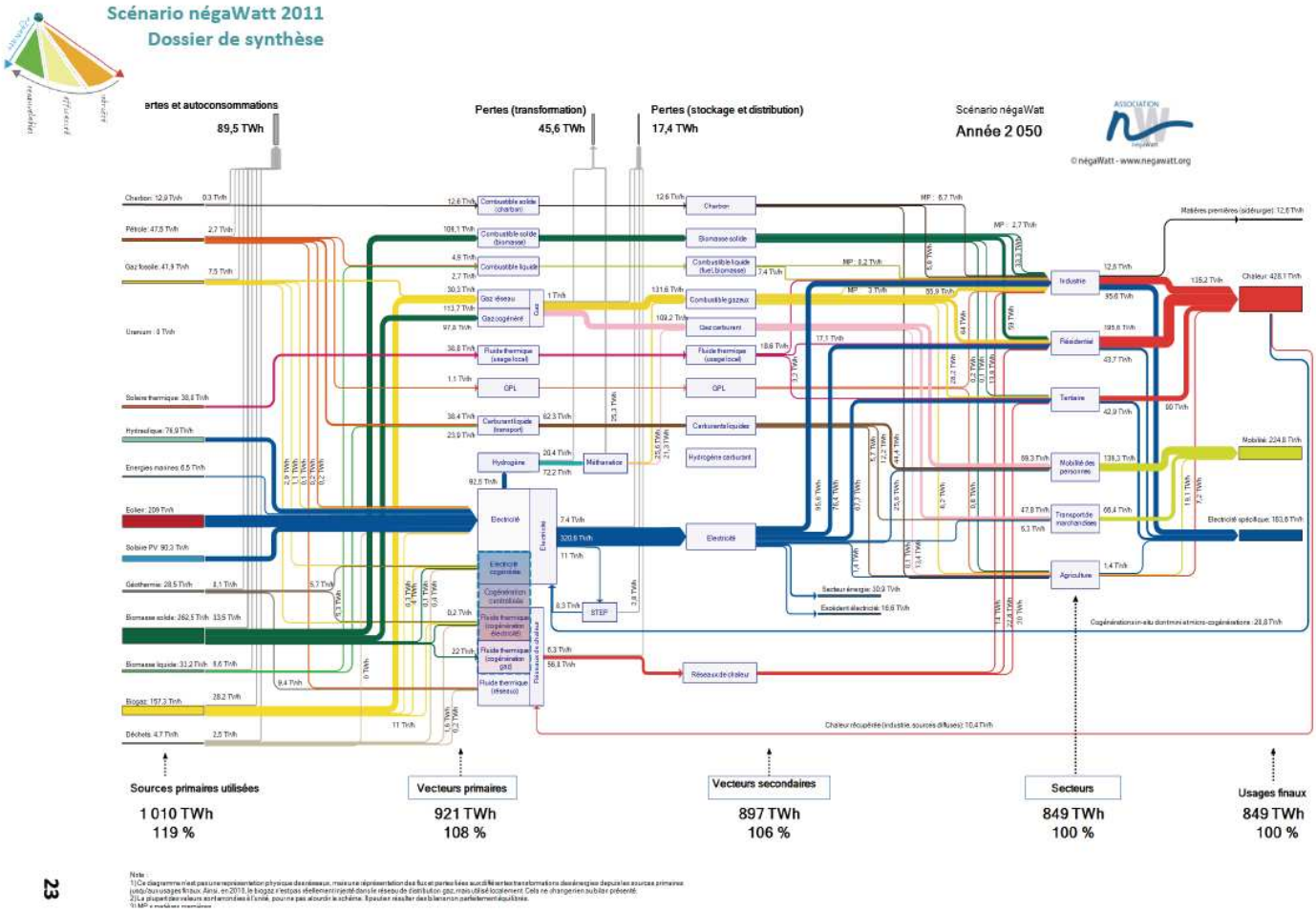


Diagramme de Sankey présentant le raccordement entre demande (à droite) et offre (à gauche) et une faible partie de ponction sur les stocks (à gauche). Source : négaWatt, 2011

Structure de données pour l'outil Reforme

Fiche typique entre trois partitions spatiales

FICHE D'INTERACTION ENTRE 3 PARTITIONS

|P> Données démographiques

Population

Données amont

			1750	1850	1950	2000	2050
pA	Paris		x	x	x	x	x
pB	France		x	x	x	x	x
pC	Monde		x	x	x	x	x

Composantes

p1	Paris	= pA
p2	France moins Paris	= pB-pA
p3	Monde moins France	= pC-pB

|C> Vecteur-consommation

Données amont

			1750	1850	1950	2000	2050
cA	Paris		x	x	x	x	x
cB	France		x	x	x	x	x
cC	Monde		x	x	x	x	x

Composantes

c1	Paris	= cA
c2	France moins Paris	= cB-cA
c3	Monde moins France	= cC-cB

|M| Matrice richesse-échange

Richesse

Données amont

			1750	1850	1950	2000	2050
mA	Paris		x	x	x	x	x
mB	France		x	x	x	x	x
mC	Monde		x	x	x	x	x

Termes diagonaux

m1	Paris	= mA
m2	France moins Paris	= mB-mA
m3	Monde moins France	= mC-mB

Echanges

m12		x	x	x	x	x
m13		x	x	x	x	x
m21		x	x	x	x	x
m23		x	x	x	x	x
m31		x	x	x	x	x
m32		x	x	x	x	x

|S> Vecteur ciel

Données amont

			1750	1850	1950	2000	2050
sA	Paris		x	x	x	x	x
sB	France		x	x	x	x	x
sC	Monde		x	x	x	x	x

Composantes

s1	Paris	= sA
s2	France moins Paris	= sB-sA
s3	Monde moins France	= sC-sB

|G> Vecteur sous-sol

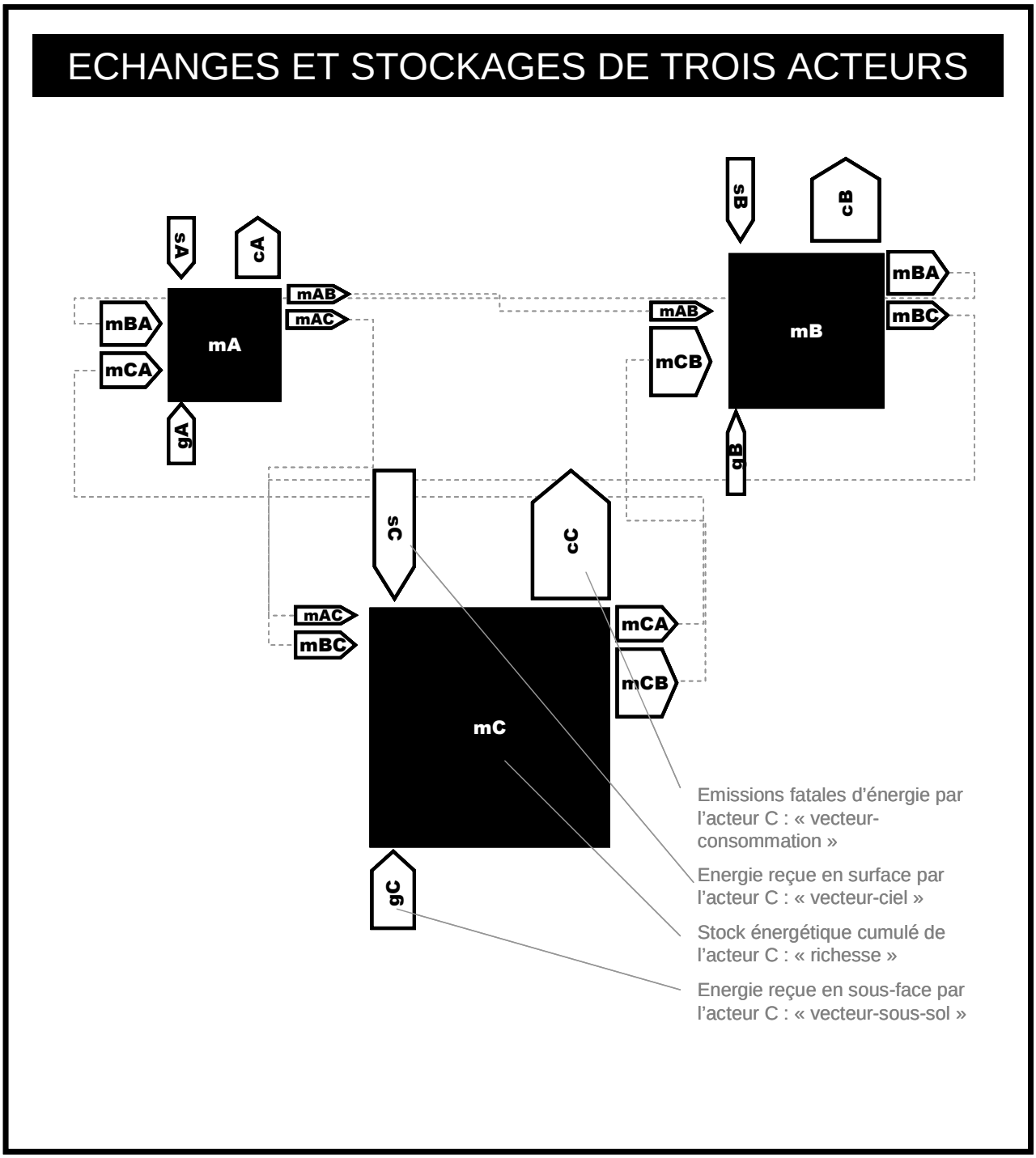
Données amont

			1750	1850	1950	2000	2050
gA	Paris		x	x	x	x	x
gB	France		x	x	x	x	x
gg	Monde		x	x	x	x	x

Composantes

g1	Paris	= gA
g2	France moins Paris	= gB-gA
g3	Monde moins France	= gC-gB

Exemple d'interactions entre trois acteurs



Compléments pour la Formalisation

Espace vectoriel de l'énergie

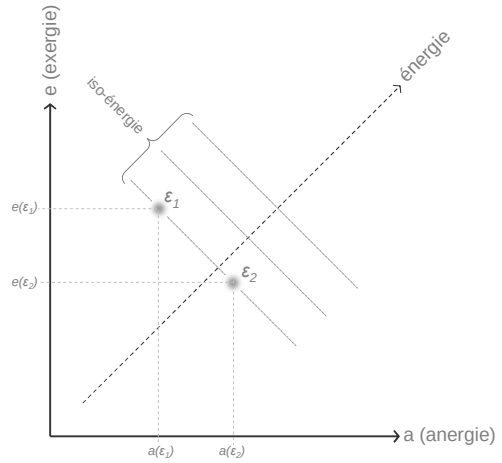
Le pseudo-espace vectoriel E

Définition

Nous définissons un pseudo-espace vectoriel[309] doté de l'addition sur l'espace bidimensionnel des nombres réels positifs. Nous prenons comme axiome que énergie, anergie et exergie sont positives ou nulles.

Nous noterons *E,* cet espace de décomposition de la donnée énergétique.

$$E = R^+ \times R^+$$



La norme d'une donnée énergétique se lit en projection sur la courbe d'équation[310] y=x. Les points ε_1 et ε_2 possèdent la même quantité d'énergie. Toutefois la qualité exergique de ε_1 est supérieure à celle de ε_2. (ReForMe)

Opérations sur E

Loi d'addition

On retient la définition suivante :

$$E \times E \rightarrow E$$
$$(\underline{\varepsilon}, \underline{\varepsilon'}) \mapsto \underline{\varepsilon} + \underline{\varepsilon'} = (a, e) + (a', e') = (a + a', e + e')$$
$$(\underline{\varepsilon}, \underline{\varepsilon'}) \mapsto \underline{\varepsilon} + \underline{\varepsilon'} = (a, e) + (a', e') = (a + a', e + e')$$

Notons que cet espace doté de l'addition n'a pas de structure de groupe puisque chaque vecteur n'a pas d'opposé par construction.

Loi produit avec un scalaire

Dans le cas d'une multiplication par un scalaire positif, la loi produit est alors définie de la façon suivante :

$$R^+ \times E \rightarrow E$$
$$(\lambda, \underline{\varepsilon}) \mapsto \lambda \cdot \underline{\varepsilon} = \lambda \cdot (a, e) = (a, e) \cdot \lambda = (\lambda a, \lambda e)$$

Loi produit

On associe la multiplication dans *E* au sens du produit scalaire usuel :

$$E \times E \rightarrow R^+$$
$$(\underline{\varepsilon}, \underline{\varepsilon'}) \mapsto \underline{\varepsilon} \cdot \underline{\varepsilon'} = (a, e) \cdot (a', e') = aa' + ee'$$

Notons que ce produit est commutatif et sera nul si et seulement si un vecteur est de l'anergie pure, tandis que le second est de l'exergie pure[311].

[309] Dans le sens où l'opposé d'un vecteur n'a pas d'existence au sein de E.

[310] Nota : l'échelle de graduation sera alors différente et devra être multipliée par la racine de 2.

[311] Ou sinon enfin au moins l'un des deux vecteurs est nul.

Métrique sur E

Norme sur l'espace E

Nous dotons E d'une norme E définie de la façon suivante :

$$E \rightarrow R^{+}$$
$$\underline{\varepsilon} \mapsto E(\underline{\varepsilon}) = E[(a,e)] = a + e$$

Cette norme permet d'évaluer la quantité d'énergie d'un vecteur-énergie donné.

Nous vérifions aisément que E possède bien l'ensemble des propriétés d'une norme :

$$E(\underline{\varepsilon}) = E[(a,e)] = a + e = 0$$
$$\Rightarrow a = e = 0 \Rightarrow \underline{\varepsilon} = 0$$

Notons aussi que :

$$\forall \lambda \geq 0, E(\lambda \cdot \underline{\varepsilon}) = \lambda E(\underline{\varepsilon})$$

Enfin, nous retrouvons bien l'inégalité triangulaire (qui est dans cette définition une égalité par construction)

Quelques propriétés particulières

Notons que :

$$\sqrt{\underline{\varepsilon} \cdot \underline{\varepsilon}} = \sqrt{a^2 + e^2} \leq E(\underline{\varepsilon})$$
$$\sqrt{\underline{\varepsilon} \cdot \underline{\varepsilon}} = \sqrt{a^2 + e^2} \leq E(\underline{\varepsilon})$$

Cela correspond au fait que la distance de Manhattan[312] est plus grande que la norme euclidienne traditionnelle.

Notons aussi que la quantité :

$$\frac{\underline{\varepsilon} \cdot \underline{\varepsilon}'}{E(\underline{\varepsilon})E(\underline{\varepsilon}')}$$

sera d'autant plus petite que les *qualités énergétiques* des deux vecteurs seront différentes.

[312] Voir en annexe

Projections anergique et exergique

Définition

A l'instar du corps des nombres complexes où les formes linéaires *Re*[313] et *Im*[314] permettent la projection des composantes, nous définissons ci-après les analogons sur E.

On définira les applications a et e de la façon suivante qui opèrent :

$$E \rightarrow R^{+}$$
$$\underline{\varepsilon} \mapsto a(\underline{\varepsilon}) = (a,e) \cdot (1,0) = a$$
$$\underline{\varepsilon} \mapsto e(\underline{\varepsilon}) = (a,e) \cdot (0,1) = e$$

Propriétés des projections

On notera que ces deux applications sont linéaires à l'instar d'un produit scalaire. On notera aussi les propriétés suivantes :

$$a(\underline{\varepsilon}) \leq E(\underline{\varepsilon})$$
$$e(\underline{\varepsilon}) \leq E(\underline{\varepsilon})$$

Notons également que :

$$E(\underline{\varepsilon}) = (a,e) \cdot (1,1) = a + e$$

[313] Re(ζ) = partie réelle du nombre complexe ζ
[314] Im(ζ) = partie imaginaire du nombre complexe ζ

Premiers exemples

La chaleur dans E

A titre d'exemple, pour une quantité de chaleur Q de température T échangeant avec un milieu de température T_0, nous aurons alors :

$$\underline{\varepsilon} = Q \cdot \left(\frac{T_0}{T}, 1 - \frac{T_0}{T} \right) \underline{\varepsilon} = Q \cdot \left(\frac{T_0}{T}, 1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

Nous vérifions bien que :

$$E(\underline{\varepsilon}) = Q \frac{T_0}{T} + Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = Q$$

$$E(\underline{\varepsilon}) = Q \frac{T_0}{T} + Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = Q$$

La composante exergique correspond au rendement maximum d'un cycle de Carnot.

Energie solaire

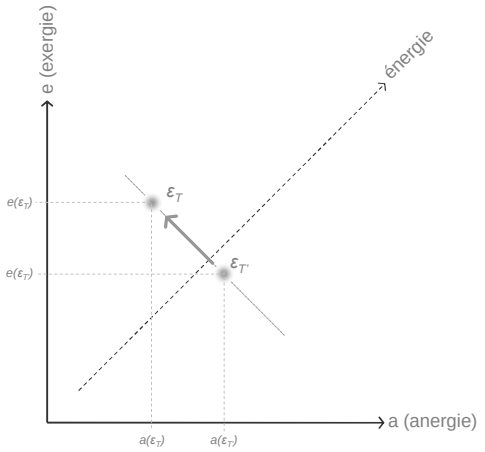
Pour l'énergie solaire frappant la surface terrestre[315] :

$$\underline{\varepsilon}_{soleil} \cong E(\underline{\varepsilon}_{soleil}) \cdot \left(\frac{3}{100}, \frac{97}{100} \right)$$

Electricité

Pour l'électricité, le vecteur s'exprime de la façon suivante :

$$\underline{\varepsilon}_{elec} \cong E(\underline{\varepsilon}_{elec}) \cdot (0,1)$$



Pour une même quantité de chaleur, si la température augmente, le point d'énergie se déplace le long d'une iso-énergie en augmentant progressivement le contenu exergique.

Opérateurs sur E

Opérateurs linéaires d'évolution

Soit l'opérateur linéaire *f* agissant de E dans E.

$$f : \underline{\varepsilon} \mapsto \underline{\varepsilon'} = f(\underline{\varepsilon})$$

Si *f* est un opérateur d'évolution de la donnée énergétique, cela suppose de préserver sa norme –respect de la conservation d'énergie- ainsi qu'une dégradation de sa valeur exergique.

Traduit dans notre formalisme, ceci entraîne les égalités et inégalités suivantes :

$$E[f(\underline{\varepsilon})] = E[\underline{\varepsilon}]$$

$$e[f(\underline{\varepsilon})] \leq e[\underline{\varepsilon}]$$

Groupe matriciel des opérateurs sur E

On vérifie le respect de la composition entre deux applications *f* et *g*.

$$E[f \circ g(\underline{\varepsilon})] = E[g(\underline{\varepsilon})] = E[\underline{\varepsilon}]$$

$$e[f \circ g(\underline{\varepsilon})] \leq e[g(\underline{\varepsilon})] \leq e[\underline{\varepsilon}]$$

Par contre l'addition n'est pas préservée.

[315] Référence à rappeler

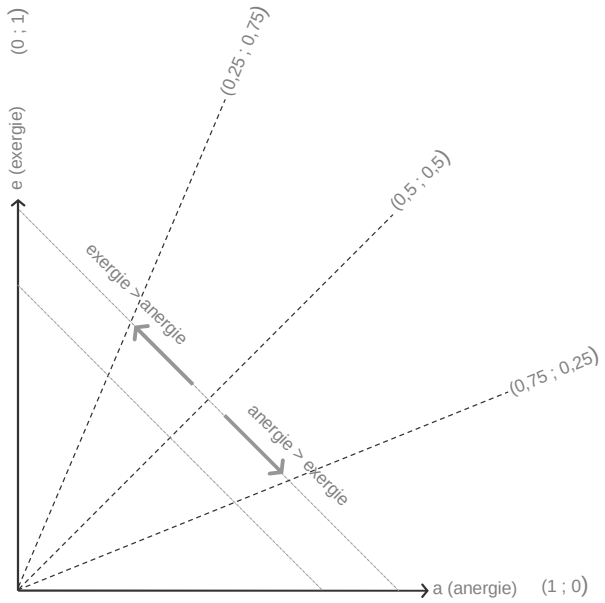
Thermodynamique dans l'espace E

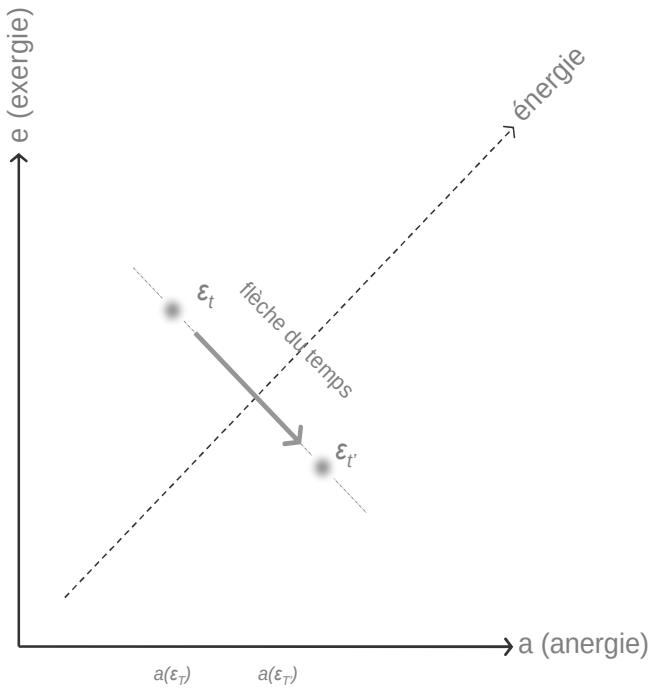
Premier principe

Le premier principe préserve la norme.

Deuxième principe

Le deuxième principe opère un transfert de l'exergie vers l'anergie au cours du temps.





Les radiales de proportion relative entre exergie et anergie. Le premier principe suppose de se déplacer sur une droite iso-énergie tandis que la flèche du temps suppose un déplacement descendant.

Algèbre de la géonergie

L'espace T

Notation « bra-khet »

La notation *bra-ket* a été introduite par Paul Dirac pour faciliter l'écriture des équations de la mécanique quantique, mais aussi pour souligner l'aspect vectoriel de l'objet représentant un état quantique.

Le nom provient d'un jeu de mots avec le terme anglais *bracket* qui signifie « crochet de parenthèse », en l'occurrence « » et « » respectivement appelés « *bra* » et « *ket* » (un peu à l'image de bâbord et de tribord). Cette notation est depuis reprise dans l'étude mathématique de l'algèbre des opérateurs, dont le champ d'application est plus large.

Vecteur en notation « ket »

Au sein d'une partition de *n* agents, nous représenterons un état du système par ces différentes composantes par agent. Un état $\underline{U}$ du système sera donc décrit de la façon suivante :

$$\left|\underline{U}\right\rangle = \begin{bmatrix} \underline{u}_1 \\ \dots \\ \underline{u}_k \\ \dots \\ \underline{u}_n \end{bmatrix} == \begin{bmatrix} \left(a(\underline{u}_1), e(\underline{u}_1)\right) \\ \dots \\ \left(a(\underline{u}_k), e(\underline{u}_k)\right) \\ \dots \\ \left(a(\underline{u}_n), e(\underline{u}_n)\right) \end{bmatrix}$$

Sauf mention contraire, les composantes seront des données de l'espace *E* et dont la norme sera homogène à une quantité d'énergie ou à un flux surfacique d'énergie à un flux surfacique de puissance.

Par extension, des vecteurs pourront aussi posséder des composantes dans *R*. Ce sera notamment le cas pour la base de la partition. Dans ce cas-là, les composantes du vecteur ne seront pas soulignées.

On en déduit que la quantité de scalaires contenue dans un vecteur d'état du système comprendra dès lors 2*n* paramètres.

Vecteur en notation « bra »

De façon transposée, le même état pourra également être décrit de la façon suivante :

$$\langle \underline{U} | = [\underline{u}_1 \quad \dots \quad \underline{u}_k \quad \dots \quad \underline{u}_n]$$

Multiplication par un scalaire

Rappelons la loi produit qui opère dans E :

$$R^+ \times E \rightarrow E$$
$$(\lambda, \underline{\varepsilon}) \mapsto \lambda \cdot \underline{\varepsilon} = \lambda \cdot (a, e) = (a, e) \cdot \lambda = (\lambda a, \lambda e)$$

Nous généralisons cette propriété de la façon suivante :

$$R^+ \times E^n \rightarrow E^n$$
$$\left(\lambda, |\underline{U}\rangle\right) \mapsto \lambda \cdot |\underline{U}\rangle = |\underline{\lambda U}\rangle = \begin{bmatrix} \lambda \cdot \underline{u}_1 \\ \dots \\ \lambda \cdot \underline{u}_k \\ \dots \\ \lambda \cdot \underline{u}_n \end{bmatrix}$$

Produit scalaire et norme d'un vecteur

Le produit scalaire entre deux états U et V de la partition correspondra alors à :

$$E^n \times E^n \rightarrow R^+$$
$$(\underline{U}, \underline{V}) \mapsto \langle \underline{U} | \underline{V} \rangle = \langle \underline{V} | \underline{U} \rangle = \sum_{k=1}^{n} \underline{u}_k \cdot \underline{v}_k$$

Avec :

$$\underline{u}_k \cdot \underline{v}_k = a(\underline{u}_k) a(\underline{v}_k) + e(\underline{u}_k) e(\underline{v}_k)$$

Notons aussi que le produit scalaire définit aussi par extension une forme linéaire pouvant opérer dans E, étant donné la loi proposée pour une multiplication par un scalaire :

$$E^n \times R^n \rightarrow E$$
$$(\underline{U}, X) \mapsto \langle \underline{U} | X \rangle = \langle X | \underline{U} \rangle = \sum_{k=1}^{n} \underline{u}_k \cdot x_k$$

Nous définissons une norme de la façon suivante :

$$E(\underline{U}) = \sum_{k=1}^{n} E(\underline{u}_k)$$

Elle mesure la somme des énergies des sous-parties de la partition : elle coïncide bien avec la définition de l'énergie en tant que variables extensives. Comme dans l'espace E, nous pouvons aussi déduire que :

$$\sqrt{\langle \underline{U} | \underline{U} \rangle} \leq E(\underline{U})$$

Projection de l'état complet

Par convention, on associera le vecteur permettant la projection du système sur l'agent *k* à l'état du système possédant les composantes suivantes :

$$|k\rangle : \quad \begin{cases} u_k = 1 \\ u_l = 0, \forall l \neq k \end{cases}$$

Notons dans ce cas que :

$$\langle k|\underline{U}\rangle = \underline{u}_k \in E \ \langle k|\underline{U}\rangle = \underline{u}_k \in E$$

Projection de l'état anergique

Nous définissons le vecteur suivant qui permet de décrire l'état anergique de l'agent *k* :

$$|\underline{k}_a\rangle : \quad \underline{u}_k = (1,0) \ \underline{u}_k = (1,0) \quad \begin{cases} \underline{u}_l = (0,0), \forall l \neq k \end{cases}$$
$$\underline{u}_l = (0,0), \forall l \neq k$$

Notons que :

$$\langle \underline{k}_a|\underline{U}\rangle = a\left[\langle k|\underline{U}\rangle\right] = a(\underline{u}_k) \in R^+$$

Projection de l'état exergique

Nous définissons le vecteur suivant qui permet de décrire l'état exergique de l'agent *k* :

$$|\underline{k}_e\rangle : \quad \underline{u}_k = (0,1) \ \underline{u}_k = (0,1) \quad \begin{cases} \underline{u}_l = (0,0), \forall l \neq k \end{cases}$$
$$\underline{u}_l = (0,0), \forall l \neq k$$

Notons que :

$$\langle \underline{k}_e|\underline{U}\rangle = e\left[\langle k|\underline{U}\rangle\right] = e(\underline{u}_k) \in R^+$$

Projection de l'état énergétique

Enfin, pour connaître la quantité d'énergie détenue sur la composante *k*, nous définissons le vecteur suivant :

$$|\underline{k}_{a+e}\rangle : \ \underline{u}_k = (1,1) \ \underline{u}_k = (1,1) \quad \begin{cases} \underline{u}_l = (0,0), \forall l \neq k \end{cases}$$
$$\underline{u}_l = (0,0), \forall l \neq k$$

Nous en déduisons aussi que :

$$\langle \underline{k}_{a+e}|\underline{U}\rangle \in R^+$$

Notons enfin que :

$$|\underline{k}_{a+e}\rangle = |\underline{k}_a\rangle + |\underline{k}_e\rangle$$
$$\langle \underline{k}_{a+e}|\underline{U}\rangle = E(\underline{u}_k)$$

Projections globales

Par convention, on associera le vecteur permettant la projection du système sur l'ensemble des composantes de la partition :

$$|1\rangle = \sum_k |k\rangle$$
$$|\underline{1}_a\rangle = \sum_k |\underline{k}_a\rangle$$
$$|\underline{1}_e\rangle = \sum_k |\underline{k}_e\rangle$$
$$|\underline{1}_{a+e}\rangle = \sum_k |\underline{k}_{a+e}\rangle$$

Description du système

Le vecteur « soleil »

Sur l'intervalle de temps T, définissons le vecteur $\underline{S}$[316], représentant la valorisation énergétique issue du soleil, au-dessus de l'aire A_k étudiée. Pour mémoire, il correspond principalement à la valorisation des gisements solaires, éoliens, hydrauliques et marins[317] :

$$\left|\underline{S}\right\rangle = \begin{bmatrix} \underline{s}_1 \\ \dots \\ \underline{s}_k \\ \dots \\ \underline{s}_n \end{bmatrix}$$

Nous tirons des règles précédentes, l'identité suivante :

$$\left\langle k \middle| \underline{S} \right\rangle = \underline{s_k} = (a(\underline{s}_k); e(\underline{s}_k)) \; \left\langle k \middle| \underline{S} \right\rangle = \underline{s_k} = (a(\underline{s}_k); e(\underline{s}_k))$$

Nous noterons également le gisement incident issu du soleil :

$$\left|\underline{S}^0\right\rangle = \begin{bmatrix} \underline{s}^0{}_1 \\ \dots \\ \underline{s}^0{}_k \\ \dots \\ \underline{s}^0{}_n \end{bmatrix}$$

Nota sur l'évaluation de S^0

La constante extrasolaire est de 1360 W/m². Rapportée à la surface du globe, nous en déduisons le flux équivalent suivant 340 W/m² : il correspond au flux frappant les couches supérieures de l'atmosphère.

Notre hypothèse de définition de la partition spatiale est effectuée à l'altitude du sol naturel (plus bâti). Dans ce cas de figure, le flux moyen sur la surface du globe est alors de 169 W/m².

En première approche, nous considérons l'égalité suivante (exprimée en W/m²) :

$$\left\langle 1 \middle| \underline{S}^0 \right\rangle \cong 169 \cdot \left(\frac{3}{100}, \frac{97}{100} \right)$$

Solarisation de l'agent k

Le taux de « *solarisation* » de l'agent k pourra notamment être évalué tant du point anergique, exergique que global. A titre d'exemple, le taux global de transformation exergique issu du soleil sera donc :

$$\frac{\left\langle \underline{k}_e \middle| \underline{S} \right\rangle}{\left\langle \underline{k}_e \middle| \underline{S}^0 \right\rangle}$$

[316] Pour sky, sun ou soleil.
[317] Il prend aussi en compte l'énergie marémotrice bien que non dérivée de l'énergie solaire.

Le vecteur « géothermie »

Sur l'intervalle de temps T, nous définissons le vecteur $\underline{G}$[318], représentant la valorisation énergétique issue du sous-sol profond et notamment du flux rémanent de chaleur issue de la décomposition de fission atomique au sein du cœur terrestre.

Dans un formalisme analogue au précédent, nous désignerons alors le flux du *produit énergétique* issu du sous-sol pour l'aire étudiée $\mathcal{A}_k$ de la façon suivante :

$$\langle k|\underline{G}\rangle = \underline{g}_k = (a(\underline{g}_k); e(\underline{g}_k))$$

Nous noterons le gisement incident issu du sous-sol de la façon suivante :

$$\left|\underline{G}^0\right\rangle = \begin{bmatrix} \underline{g}^0{}_1 \\ \cdots \\ \underline{g}^0{}_k \\ \cdots \\ \underline{g}^0{}_n \end{bmatrix}$$

En première approche, nous considérons l'égalité suivante (exprimée en W/m²)[319] :

$$\left\langle 1\left|\underline{G}^0\right\rangle \cong 60.10^{-3}\cdot\left(\frac{99}{100},\frac{1}{100}\right)\right.$$

Le taux de transformation de l'anergie incidente auprès de l'agent k pourra notamment être évalué de la façon suivante :

$$\frac{\langle \underline{k}_a|\underline{G}\rangle}{\left\langle \underline{k}_a\left|\underline{G}^0\right\rangle\right.}$$

La matrice richesse-échange

Pour la même période temporelle T, on définit le transfert d'énergie de l'agent i vers l'agent j par :

$$\underline{m}_{ij} = \underline{m}_{i\to j}\ \underline{m}_{ij} = \underline{m}_{i\to j}$$

Avec :

$$\underline{m}_{ij} \in E\ \underline{m}_{ij} \in E$$

La matrice d'échange s'écrit alors de la façon suivante :

$$\left|\underline{M}\right| \equiv \begin{bmatrix} \underline{m}_{11} & .. & \underline{m}_{1k} & .. & \underline{m}_{1n} \\ .. & .. & .. & .. & .. \\ \underline{m}_{k1} & .. & \underline{m}_{kk} & .. & \underline{m}_{kn} \\ .. & .. & .. & .. & .. \\ \underline{m}_{n1} & .. & \underline{m}_{nk} & .. & \underline{m}_{nn} \end{bmatrix}$$

Transposée en notation *bra-ket*, le transfert d'énergie[320] de l'agent k vers l'agent l s'écrira donc :

$$\underline{m}_{k\to l} = \underline{m}_{kl} = \langle k|\underline{M}|l\rangle$$

Notons aussi que de façon générale, la matrice $\underline{M}$ n'a pas en général de propriétés particulières de symétrie, étant donné que la *balance énergétique* entre deux agents k et l n'a pas de raisons particulières d'être nulle.

Nous définirons la matrice transposée de la façon suivante :

$$\underline{m}^*_{kl} = \underline{m}_{lk} = \langle l|M|k\rangle = \langle k|M^*|l\rangle$$

A titre d'exemple, les transferts entre deux agents peuvent notamment consister en :

- Transfert de marchandises et donc d'énergies incorporées,
- Transfert d'organismes vivants, y compris un transfert de population sur la période T[321]
- D'électricité,
- De carburants fossiles,
- De chaleur ou de froid, notamment via les réseaux thermiques,
- D'alimentation,
- …

[318] Pour *ground* ou géothermie.
[319] Pour une valeur moyenne de la chaleur d'origine interne égale à 0.06 W/m²
[320] Au sens de vecteur de l'espace E
[321] Ce point suppose d'évaluer l'énergie incorporée d'organismes vivants dont l'homme !...

Le vecteur-stock

Les termes diagonaux de la matrice $\underline{M}$ correspondent formellement à l'échange énergétique de l'agent *k* sur lui-même. Nous considérerons qu'il correspond à un flux de stock. Nous essaierons dans la suite d'évaluer l'évolution de ce stock au cours de la période *T*.

Par simplification, et pour caractériser plus simplement l'état du stock énergétique, on écrira :

$$\underline{m}_{kk} = \underline{m}_k$$

On considère que cette quantité correspond au stock d'énergie accumulé par l'agent *k* : cela constitue son stock de richesses, une partie de ses *actifs énergétiques*. Notons enfin que sur la période *T,* nous analyserons la variation de ce stock noté :

$$\Delta\underline{m}_k \in E$$

Notons que le stock correspond à l'ensemble des actifs énergétiques disponibles au sein de l'épaisseur de la partition. A titre d'exemple, elle peut comprendre :

- Les réserves de minerai exploitables,
- Les réserves d'énergies fossiles,
- Les réserves vivantes[322],
- Les stocks de bois-énergie,
- Les stocks alimentaires,
- Les actifs d'énergie incorporée,
- L'électricité stockée[323],
- La chaleur stockée[324],
- …

Gardons également à l'esprit une condition aux limites à respecter, notamment dans le cadre de simulations projetées :

$$E(\underline{m}_k) \geq 0 \quad E(\underline{m}_k) \geq 0$$

Le vecteur-demande

Pour la même période temporelle *T*, nous définissons le vecteur suivant, représentant la demande énergétique (ou une partie de ses *charges énergétiques*) de l'agent *k*. Elle correspond à l'écriture en (anergie, exergie) de l'ensemble des besoins de la population *P* sur le territoire *A*.

Elle traduit notamment la somme des besoins :

- En chaud et en froid,
- En éclairage,
- En alimentation,
- En transport de personnes,
- En transport de marchandises,
- En besoins d'énergies incorporées

$$\langle k|\underline{D}\rangle = \underline{d}_k \in E$$

Nota important : il s'agira de ne pas confondre la densité de l'agent *k* (*d* non souligné) de la demande (*d* souligné)

Le vecteur-consommation

Pour la même période temporelle *T*, nous définissons le vecteur suivant, représentant l'énergie dissipée vers l'extérieur terrestre et dirigée vers le ciel. Elle correspond à un flux essentiellement anergique.

$$\langle k|\underline{C}\rangle = \underline{c}_k \in E$$

Cette quantité permet de mesurer l'activité de transformation énergétique de l'agent *k*.

En première approche, et en 2010, nous pourrons considérer que le vecteur-consommation globale exprimé en Watt :

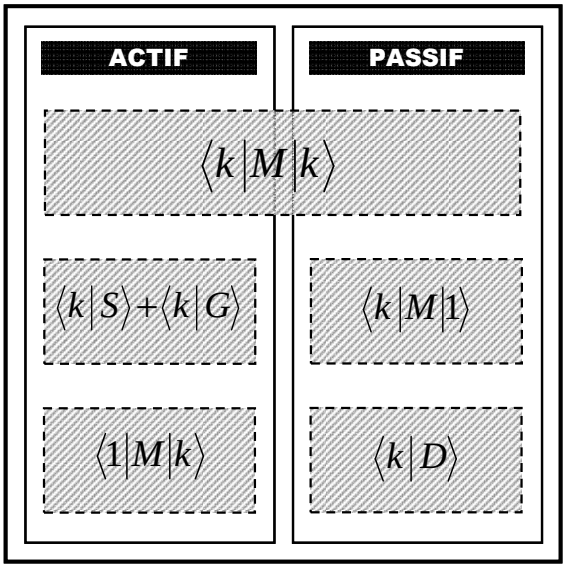
$$\langle 1|\underline{C}\rangle \cong 2200.P.(1,0)$$

[322] Comprenant également la population moyenne de la période *T*.
[323] Par exemple dans des piles à combustible.
[324] Par exemple dans un dispositif de stockage intersaisonnier.

Eléments de comptabilité énergétique

Notations

Variation du stock	$\Delta\langle k\vert\underline{M}\vert k\rangle$
Offre énergétique[325]	$\langle k\vert\underline{S}\rangle+\langle k\vert\underline{G}\rangle$
Intrants énergétiques	$\langle 1\vert\underline{M}\vert k\rangle$
Sortants énergétiques	$\langle k\vert\underline{M}\vert 1\rangle$
Demande énergétique	$\langle k\vert\underline{D}\rangle$
Emissions fatales[326]	$\langle k\vert\underline{C}\rangle$



Bilan énergétique comptable de l'agent k écrit dans l'espace E

Balance intérieure

Dans la suite de l'étude, nous définirons comme ci-dessous la balance entre les intrants intérieurs et la consommation par le vecteur suivant :

$$\left|\underline{B}^{\text{int}}\right\rangle=\left|\underline{S}\right\rangle+\left|\underline{G}\right\rangle-\left|\underline{D}\right\rangle$$

Ce vecteur permettra notamment d'évaluer la capacité du système à équilibre offre et demande énergétique localement en régime permanent : en effet le terme de variation du stock est absent de l'expression.

Balance extérieure

Par analogie avec la macro-économie, nous pouvons également définir la balance extérieure énergétique comme la différence entre les flux sortants et flux entrants[327].

$$\left|\underline{B}^{ext}\right\rangle=-\left|\underline{M}^{*}-\underline{M}\right|1\rangle$$

Bilan des balances

Nous en déduisons que la conservation de l'énergie peut alors s'écrire de la façon suivante[328] :

$$E\left(\Delta\left|\underline{M}\right\rangle\right)=E\left(\left|\underline{B}^{\text{int}}\right\rangle-\left|\underline{B}^{ext}\right\rangle\right)$$

[325] Ou une partie des *produits énergétiques* au sens comptable
[326] Ou une partie des *charges énergétiques* au sens comptable

[327] A l'instar d'une balance commerciale
[328] A vérifier

Produits énergétiques

Par analogie comptable, l'ensemble des intrants énergétiques susceptibles d'augmenter le résultat énergétique d'un agent est nommé *produit énergétique*. Il est donc définit par :

$$|\underline{p}\rangle = |\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle + |\underline{M}^*|1\rangle$$

Charges énergétiques

Par analogie comptable, l'ensemble des sortants énergétiques susceptibles de diminuer le résultat énergétique d'un agent est nommé *charge énergétique*. Il est donc définit par :

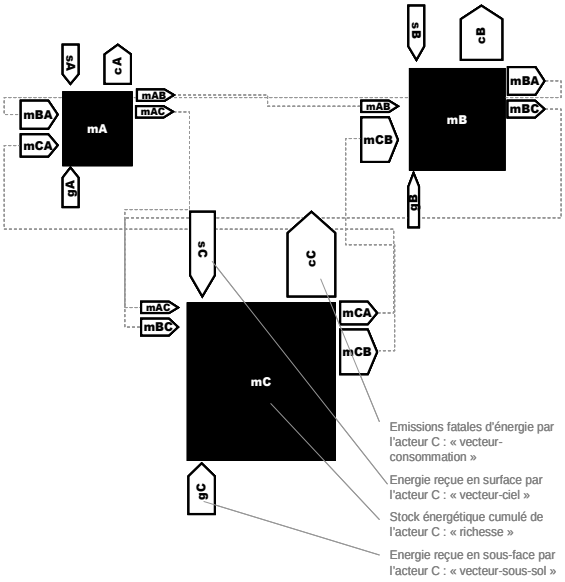
$$|\underline{c}\rangle = |\underline{M}|1\rangle + |\underline{C}\rangle$$

Bilan produits et charges

Nous en déduisons que la conservation de l'énergie peut alors s'écrire de la façon suivante :

$$E(\Delta|\underline{M}\rangle) = E(|\underline{p}\rangle - |\underline{c}\rangle)$$

Conservation de l'énergie



Rappel de l'organigramme d'échange présenté dans les [Re]présentations

Pour l'agent *k*, la variation de son stock[329] énergétique correspond à l'écart entre la somme des flux entrants, projetés sur l'axe énergétique, et la somme des flux sortants :

$$E(\Delta \underline{m}_k) = E\left(\underline{s}_k + \underline{g}_k + \sum_{l \neq k} \underline{m}_{lk} - \sum_{l \neq k} \underline{m}_{kl} - \underline{c}_k\right)$$

De façon vectorielle, la conservation de l'énergie s'écrit donc :

$$E(\Delta|\underline{M}\rangle) = E(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle + |\underline{M}^* - \underline{M}|1\rangle - |\underline{C}\rangle)$$

[329] Nota important : cette équation de bilan pourra aussi être associé à différents périmètres. Concernant la prise en compte énergétique des flux de matière et la difficulté de modélisation de l'amortissement de l'énergie incorporée (ou énergie grise), nous pourrons aussi choisir d'omettre ces quantités dans différentes applications pratiques.

Augmentation de l'entropie

Diminution de l'exergie

Le deuxième principe suppose que la qualité de l'énergie sortante a diminué. Nos pouvons donc traduire cette inégalité de la façon suivante :

$$\langle \underline{k}_e | \underline{in} \rangle \geq \langle \underline{k}_e | \underline{out} \rangle$$

Augmentation de l'anergie

A contrario, la dégradation de la qualité de l'énergie se traduit par une augmentation de l'anergie en sortie du système (ou de l'agent *k*)

$$\langle \underline{k}_a | \underline{in} \rangle \leq \langle \underline{k}_a | \underline{out} \rangle$$

Nous pouvons aussi constater que les écarts d'anergie et d'exergie en entrée-sortie seront identiques en valeur absolue du fait de la conservation de l'énergie. Celle-ci peut aussi être écrite de la façon suivante :

$$\langle \underline{k}_e | \underline{in} \rangle + \langle \underline{k}_a | \underline{in} \rangle = \langle \underline{k}_e | \underline{out} \rangle + \langle \underline{k}_a | \underline{out} \rangle$$

Traduction pour l'agent k

Il y a lieu de distinguer le rôle de source ou de puits de la variation du stock.

Dans le cas de figure, où la quantité d'exergie du stock diminue, cela signifie dès lors que le stock est un intrant. On en déduit alors l'inégalité suivante :

$$e(\Delta \underline{m}_k) < 0 \; e(\Delta \underline{m}_k) < 0$$

$$e\left(\underline{s}_k + \underline{g}_k + \sum_{l \neq k} \underline{m}_{lk} - \Delta \underline{m}_k \right) \geq e\left(\sum_{l \neq k} \underline{m}_{kl} + \underline{c}_k \right)$$

Dans le cas contraire, si le stock d'exergie augmente, alors la variation de stock est un sortant. Nous en déduisons alors :

$$e(\Delta \underline{m}_k) \geq 0 \; e(\Delta \underline{m}_k) \geq 0$$

$$e\left(\underline{s}_k + \underline{g}_k + \sum_{l \neq k} \underline{m}_{lk} \right) \geq e\left(\sum_{l \neq k} \underline{m}_{kl} + \underline{c}_k + \Delta \underline{m}_k \right)$$

Synthèse des lois de la thermodynamique

Synthèse

Nous pouvons donc retenir dans les deux cas l'inégalité suivante :

$$e\left(\underline{s}_k + \underline{g}_k + \sum_{l \neq k} \underline{m}_{lk} \right) \geq e\left(\sum_{l \neq k} \underline{m}_{kl} + \underline{c}_k + \Delta \underline{m}_k \right)$$

Expressions vectorielles

$$E\left(\left| \underline{S} \right\rangle + \left| \underline{G} \right\rangle + \left| \underline{M}^* \right| 1 \rangle \right) = E\left(\left| \underline{C} \right\rangle + \Delta \left| \underline{M} \right\rangle + \left| \underline{M} \right| 1 \rangle \right)$$

Et l'information ?

La quantité maximale d'augmentation néguentropique de l'agent *k* sera donc nécessairement[330] :

$$I_{MAX} = e\left(\underline{s}_k + \underline{g}_k + \sum_{l \neq k} \underline{m}_{lk} \right) - e\left(\sum_{l \neq k} \underline{m}_{kl} + \underline{c}_k + \Delta \underline{m}_k \right)$$

[330] A vérifier.

Quelques enseignements

Problème inverse 1

Dans le cas d'un système à *n* agents, et si pour chaque agent nous connaissons :

- Sa capacité de conversion du vecteur-soleil,
- Sa capacité de conversion du vecteur-géothermie,
- La variation de son stock énergétique,
- La valeur de sa dissipation énergétique,

Que peut-on alors en déduire sur la nature des échanges entres les *n* agents ?

Robustesse du réseau d'agents énergétiques

De fait, la matrice M comprend n^2 termes, éléments de E. Les n termes diagonaux sont connus : ils correspondent aux variations de stock énergétique de chaque agent. On en déduit que n^2-n termes sont inconnus, et que chaque terme non diagonal comportent deux composantes.

Le jeu d'égalité (pour la conservation d'énergie) entraîne n relation. On en déduit que la dimension du sous-espace vectoriel est donc :

$$2\left(n^2-n\right)-n=2n^2-3n$$

Cela montre que plus le nombre d'agents augmente (ou le nombre de points dans le réseau d'échange) plus les possibilités d'échanges pour une situation donnée de consommation, de production et de variation du stock augmente quadratiquement.

Au sein de sous-espace $n+2(n^2-n)=2n^2-n$ inégalités limiteront l'espace des possibles.

Problème inverse 2

Dans le cas d'un système à *n* agents, et si pour chaque agent nous connaissons :

- Sa capacité de conversion du vecteur-ciel,
- Sa capacité de conversion du vecteur-sous-sol,
- La valeur de sa dissipation énergétique,

Que peut-on alors en déduire sur la nature des échanges entres les *n* agents ? Ce problème diffère du précédent car la variation du stock est ici une inconnue.

Rappelons également que dans le cadre d'une partition macroscopique de la Terre, si par exemple les membres de l'OPEP sont rassemblés au sein d'une même partition, et que cette dernière rassemble également les territoires disposant de réserves d'énergies fossiles, cela implique que la quantité de stock des autres éléments de la partition est négligeable. Nous avons alors :

$$2n^2-n$$

Définition du rendement thermodynamique

De façon classique, le rendement d'une machine thermique compare la quantité de travail produite à la chaleur consommée.

$$r = \frac{W}{Q}$$

Dans une situation de régime permanent, on considère qu'il n'y a pas de variation du capital énergétique détenue par l'agent *k*. Cela correspond à :

$$\Delta \underline{m}_k = \underline{0}$$

Dans ce cas de figure, la quantité de travail correspond à la différence entre les quantités d'exergie exportées et importées. Nous en déduisons la définition suivante du rendement thermodynamique de l'agent *k*.

$$r_k = \frac{e\left(\sum_l \underline{m}_{kl} - \underline{m}_{lk}\right)}{a(\underline{c}_k)}$$

En régime permanent, l'inégalité exergique devient :

$$e\left(\underline{s}_k + \underline{g}_k + \sum_l \underline{m}_{lk}\right) \geq e\left(\underline{c}_k + \sum_l \underline{m}_{kl}\right)$$

On en déduit alors :

$$r_k \leq \frac{e(\underline{s}_k + \underline{g}_k - \underline{c}_k)}{a(\underline{c}_k)}$$

Si l'on considère que la composante exergique de la dissipation d'énergie est négligeable devant sa composante anergique, nous en déduisons la majoration simplifiée suivante :

$$r_k \leq \frac{e(\underline{s}_k + \underline{g}_k)}{a(\underline{c}_k)}$$

On se souvient qu'à l'échelle globale, le flux géothermique est bien plus faible que le flux solaire. Dès lors, dans une très grande majorité de situation géographique[331], le rendement maximum d'un territoire sera directement corrélé au rendement moyen de conversion exergique du flux solaire.

A l'échelle globale

A l'échelle de la planète Terre, les termes matriciels d'échange disparaissent. On retient alors :

$$E(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle) = E(|\underline{C}\rangle + \Delta|\underline{M}\rangle)$$

$$e(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle) \geq e(|\underline{C}\rangle + \Delta|\underline{M}\rangle)$$

Dans la situation où la planète Terre ne puise pas dans ses réserves (ce qui était globalement le cas avant la première révolution industrielle[332]), les relations deviennent :

$$E(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle) = E(|\underline{C}\rangle) \; E(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle) = E(|\underline{C}\rangle)$$

$$e(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle) \geq e(|\underline{C}\rangle) \; e(|\underline{S}\rangle + |\underline{G}\rangle) \geq e(|\underline{C}\rangle)$$

Si l'on néglige la contribution géothermique, nous en déduisons ces relations simplifiées :

$$E(|\underline{S}\rangle) \cong E(|\underline{C}\rangle) \; E(|\underline{S}\rangle) \cong E(|\underline{C}\rangle)$$

$$e(|\underline{S}\rangle) \geq e(|\underline{C}\rangle) \; e(|\underline{S}\rangle) \geq e(|\underline{C}\rangle)$$

Dans la mesure où les besoins vitaux métaboliques réclament une quantité minimale de consommation énergétique par personne, nous en déduisons trivialement que l'augmentation de la population supposait nécessairement d'accroître la captation énergétique solaire. Traduit économiquement, cela présuppose une équivalence entre la quantité de terres cultivées et la population mondiale.

[331] Hormis certaines zones où le flux géothermique est plus intense localement : pensons notamment à l'Islande.

[332] Se référer à la troisième partie pour plus de développement. Une partie d'exergie était cependant puiser dans les carrières de pierre comme dans les forêts pour la construction de bâti et naval.

Démolition sélective

Estimation de durée des travaux

Gros œuvre

Code		Désignation du composant technologique		Outils / Mécanisme	Durée (min. 2 ouvriers / travail)				Notes pour la démilition sélective	Notes pour la conception de la démolition sélective
					Durée de démontage	Durée de stockage	Durée de descente	Durée totale de traitement		
					outils légers légers à faible consommation	nettoyage / empilage / blocage	charge/transport/décharge			
1.2	Cloisons et remplissage									
	1.1 - 07	panneaux isolants	(cloisons)	grues, mécanisme spécialisé pour la coupe b.a., vérins hydrauliques	10 min. / mq => mq6/h= 6.5 h/pallet(40mq)	20 min. / 2 mc (1 pallet)	10 min. / 2 mc (1 pallet)	7 h/pallet= 10 min/mq	ml(0.8x1.2x2.1)= mc 2= 1 Full pallet (épaisss: cm5)= mq 40 Durée total referé à 2 equipes de 2 ouvriers	* 1.1-07/1.2-02: projet de demontage et mouvement
	1.2 - 02	briques	(murs extérieurs)	"	3 min. / mq => 30 min/5ml	Coupe: 1.5 min. / mq => 20 min/5ml	stockage et descente: 1.25 min. / mq => 15 min/5ml	1.1 h/13.5 mq = 15 min/ml	Portée moyenne ml (5 x 2.7)= mq 13,5: prep. => coupe=> stock et descente des morceaux de mur=>Durée totale referée à 1 equipes de 2 ouvriers. + 1 ouv. trans pallette + 1 gru	
1.1	Construction (poutres / poteaux / dalles)									
	1.1 - 05	dalles		"	préparation: 4 min/ mq => 40 min/pièce	coupe:4 min/ mq => 40 min/pièce	stockage et descente: 3 min/ mq =>30 min/pièce	1.8 h/plancher(10 mq) = 11min/mq	Portée moyenne ml (2,5 x 4)= mq 10: prep. => coupe=> stock et descente des morceaux de plancher=>Durée totale referée à 1 equipes de 2 ouvriers + 1 ouvier chariot= 1 gru à consideré une pièce de mq 10 x ml 0.18= 1.8 mc) x kg 2000= 3600 Kg => Durée total referé à 2 equipes de 2 ouvriers: 1 Om.+ 1 ST.&D.	* 1.1-05: projet de demontage et mouvement
	1.1 - 01 b	béton armé (poteaux)	(1 pièce=1 pillier 30x60)	"	préparation: 20 min/pièce	coupe: 30 min/pièce	stockage et descente: 15 min/pièce	1.05 h/chacun	Portée moyenne ml (3 x 0.6 x 0.3)= mc 0,55: prep. => coupe=> stock et descente des morceaux des pilliers =>Durée totale referée à 1 equipes de 2 ouvriers +1 ouvier chariot: à consideré une pièce de 0.55 mc= 1400 Kg ca.=>durée totale referée à 2 equipes de 2 ouvriers: : 1 Om.+ 1 ST.&D.	* 1.1-01 b: projet de demontage et mouvement
	1.1 - 01 a	béton armé (poutres)	(1 pièce=1 poutre 30x60)	"	prparazione 6 min/ ml => 30 min/pièce	coupe: 6 min/ ml => 30 min/pièce	stockage et descente: 3 min/ ml =>15 min/pièce	1.25 h/chacun	Portée moyenne ml (5 x 0.6 x 0.3)= mc 0,9: prep. => coupe=> stock et descente des morceaux des poutres =>Durée totale referée à 1 equipes de 2 ouvriers . => durée totale referée à 1 equipes de 2 ouvriers Om. + 1 ouvier chariot à consideré une pièce de 0.9 mc= 2300 Kg	* 1.1-01 a: projet de demontage et mouvement

CVC

Code		Désignation du composant technologique		Outils / Mécanisme	Durée (min. 2 ouvriers / travail)				Notes pour la démilition sélective	Notes pour la conception de la démolition sélective
					Durée de démontage	Durée de stockage	Durée de descente	Durée totale de traitement		
					outils légers légers à faible consommation	nettoyage / empilage / blocage	charge/transport/décharge			
3.1		Installations électriques								
	3.1 - 01	interrupteurs et prises		scies et meuleuses, tournevis, marteau de démolition, chariots	2.5 minutes / chacun (20 pièces /appart)		5 minutes / chacun 3 boites /appart	1.5 h /appart (3 boites)=> 4 h/plano=3 boites = 10 boites	1 pallet= 3 appart ou 10 boites: éléments stockés, y compris tous les composants annexes (vis, écrous, écuisons)	* 3.1 - 01/02: Évaluation fait pour typologie. Compte des pièces et eventuelle emballage.
	3.1 - 02	lampes		scies et meuleuses, tournevis, marteau de démolition, chariots	5 minutes / chacun (6 pièces/appart)					
	3.1 - 03	câbles (ml de canalisation => 2 o 3 câbles)		scies et meuleuses, tournevis, marteau de démolition, chariots	2.5 minutes / 10ml 1h/100mq => 2.5minutes/mq	10 minutes / 10ml (y compris la mesure et la division)	5 minutes / chacun (1 boite) (3 boites /appart)	1.5 min/ml (2.5ml/mq)=> 4 min./mq	à partir de la deuxième fase est prevu la separation des cables de la meme conduit et aussi la mesure de chaque cable. Tollerance de 2.3-2.8ml/mq	
	3.1 - 04	plusieurs fentes		scies et meuleuses, tournevis, marteau de démolition, chariots	20 minutes / chacun	3 minutes / chacun	2 minutes / chacun	2 h /appart (40 mq) => 25 minutes/chacun: 1/8mq		
3.2		Système d'eau								
	3.2 - 01	réservoirs		scies et meuleuses, tournevis, marteau de démolition, chariots	5 minutes / chacun	15 minutes / chacun	20 minutes / chacun	1 h /chacun		* 3.2 - 01/03: Compte et dimensionement, modalité de mouvement
	3.2 - 02	conduites	(mc de service => fourniture et élimination)	scies et meuleuses, tournevis, marteau de démolition, chariots	1 h / mq	10 minutes / mq	5 minutes / mq	0.8 h /mq =>	Stock des elements de la meme longueur (range 30:50 cm)	
	3.2 - 03	tuyaux de descente	(module de 3ml)	scies et meuleuses, tournevis, marteau de démolition, chariots	5 minutes / chacun	5 minutes / chacun	2 minutes / chacun	15 min /chacun => 5 min./ml	stock avec menuiserie	
	3.2 - 05	robinets	(N° de services: salle de bains + cuisine)	scies et meuleuses, tournevis, marteau de démolition, chariots	10 minutes / chacun	5 minutes / chacun	5 minutes / chacun	20 min/chacun	1 h/app. => méthode lieu au type	* 3.2 - 04/05: Évaluation fait pour stockage et emballage, typologie et matériau. Compte des pièces et accessoires.
	3.2 - 04	puisards	(plastique)	scies et meuleuses, tournevis, marteau de démolition, chariots	15 minutes / chacun	10 minutes / chacun	5 minutes / chacun	30 minutes / chacun => (dimension moyen cm 50x50): +15% x 10 cm d'incrementation	pour le puisards en béton: temps x 2	
3.3	l. de chauffage									
	3.3 - 01	conduits de fumée	(module de 3ml)	scies et meuleuses, tournevis, marteau de démolition, chariots	8 minutes / chacun	5 minutes / chacun	2minutes / chacun	15 min /cad => 5 min./ml	stock avec menuiserie	
	3.3 - 02	conduites	(ml de cond. => fourniture et élimination)	"	15 min / ml	5 min / ml	4 min / ml	24 min /ml => 10 min/mq: 0.5ml/mq	Stock des elements de la meme longueur (range 50-80 cm)	
	3.3 - 03	radiateurs / chauffage / chaudières	(1 pièce)	"	8 minutes / chacun	2 minutes / chacun	5 minutes / chacun	3 h/pallet => 10 pièce/pallet		* 3.3 - 03: Évaluation fait pour type et emballage, typologie et matériau. Compte des pièces et accessoires.
	3.3 - 04	groupes de contrôle, compteur, plusieurs inst. chauf./d'eau		"	finalitation des travaux syst. d'eau / chauf.			8h /app	avec demontage des pièces. Durée totale referée à 1 equipes de 2 ouvriers+ un mecanicien	
3.4	Système d'ascenseur									
	3.4 - 02	télécabines		grues, mécanisme spécialisé				8h /chacun	avec demontage des pièces. Durée totale referée à 1 equipes de 2 ouvriers + un mecanicien	* 3.4 - 02/03: projet de demontage et mouvement
	3.4 - 03	boîte électrique		"						

Menuiseries

Code		Désignation du composant technologique	Outils / Mécanisme	Durée (min. 2 ouvriers / travail)				Notes pour la démilition sélective	Notes pour la conception de la démolition sélective
				Durée de démontage	Durée de stockage	Durée de descente	Durée totale de traitement		
				outils légers légers à faible consommation	nettoyage / empilage / blocage	charge/transport/décharge			
2.1		Portes et fenêtres							
		Portes intérieures (en bois et collé)	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots				45 minutes/porte (25+20 dormant)		
	2.1 -02	dormant en bois	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots	10 minutes chacun	2 minutes chacun	3 minutes chacun	5 portes/appart => 75 minutes	3h/app. (5 portes) => descente individuelle de chaque porte avec minuterie	Évaluation fait pour typologie et dimension, état pièce, possibilité de stockage et desassemblage à pied d'oevre. Compte des pièces et eventuelle embalage.
	2.1 -03	ouvrant en bois	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots	2 minutes chacun	3 minutes chacun	5 minutes chacun	5 portes /appart => 50 minutes		
	2.1 -04	charnières et serrures groupe	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots	2 minutes chacun	3 minutes chacun	5 minutes chacun	10 minutes chacun => 50 minutes		
	2.1 -05	verre	compresseur, chariots	35 minutes / 3.5mq (1/8 pallet)	15 minutes / 3.5 mq (1/8 pallet)	10 minutes / 30 mq (1 pallet)	3.5 h/pallet: 24 fenetres	3 plaques de verre (2*120*100)cm + 4cm (épaisseur emballé) = cm 10/rampe => mq 3.5*8 (largueur pallet) = mq 28 (mq30/pallet): Kg 1500. Durée totale referée à 2 equipes de 2 ouvriers	
2.1		Portes et fenêtres extérieures (métalliques)	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots				40 minutes/chacun (moyenne)		
	2.1 -01	ouvre morte	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots	15 minutes / chacun	2 minutes / chacun	3 minutes / chacun	5 portes /appart => 1.5 h/app.= 20 minutes/chacun	1.5h/appart (5 portes) => descente individuelle de chaque dormant avec minuterie	Évaluation fait pour typologie et dimension, état pièce, possibilité de stockage et desassemblage à pied d'oevre. Compte pièces et eventuelle embalage.
	2.1 -02	dormant en alluminium	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots	10 minutes / chacun	2 minutes / chacun	3 minutes / chacun	5 portes /appart => 75 minutes	2h/appart (5 portes) => descente individuelle de chaque dormant avec minuterie	
	2.1 -03	ouvrant en alluminium	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots	2 minutes / chacun	3 minutes / chacun	5 minutes / chacun	5 portes /appart => 45 minutes		
2.5		Appuis de fenêtre (En particulier en marbre ou en pierre)	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots	15 minutes / chacun	10 minutes / chacun	10 minutes / chacun	3 h /pallet (12 pezzi)=> 25 minutes/chacun	1 pallet= 12 pièces (in media) démonté facilement, car il sera déjà démonté le cadre, puis une partie de la paroi, et stockées sur des palettes à chaque étage,	
2.6		Portes coulissantes	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots				15 minutes/mq de porte		
2.3		Volets	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots	2 minutes/chacun (1/8 pallet)	5 minutes/chacun (1/8 pallet)	10 minutes/chacun (1/8 pallet)	1.2 h /pallet => 10 mq/h	1 pallet= 13.5mq	
1.5		Balustrades	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots				40 minutes/mq		
	1.5 -01	Vitre	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots	2 minutes / 3.5mq (1/8 pallet)	10 minutes / 3.5 mq (1/8 pallet)	10 minutes / 30 mq (1 pallet)	3.25 h/1 pallet	3 plaques de verre (2x120x100)cm + 4cm (épaisseur emballé) = cm 10/rampe => mq 3.5 x 8 (largueur pallet) = mq 28 (mq30/pallet): Kg 1500. Durée totale referée à 2 equipes de 2 ouvriers	Évaluation fait pour stockage et desassemblage, descente, typologie, dimension, état du material.
	1.5 -03	Montants métaliques (1 rampe)	tournevis, perceuses, marteux de démolition, chariots	15 minutes / chacun	5 minutes / chacun	10 minutes / chacun	15 minutes/chacun => 10min./mq	operation de demontage et stock fait à chaque étage=> Durée totale referée à 2 equipes de 2 ouvriers	

Sanitaires

Code		Désignation du composant technologique	Outils / Mécanisme	Durée (min. 2 ouvriers / travail)				Notes pour la démilition sélective	Notes pour la conception de la démolition sélective
				Durée de démontage	Durée de stockage	Durée de descente	Durée totale de traitement		
				outils légers légers à faible consommation	nettoyage / empilage / blocage	charge/transport/décharge			
1.4		Sanitaires							
	1.4 - 01	lavabo	clés de types différents, tournevis, trans pallet et chariot élévateur, clé à pipe,	10 minutes chacun	5 minutes chacun	5 minutes chacun	20 minutes chacun	méthode de stockage alternative au pallet (crochets, cordes, ect.)=> 1h/appart (3 pièces/app.)	Évaluation fait pour stockage et emballage, typologie et matériau. Compte des pièces et accessoires.
	1.4 - 02	receveur de douche	clés de types différents, tournevis, chariots, clé à pipe,	15 minutes chacun	5 minutes chacun	10 minutes / 0.5 pallet	2 heures chacun (0.5 pallet)	1 pallet= max 10 pièces (0.5 pallet /étage): temps referé à un étage	
	1.4 - 03	wc	clés de types différents, tournevis, chariots, clé à pipe,	15 minutes chacun	5 minutes chacun	5 minutes chacun	25 minutes chacun	méthode de stockage alternative au pallet (crochets, cordes, ect.)=> 1h/appart (3 pièces/app.)	

Sols et revêtements

Code		Désignation du composant technologique		Outils / Mécanisme	Durée (min. 2 ouvriers / travail)				Notes pour la démilition sélective	Notes pour la conception de la démolition sélective
					Durée de démontage	Durée de stockage	Durée de descente	Durée totale de traitement		
					outils légers légers à faible consommation	nettoyage / empilage / blocage	charge/transport/d écharge			
1.3		Planchers - Revêtements								
	1.3 -00	Plinthes		tournevis, perceuses, chariots	2 minutes / ml	0.5 minutes / ml	0.5 minutes / ml	3 minutes/mq = 3 minutes/ml	1 pallet: (longuer moyen 4 pur appart)=> n° 4/appart*40 ml= ml 160= mc 160/9.6 (surface pallet)= 16-17 couches.	
	1.3 -01	Couche de revêtement de pavage								
			moquette	tournevis, perceuses, chariots	2 minutes / mq => mq30/h = 3h/pallet(100mq)	15 minutes / mc (1pallet)	10 minutes / mc (1pallet)	1.2 h/pallet= 3 minutes/mq (depuis 5ème étage: 0,1*étage => * 0,9 au 4ème étage;* 0,8 au 3ème étage)	1 pallet: (pois Kg 2.5/mq)=> 100 mq x 2.5 = 250 Kg . Durée totale referée à 3 equipes de 2 ouvriers	
			céramique	broyeurs de diamant, chariots	5 minutes / mq => mq12/h =2.5 h/pallet (30mq)	15 minutes / mc (1pallet)	15 minutes / mc (1pallet)	1 h/pallet= 5 min/mq	0.9mq x 110cm= 1 mc = 1 Full pallet: (épaisseur 3cm)=> 30 couches*0.9= mq 27. Durée totale referée à 3 equipes de 2 ouvriers	
			linoléum / PVC / gaines	machine de suppression de la gomme, broyeurs de diamant, chariots	2 minutes / mq => mq30/h=3h/pallet (100mq)	15 minutes / mc (1pallet)	10 minutes/ mc (1pallet)	1.2 h/pallet= 5 minutes/mq	1 pallet: pois 1800Kg/mc, épaisseur 1cm=> 100 mq*0.01*1800= Kg 1800. Durée totale referée à 2 equipes de 2 ouvriers	
			marbre	scies, broyeurs de diamant, chariots	10 minutes / mq => 6mq/h =1.5 h/pallet(10mq)	15 minutes / 0.5 mc (1 pallet)	15 minutes / 0.5 mc (1 pallet)	2 h/pallet= 12 minutes/mq	0.9mq x 60cm= 0.54 mc = 1 Full pallet: 1700Kg (épaisseur moyenne cm5)=> 12 couches*0.9= mq 10 => Durée totale referée à 2 equipes de 2 ouvriers Om. + 1 St.&D.	
1.3		Sols - Revêtements								
	1.3 -03	Toit en pente								
			panneaux de tôlerie	scies, broyeurs de diamant, chariots	3.5 minutes / mq => mq 18-20/h	1 minutes / mq => mq 18-20/0.25h	1 minutes / mq => mq 18-20/0.25h	1.5 h/20 mq= 5 minutes /mq	1.2ml*5.0 ml= 6ml= 1 charge (épaisseur 15cm). Durée totale referée à 2 equipes de 2 ouvriers	Évaluation fait état des pièces, possibilité et modalité de stockage, taillesdes modules/descente unique.
			tuiles	scies, broyeurs de diamant, chariots	2 minutes / mq => 70 minutes/pallet	15 minutes / 10 mq => 45minutes (1 pallet)	10 minutes / 10 mq => 30min/(1 pallet)	1.25h/pallet= 2.5 minutes /mq (depuis 5ème étage: 0,1*étage => * 0,9 au 4ème étage;* 0,8 au 3ème étage)	n° 16 x 25 (lignes en hauteur)= n° 400/12= mq 35 ca = 1 pallet => 1g. /200mq. Durée totale referée à 2 equipes de 2 ouvriers	

ACV par lots

Gros œuvre

Maçonneries

électricité	Engins	Puissance (kW)	Temps d'utilisation (en min)	Énergie
	Visseuse	0,015		0
	Perceuse	0,05	3000	2,5
	Marteau piqueur	1,3	3000	65
	Plaque diamantée	1,8	17400	522
	Scie	0,5	0	0
	Grue	25	17400	7250
	Chariot élévateur (Treuil)	0,7	17400	203
	Trans palette (élévateurs à fourche)	0	17400	0
			Total	8042,5

Impacts	Unités	
resources - depletion of abiotic resources	kg antimony-Eq	399,036139
acidification potential - generic	kg SO2-Eq	583,404911
eutrophication potential - generic	kg PO4-Eq	98,8060418
climate change - GWP 100a	kg CO2-Eq	60453,9565
land use - competition	m2a	205,941406
ecosystem quality - land occupation	points	60,9611551
urban land occupation - ULOP	m2a	132,107459
natural land transformation - NLTP	m2	29,7906051
human toxicity - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	35947,9028
terrestrial ecotoxicity - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	6,47210647

Diesel	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie	Litre
	Visseuse	0	0	0	0
	Perceuse	0	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0	0
	Plaque diamantée	0	0	0	0
	Scie	0	0	0	0
	Grue	35	17400	366212	10150
	Chariot élévateur	0	0	0	0
	Trans palette	27	17400	282506,4	7830
			Total	648718,4	17980

Eau	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie
	Visseuse	0	0	0
	Perceuse	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0
	Plaque diamantée	40	17400	11600
	Scie	0	0	0
	Grue	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0
	Trans palette	0	0	0
			Total	11600

CVC

Installation

électricité	Engins	Puissance (kW)	Temps d'utilisation (en min)	Énergie
	Visseuse	0,015		0
	Perceuse	0,05	9960	8,3
	Marteau piqueur	1,3	9960	215,8
	Plaque diamantée	1,8	0	0
	Scie	0,5	0	0
	Grue	25	0	0
	Chariot élévateur (Treuil)	0,7	9960	116,2
	Trans palette (élévateurs à fourche)	0	3900	0
			Total	340,3

Impacts	Unités	
resources - depletion of abiotic resources	kg antimony-Eq	38,6756083
acidification potential - generic	kg SO2-Eq	56,7127577
eutrophication potential - generic	kg PO4-Eq	9,62043274
climate change - GWP 100a	kg CO2-Eq	5859,39883
land use - competition	m2a	18,9497351
ecosystem quality - land occupation	points	5,80382455
urban land occupation - ULOP	m2a	11,9112489
natural land transformation - NLTP	m2	2,88587012
human toxicity - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	3464,55822
terrestrial ecotoxicity - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	0,61388451

Diesel	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie	Litre
	Visseuse	0	0	0	0
	Perceuse	0	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0	0
	Plaque diamantée	0	0	0	0
	Scie	0	0	0	0
	Grue	35	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0	0
	Trans palette	27	3900	63320,4	1755
			Total	63320,4	1755

eau	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie
	Visseuse	0	0	0
	Perceuse	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0
	Plaque diamantée	40	0	0
	Scie	0	0	0
	Grue	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0
	Trans palette	0	0	0
			Total	0

Menuiseries

Menuiserie

électricité	Engins	Puissance (kW)	Temps d'utilisation (en min)	Énergie
	Visseuse	0,015	12060	3,015
	Perceuse	0,05	12060	10,05
	Marteau piqueur	1,3	1200	26
	Plaque diamantée	1,8	1200	36
	Scie	0,5	0	0
	Grue	25	0	0
	Chariot élévateur (Treuil)	0,7	6600	77
	Trans palette (élévateurs à fourche)	0	12060	0
			Total	152,065

Impacts	Unités	
resources - depletion of abiotic resources	kg antimony-Eq	121,414947
acidification potential - generic	kg SO2-Eq	178,384922
eutrophication potential - generic	kg PO4-Eq	30,2921949
climate change - GWP 100a	kg CO2-Eq	18394,5989
land use - competition	m2a	57,4674655
ecosystem quality - land occupation	points	18,0042083
urban land occupation - ULOP	m2a	35,5662397
natural land transformation - NLTP	m2	9,05642556
human toxicity - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	10835,1796
terrestrial ecotoxicity - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,89941474

Diesel	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie	Litre
	Visseuse	0	0	0	0
	Perceuse	0	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0	0
	Plaque diamantée	0	0	0	0
	Scie	0	0	0	0
	Grue	35	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0	0
	Trans palette	27	12300	199702,8	5535
			Total	199702,8	5535

eau	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie
	Visseuse	0	0	0
	Perceuse	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0
	Plaque diamantée	40	20	13,3333333
	Scie	0	0	0
	Grue	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0
	Trans palette	0	0	0
			Total	13,3333333

Sanitaires

Sanitaires

électricité	Engins	Puissance (kW)	Temps d'utilisation (en min)	Énergie
	Visseuse	0,015	0	0
	Perceuse	0,05	0	0
	Marteau piqueur	1,3	1200	26
	Plaque diamantée	1,8	0	0
	Scie	0,5	0	0
	Grue	25	0	0
	Chariot élévateur (Treuil)	0,7	5400	63
	Trans palette (élévateurs à fourche)	0	10860	0
			Total	89

Impacts	Unités	
resources - depletion of abiotic resources	kg antimony-Eq	107,172876
acidification potential - generic	kg SO2-Eq	157,477311
eutrophication potential - generic	kg PO4-Eq	26,7433742
climate change - GWP 100a	kg CO2-Eq	16236,9024
land use - competition	m2a	50,6262322
ecosystem quality - land occupation	points	15,8816329
urban land occupation - ULOP	m2a	31,3039209
natural land transformation - NLTP	m2	7,99394041
human toxicity - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	9562,17383
terrestrial ecotoxicity - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,67524033

Diesel	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie	Litre
	Visseuse	0	0	0	0
	Perceuse	0	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0	0
	Plaque diamantée	0	0	0	0
	Scie	0	0	0	0
	Grue	35	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0	0
	Trans palette	27	10860	176322,96	4887
			Total	176322,96	4887

eau	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie
	Visseuse	0	0	0
	Perceuse	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0
	Plaque diamantée	0	20	0
	Scie	0	0	0
	Grue	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0
	Trans palette	0	0	0
			Total	0

Sols et revêtements

Revêtements

électricité	Engins	Puissance (kW)	Temps d'utilisation (en min)	Énergie
	Visseuse	0,015		0
	Perceuse	0,05	12300	10,25
	Marteau piqueur	1,3	12300	266,5
	Plaque diamantée	1,8	5820	174,6
	Scie	0,5	0	0
	Grue	25	0	0
	Chariot élévateur (Treuil)	0,7	6600	77
	Trans palette (élévateurs à fourche)	0	12300	0
			Total	528,35

Impacts	Unités	
resources - depletion of abiotic resources	kg antimony-Eq	121,652637
acidification potential - generic	kg SO2-Eq	178,585585
eutrophication potential - generic	kg PO4-Eq	30,3127381
climate change - GWP 100a	kg CO2-Eq	18430,5701
land use - competition	m2a	58,5517895
ecosystem quality - land occupation	points	18,1322335
urban land occupation - ULOP	m2a	36,4444964
natural land transformation - NLTP	m2	9,0753534
human toxicity - HTP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	10872,8502
terrestrial ecotoxicity - TAETP 100a	kg 1,4-DCB-Eq	1,91487075

Diesel	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie	Litre
	Visseuse	0	0	0	0
	Perceuse	0	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0	0
	Plaque diamantée	0	0	0	0
	Scie	0	0	0	0
	Grue	35	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0	0
	Trans palette	27	12300	199702,8	5535
			Total	199702,8	5535

eau	Engins	Consommation (L/h)	Temps d'utilisation (en min)	Energie
	Visseuse	0	0	0
	Perceuse	0	0	0
	Marteau piqueur	0	0	0
	Plaque diamantée	40	5820	3880
	Scie	0	0	0
	Grue	0	0	0
	Chariot élévateur	0	0	0
	Trans palette	0	0	0
			Total	3880

Compléments pour les Métamorphoses

Trajectoires de solarisation équilibrées

Méthodologie et cheminement de la recherche

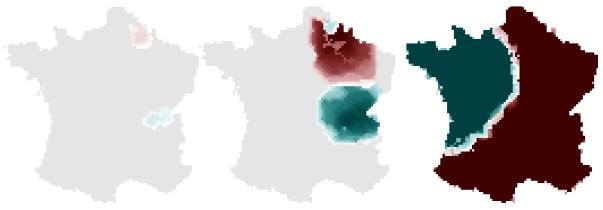
L'objectif de cette partie de la recherche est de proposer un remembrement des régions françaises basé sur la recherche d'une adéquation entre offre et demande énergétique.

Afin d'effectuer ce redécoupage du territoire français, deux types d'approches différentes ont été mis en place : utilisation de données ponctuelles, carroyées ou issues de simplification géographiques, et recours direct aux limites administratives existantes.

Automates cellulaires et diagrammes de Voronoï

Un carroyage permet un traitement de données spatiales simplifié, du fait de la régularité des relations de voisinage notamment. Il sera donc utilisé par notre premier algorithme de recherche de solutions, un automate cellulaire à critère de transition multiple, construisant les régions de proche en proche à partir de cellules d'initialisation, dans une approche purement bottom – up.

Notre deuxième algorithme utilise lui une approche top – down, lui donnant la capacité de travailler aussi bien avec des données carroyées que des données ponctuelles non organisées dans une grille : un diagramme de Voronoï vient se superposer à elles, et un algorithme génétique optimise les paramètres libres à la recherche d'un découpage optimum.



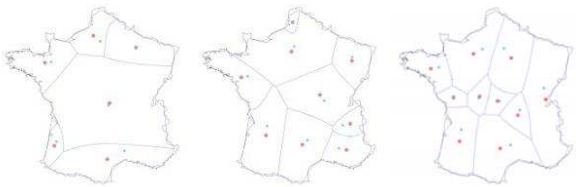
Evolution de l'automate cellulaire pour deux régions, à N = 100, 1000 et 10000 itérations

Les résultats obtenus par convergence sont mitigés, les problèmes allant de l'obtention de formes peu réalistes pour les régions, devenant discontinues ou de tailles relatives disproportionnées, à des blocages autour de situations sous-optimales.

L'ajout de critères de respect de conditions particulières est possible, telles que la minimisation du moment d'inertie en terme de population (pour garantir une certaine compacité des régions formées) ou la recherche d'une convergence vers une taille fixée (pour éviter l'explosion de taille ou la disparition des régions).

Ces contraintes s'ajoutent cependant au prix d'une forte dégradation de la performance de l'algorithme pour ce qui est de son objectif initial, la réduction des écarts entres les ratios.

La perte d'information ayant lieu lors du carroyage des données ou de la simplification des entités territoriales à leur centroïdes s'est révélée préjudiciable à la pertinence des résultats produits : les algorithmes ne voient pas de problème à découper les agglomérations ou à produire des formes peu réalistes pour des régions.



Evolution du diagramme de Voronoï à N = 5, 10 et 20 itérations

Optimisations « administratives »

La dernière méthode consiste donc à partir des limites administratives existantes, plus dans la perspective de leur redistribution entre les différentes régions que dans l'objectif d'une remise à plat complète du découpage du territoire français.

Un algorithme glouton est mis ici en place pour évaluer la succession optimale de transactions entre les régions pour la recherche de solutions, venant appuyer l'utilisateur de manière interactive lors de sa réattribution des départements aux régions.

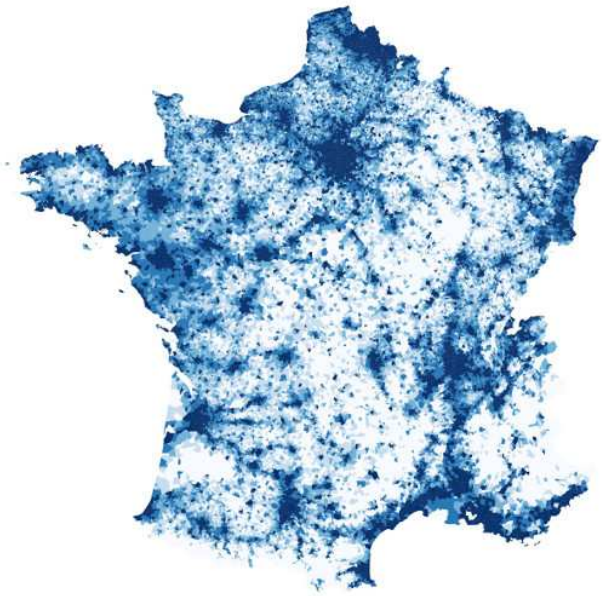
En combinant la capacité de calcul de l'algorithme et la capacité de l'utilisateur à intégrer de multiples facteurs à son analyse, tels que la forme, la taille, ou encore la viabilité politique des régions, les résultats obtenus deviennent alors plus satisfaisants.

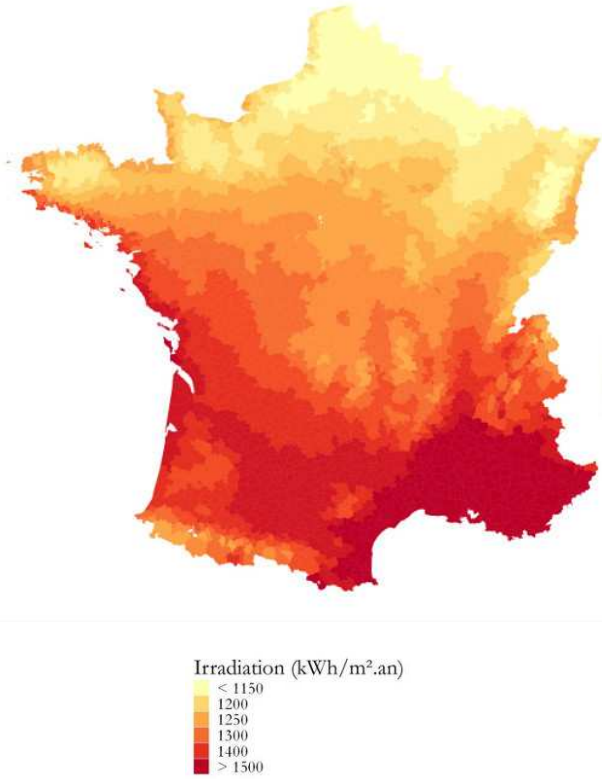
Données et hypothèses

Les données géographiques utilisées sont issues de la base GEOFLA de l'IGN[333], contenant la géométrie et les informations administratives des cantons (département et région de rattachement, ainsi que population et superficie).

A l'aide du logiciel SIG open source QGIS, cette base est croisée avec la carte de l'irradiation moyenne annuelle fournie par le projet PVGIS du Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne[334] : chaque canton se voit attribuer une irradiation moyenne annuelle, avec laquelle est calculée l'offre potentielle solaire.

Evolution de l'optimisation administrative à N = 5, 10 et 20 itérations



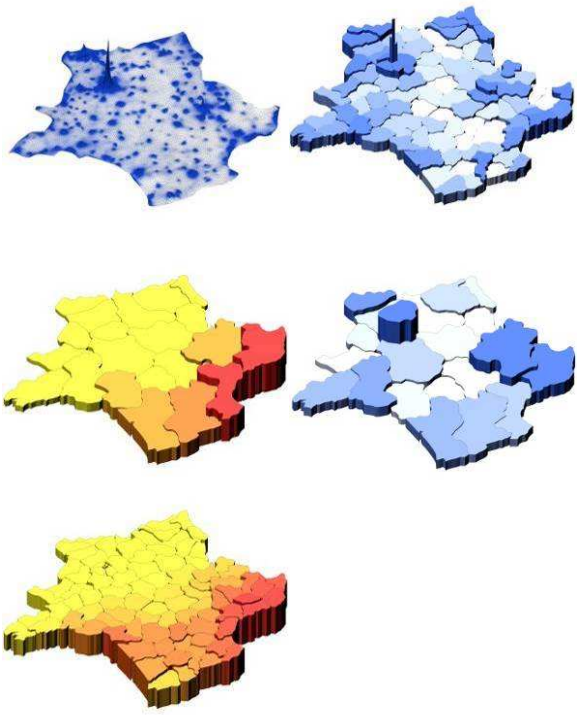


[333] http://professionnels.ign.fr/geofla
[334] (http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/

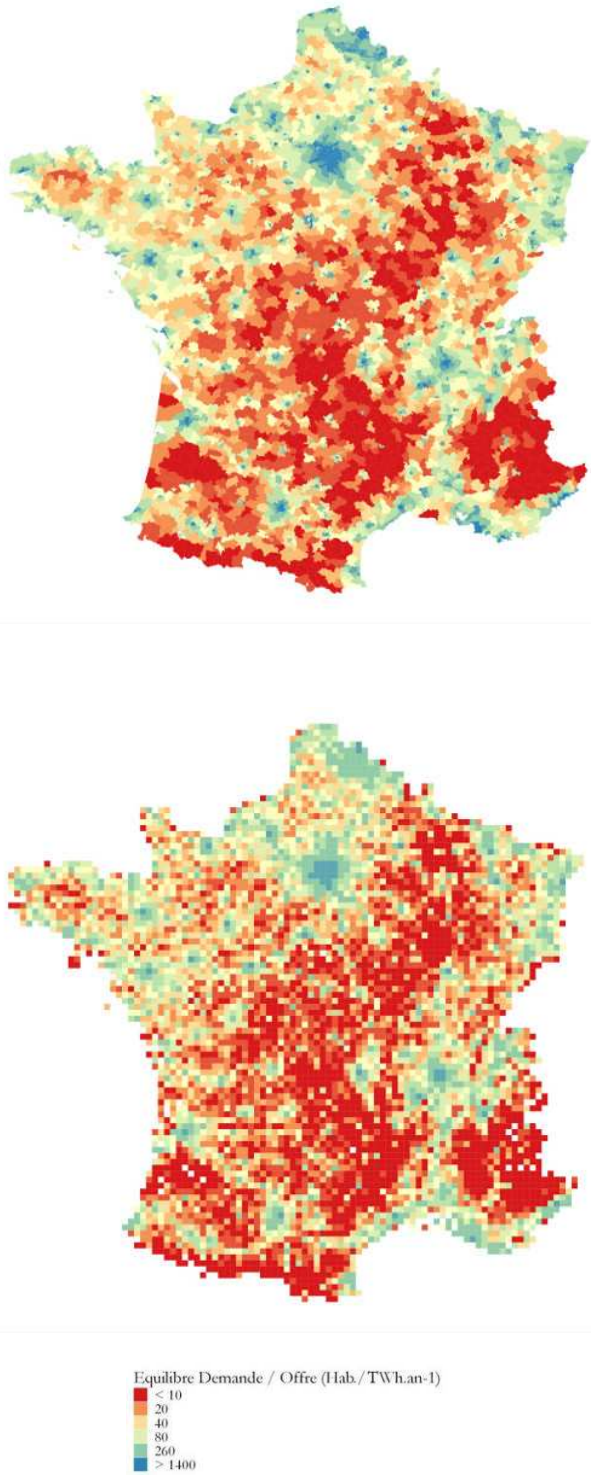
Le choix de l'échelle du canton est issu du compromis entre la précision du maillage des données d'irradiation et la taille des entités administratives, dont dépendra la qualité de la jointure spatiale effectuée. Les données sont ensuite agrégées à l'échelle des départements, pour être traitées par l'algorithme d'optimisation "administrative". Pour les deux premiers algorithmes, qui prennent pour entrées des données ponctuelles ordonnées sous forme de grille, un re-carroyage, est effectué sur les données de population de la base GEOFLA, et les données d'irradiation PVGIS.

Nous faisons dans un premier temps l'hypothèse que la consommation d'énergie est proportionnelle à la population des territoires : il s'agit d'une forte approximation, mais qui permet de travailler directement avec les données robustes (éventuellement historiques et prospectives) de la démographie française fournies par l'INSEE.

L'offre correspond à la totalité de l'énergie solaire interceptée par la surface, qui correspondrait à la couverture de la totalité du territoire de panneaux fonctionnant à un rendement de 100%. Les aspects de distribution de l'énergie ne sont pas pris en compte ici. L'équilibre étudié, caractérisé par le ratio demande sur offre correspond donc ici plus à un nombre d'habitant par quantité d'énergie solaire disponible sur un territoire donné, à une époque donnée, qu'à un réel équilibre offre / demande.



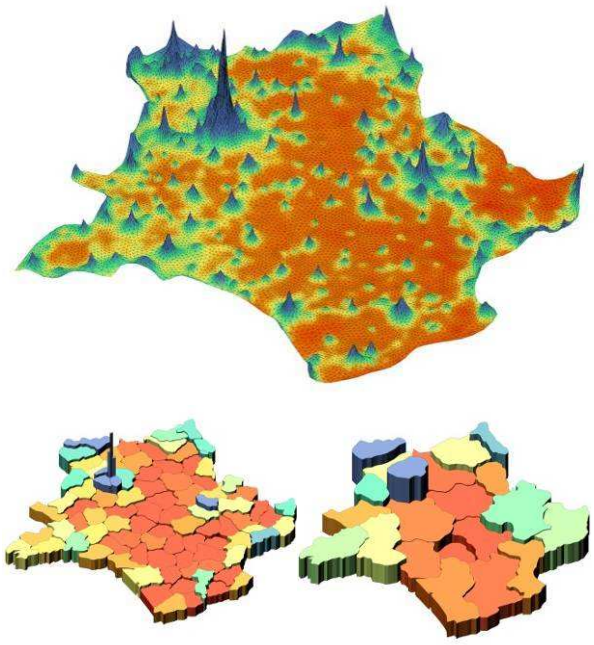
Cartes issues du traitement des données de la base GEOFLA et PVGIS



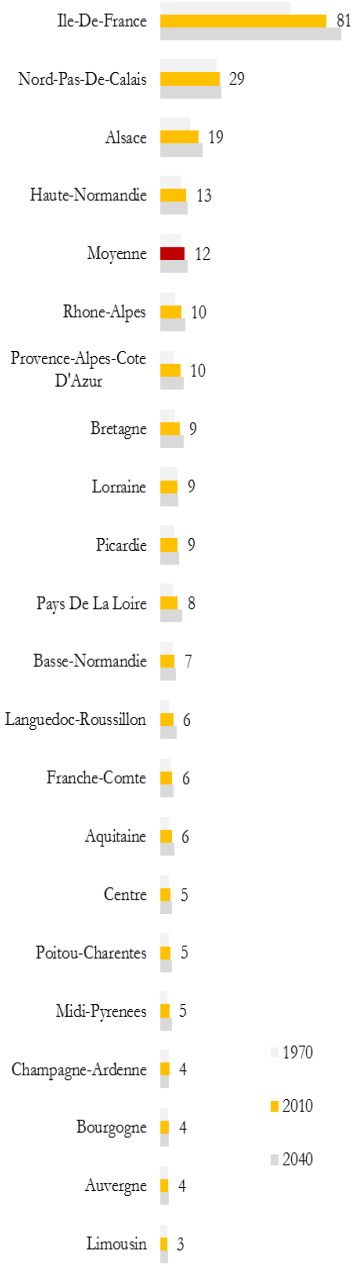
Carte cantonale et carroyage de l'équilibre entre demande (nombre d'habitants) et offre (gisement solaire)

Chaque algorithme tentera de minimiser l'écart entre les ratios des régions, par des mesures de la dispersion de leur dispersion (écart type, moyenne des différences…).

La convergence des ratios sera étudiée à l'aide du coefficient de variation « sigma sur mu », qui caractérise de manière normalisée la dispersion. A l'état initial des régions françaises, présenté ci-dessous, ce coefficient est de 140% et sera à comparer aux résultats présentés par la suite.



Cartographie 3D de l'équilibre offre demande



Classement des régions selon l'équilibre Offre / Demande (Hab. / GWh.an) aux décades 1970, 2010, 2040

Algorithmes de remembrement

Automates cellulaires

A partir d'un territoire français vierge de toute région, N cellules d'initialisation sont choisies aléatoirement parmi les cellules du carroyage des données, pour N régions créées. Itérativement, chaque région évalue l'impact sur son ratio demande sur offre du rattachement d'une des cellules voisines.

Chaque région est dotée d'une stratégie d'agrégation des cellules : une région ayant un ratio inférieur au ratio moyen des régions cherchera à agréger des cellules faisant augmenter son ratio, et vice versa. Le choix d'une cellule sera donc basé sur l'évaluation des scores des cellules adjacentes, basés sur la propension des cellules à faire évoluer le ratio de la région r_i dans le sens de la stratégie choisie.

Il est possible de moduler ces scores, pour faire prendre en compte à l'algorithme un facteur de forme. Une cellule adjacente est alors également évaluée par rapport à sa proximité avec toutes les autres cellules de la région, et par son impact sur le moment d'inertie de la région (calculé d'après la répartition spatiale de sa population).
Un compromis est à trouver manuellement pour garantir des formes de régions correctes, tout en garantissant une certaine convergence des ratios.

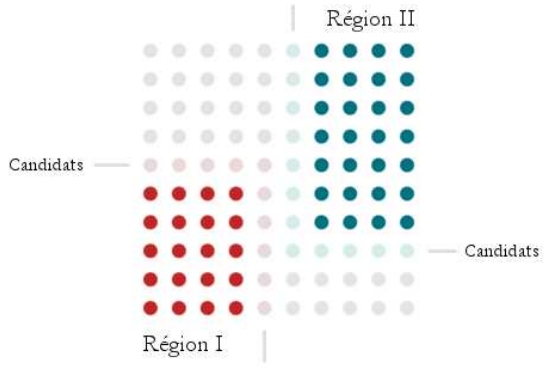
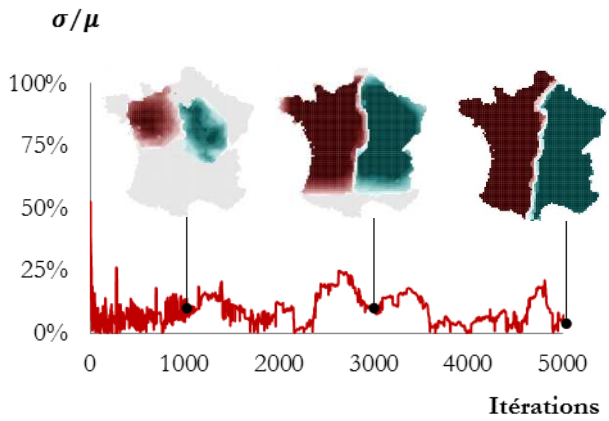


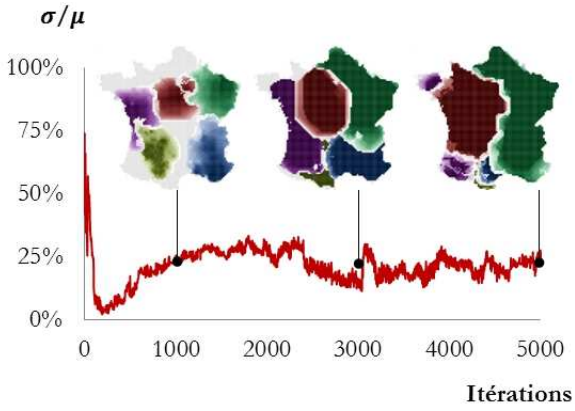
Schéma de principe de formation des régions pour l'automate cellulaire

La convergence du découpage n'est jamais atteinte : chaque région ne "voient" pas les autres et s'attribuent les cellules qui maximisent leur écart au ratio, sans savoir si la transaction va en réalité dégrader l'écart type entre les ratios de manière globale. Une bonne convergence des ratios est elle atteinte périodiquement, comme le montre l'évolution du rapport $\frac{\sigma}{\mu}$ présentée ci-dessous pour 2 et 5 régions.

Certaines transactions ont un effet tellement important sur le ratio des régions (pour les cellules de la région parisienne par exemple) que certains groupes de cellules sont systématiquement rattachés puis relâchés.
Les régions peuvent également se couper en deux et prendre des formes non contiguës, puisqu'elles ne se prennent mutuellement pas en compte.

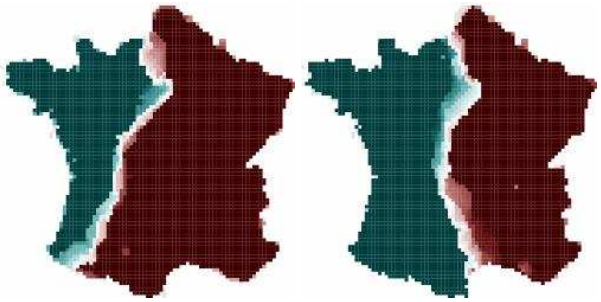


Evolution du coefficient de variation pour deux régions suivant le nombre d'itérations

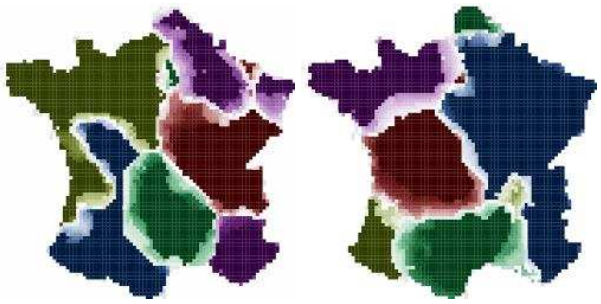


Evolution du coefficient de variation pour cinq régions suivant le nombre d'itérations

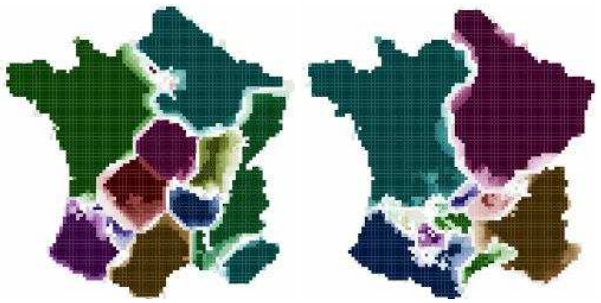
Afin de garantir le dynamisme du processus de découpage et accélérer la convergence des ratios, les cellules les moins bien évaluées par la fonction score de l'algorithme sont "relâchées" (remises en territoire non attribué). La prise en compte du moment d'inertie dans le score permet alors de rejeter les cellules trop éloignées du centre de gravité des populations de la région, produisant des formes plus compactes.



Forme des découpages obtenus pour 2 régions (coefficient de variation 10 - 20 %)



Forme des découpages obtenus pour 5 régions (coefficient de variation 15 - 25 %)



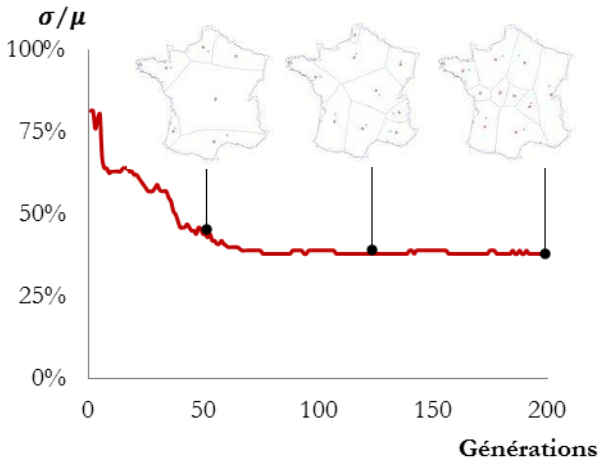
Forme des découpages obtenus pour 10 régions (coefficient de variation 15 - 25 %)

Diagrammes de Voronoï

A partir des N pics de population formés par les grandes agglomérations françaises, un diagramme de Voronoï prend ces points comme points d'initialisation, auxquels sont affectés des poids arbitraires, formant un premier découpage. En agrégeant les données de population et d'irradiation du carroyage à l'aide de ce découpage, les ratios demande sur offre peuvent être calculés.

L'algorithme fait alors varier itérativement les poids des points servant au calcul du diagramme de Voronoï, ce qui a pour effet de modifier les découpages, et donc de faire évoluer les ratios. L'algorithme adopte alors un comportement de type "génétique", chaque découpage effectué étant évalué par l'écart type des ratios, et les itérations devant minimiser le coefficient de variation de la distribution des ratios des régions.

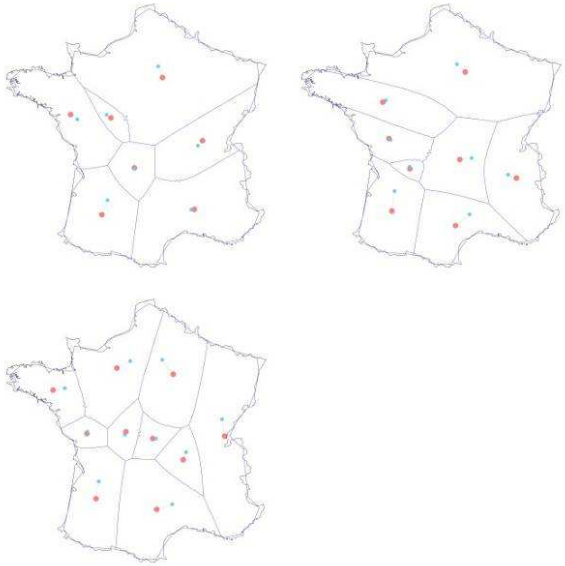
Le système converge vers un équilibre possible des découpages rapidement, en environ 50 itérations. On observe cependant de nombreux découpages équivalents en termes de coefficients de variation, aux formes différentes.



Evolution de la médiane du coefficient de variation, pour chaque génération de l'algorithme génétique

L'algorithme tend à équilibrer les ratios, mais se bloque systématiquement lorsque deux régions fortement peuplées, qui doivent s'étendre pour améliorer leur situation, rentrent en contact (typiquement le Nord Pas de Calais et l'Île de France). On observe également des découpages très tranchés, aux formes très droites, passant parfois par les centres des agglomérations, parisienne notamment.

Afin de débloquer l'algorithme, la possibilité de déplacer les points servant à calculer le diagramme de Voronoï a été implémentée : les régions peuvent s'étendre ou se replier, mais aussi se déplacer sur le territoire français. Un degré de liberté supplémentaire a été également donné au système, au niveau du nombre N de régions à partir desquelles faire progresser l'algorithme.



Formes des découpages obtenus
(coefficient de variation : 38 - 39%)

Optimisation « Administrative »

A partir du découpage actuel, chaque région détermine une liste de départements voisins potentiellement rattachables. Ces listes sont agrégées en une liste à l'échelle de la France, puis chaque transaction entre les différentes régions est évaluée par sa capacité à réduire une mesure de l'écart entre les n ratios r_i, ici la moyenne des différences (qui donne une meilleure convergence observée que le rapport max/min ou l'écart type).

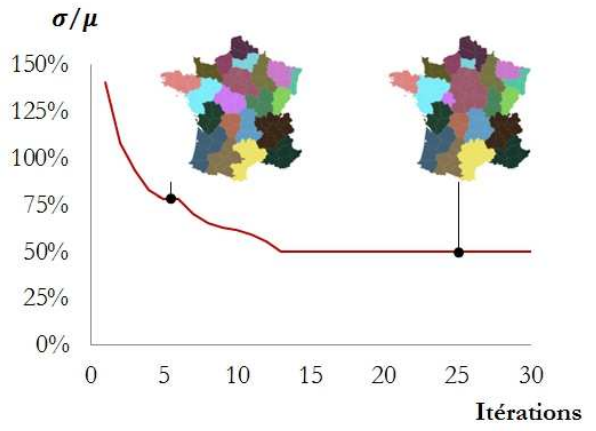
Cette mesure prend ensuite la forme d'un score, à partir duquel la meilleure transaction possible est sélectionnée, sur le modèle de l'algorithme glouton. Les transactions résultant en une région composée de départements non adjacents (retrait de l'Hérault au Languedoc Roussillon, par exemple) sont filtrées et rendues impossibles.

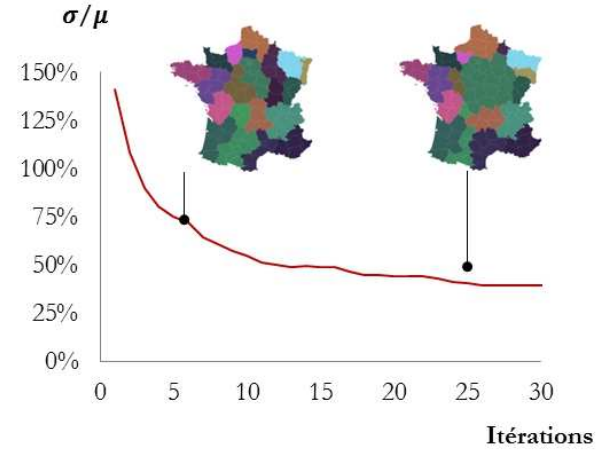
Il est possible de moduler le score plus ou moins par une mesure du degré d'adjacence du département candidat (un département n'ayant qu'un voisin dans la région serait de degré 1, ayant deux voisins dans la région serait de degré 2…). Il est également possible de limiter la taille des régions, ou de leur donner une taille minimum. Ces ajouts permettent de privilégier des formes de région compactes et proportionnées, mais se font au détriment de la performance. Par itération, les écarts entre les ratios tendent alors à diminuer, et permettent une sélection de découpages optimisés.

Une convergence rapide est observée, avec un rapport $\frac{\sigma}{\mu}$ passant de 140% à moins de 50% environ en quelques dizaines d'itérations. Un réglage fin des paramètres de la fonction score des transactions doit cependant être effectué à la main, ces paramètres ayant beaucoup d'influence sur la forme des solutions calculées : un compromis entre convergence des ratios et formes des régions doit ainsi être trouvé.

La succession de transactions est un processus déterministe, pour une fonction score donnée : la transaction optimale de chaque état du système est toujours la même, à partir de l'état initial correspondant au découpage actuel des régions. L'algorithme peut donc converger vers un minimum local et se bloquer, avec une transaction faisant passer un département d'une région à l'autre, puis à l'itération suivante, la transaction inverse.

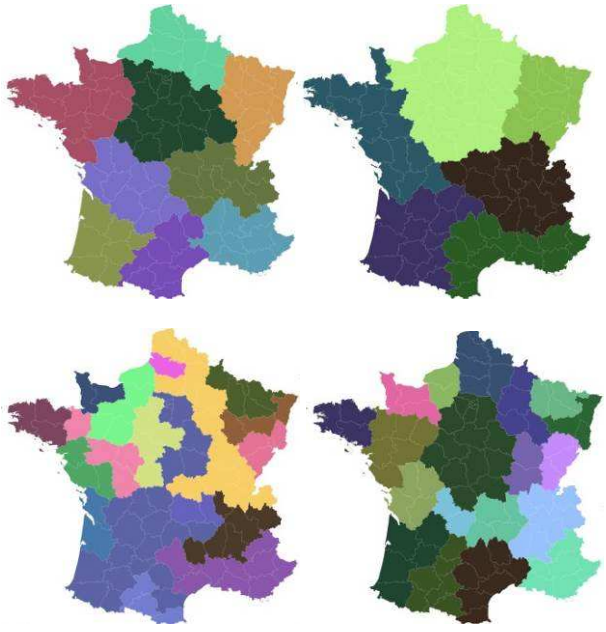
Une autre difficulté est la tendance de l'algorithme à produire des régions de forme politiquement peu réalistes, notamment du fait de l'Île de France qui doit absorber de nombreux départements avant de retrouver un ratio comparable aux autres régions : certaines régions deviennent très grandes et étirées, d'autres ne comptent plus qu'un département.





Afin d'éviter les blocages de l'algorithme, deux stratégies sont proposées. Une mémoire des transactions effectuées est créée, afin d'éviter les optimums locaux lors de la recherche (contrainte de type "No U-Turn"). Au lieu de sélectionner la meilleure transaction à chaque itération, chacune des transactions reçoit une probabilité d'être sélectionnée proportionnelle à sa propension à faire converger le système (ou selon une loi arbitraire de puissance, pour favoriser les bons candidats). Le processus devient alors stochastique et empruntant un chemin dans l'espace des paramètres différents à chaque recherche de solutions.

Vu le nombre de facteurs à prendre en compte pour produire un découpage à la fois performant et réaliste, dont de nombreux facteurs qualitatifs tels la centralité de certains départements dans les régions, ou la viabilité de certains découpages, une collaboration entre l'utilisateur et l'algorithme est mise en place (convergence "assistée"). De manière interactive, pour chaque itération, l'algorithme propose sa transaction optimale, que l'utilisateur peut réaliser ou choisir d'ignorer pour imposer sa transaction.



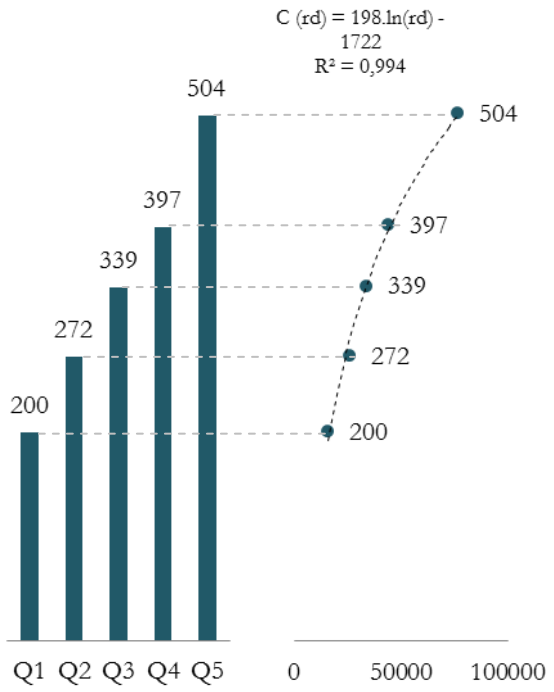
Formes des découpages obtenus
(coefficients de variation, de haut en bas et de gauche à droite : 40%, 35%, 5%, 45%)

Cartographie de la demande énergétique

Méthodologie et cheminement de la recherche

En première approche, nous faisions l'hypothèse que la consommation d'énergie est proportionnelle à la population des territoires. Afin d'affiner nos résultats, nous proposons d'évaluer la demande sur la base d'une étude (Nouvelles représentations de l'énergie, Cahier du Club d'Ingénierie Prospective et Environnement) qui lie niveau de revenu des ménages, différencié par quintile, et consommation énergétique (en faisant l'hypothèse que cette consommation n'a pas évolué par rapport aux données de base de l'étude).

En croisant les données de recensement de l'INSEE avec les résultats de cette étude, nous obtenons une consommation énergétique des cantons et des départements. L'étude du CLIP citée lie les niveaux de revenu à la consommation d'énergie primaire des ménages, différenciée par quintile de revenu disponible. Afin de pouvoir effectuer une projection de ces résultats, de nombreuses hypothèses et approximations sont effectuées, les résultats étant à interpréter comme des ordres de grandeur.



Consommation d'énergie primaire par jour et par ménage, par quintile de revenu disponible en euros (kWh/menage.jour)

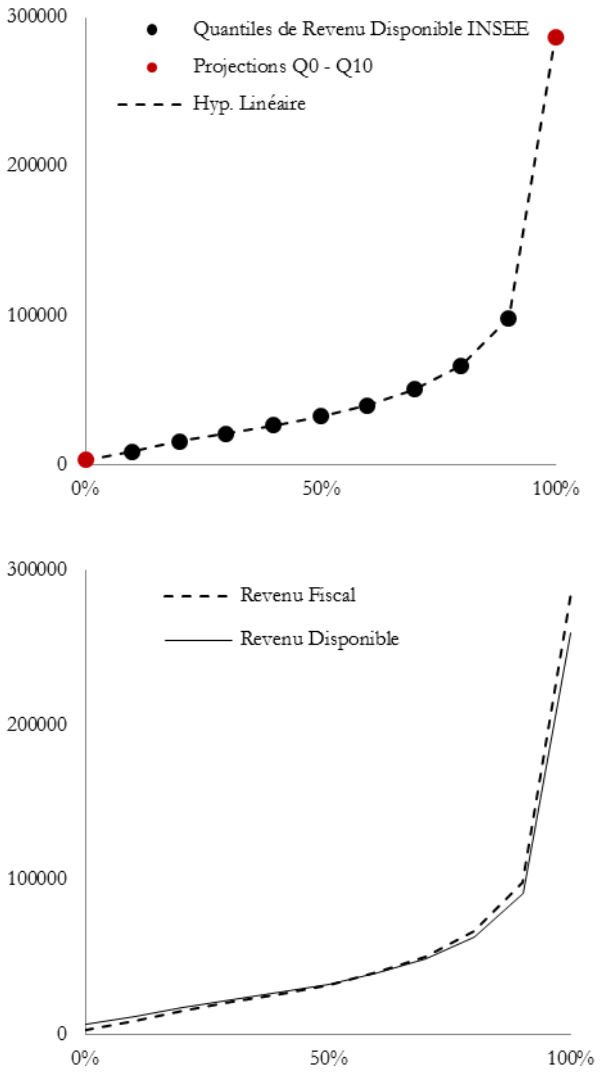
Nous ne disposons que de 5 points pour effectuer la régression entre revenu et consommation énergétique, le modèle sera donc assez performant pour des valeurs moyennes de revenu comprises entre le minimum et le maximum des valeurs de revenu de l'étude, mais sera a priori peu précis pour des points s'éloignant de cet intervalle.

Aux niveaux administratifs cantonal et départemental, nous disposons du revenu fiscal de référence des ménages[335] : pour passer au revenu disponible, une loi de régression linéaire est déterminée sur la base de données nationales[336], puis appliquée à l'échelle locale, en supposant donc que les mécanismes de redistribution et d'imposition sont homogènes sur le territoire français.

De plus, nous ne disposons pas de la description de la distribution de revenus fiscaux complète, mais seulement des quantiles 1 à 9, de la moyenne et de l'écart type de cette distribution. Afin de construire un revenu moyen par quintile tel qu'utilisé dans l'étude, la connaissance de la distribution devrait être complète (du revenu minimum au revenu maximum, et pas seulement le centre de la distribution) et très fine (par pas de 1% environ, au lieu de 10%) pour pouvoir procéder par intégration.

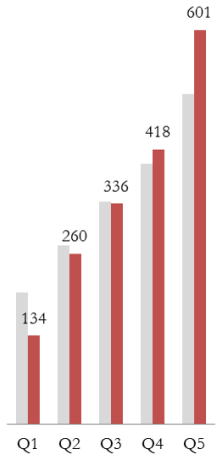
[335] http://www.insee.fr/fr/themes/detail.asp?reg_id=99&ref_id=base-cc-rev-fisc-loc-menage
[336] http://www.insee.fr/fr/themes/document.asp?reg_id=0&id=3658

A partir d'une hypothèse forte de linéarité entre les niveaux des quantiles, et de la connaissance de la moyenne et de l'écart type de la distribution, les valeurs de revenu maximum et minimum, peuvent être approximées, mais ne sont pas utilisables, le revenu minimum étant systématiquement négatif. Nous choisissons donc de fixer le revenu minimum à une valeur arbitraire (à 50% de la valeur du Q1), puis de fixer la valeur du revenu maximum pour respecter uniquement la moyenne de la distribution.

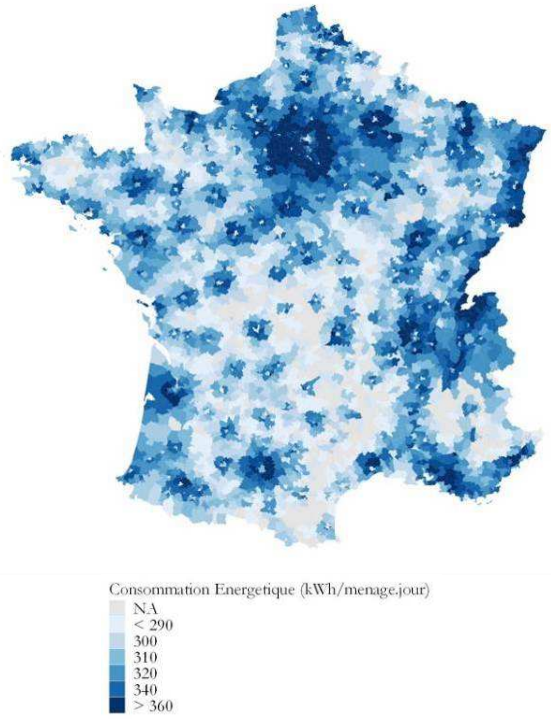


Hypothèses et projections sur la distribution du revenu fiscal du canton-ville de Paris (en Euros), et passage du revenu fiscal au revenu disponible.

Le revenu moyen est ensuite calculé pour les cinq quantiles, pour chaque canton, et injecté dans la loi de consommation déduite de l'étude du CLIP, pour déduire les consommations énergétique de chacun des quantiles, pour chaque canton au niveau national.



Consommation d'énergie primaire par jour et par ménage, par quintile de revenu disponible en euros, pour le canton-ville de Paris (kWh/menage.jour) (valeurs de l'étude du CLIP en gris)

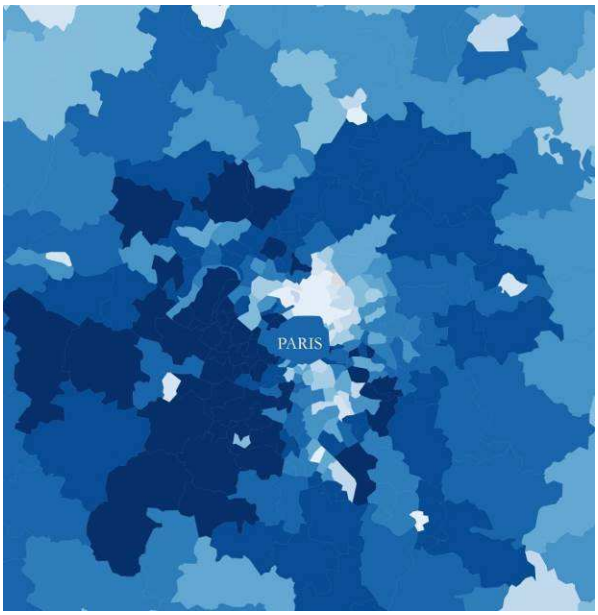


Consommation énergétique primaire moyenne par jour par ménage (kWh/menage.jour)

La cartographie de la demande énergétique primaire ainsi créée reflète les découpages socio-économiques du territoire : les centres villes se différencient nettement de leur couronne péri-urbaine, et les lignes de partage des agglomérations entre zones riches et pauvres apparaissent (par exemple pour la région parisienne, avec une nette opposition entre Est et Ouest).

Il est probable que les différences entre les consommations réelles des ménages urbains et péri-urbains soient encore plus marquées en réalité. En effet, la base de nos calculs utilise une étude nationale ne prenant en compte les besoins en transport que de manière agrégée, et donc potentiellement réaffectés à tous les ménages : il serait nécessaire différencier parmi les ménages les types de transports utilisés, voiture individuelle et transports en commun notamment.

Cette approche en énergie primaire, qui prend donc en compte l'énergie grise de tous les processus liés aux consommations des ménages, permet néanmoins de créer une cartographie de la demande "relocalisée". Si l'énergie n'était exportable que sur de très courtes distances et que chaque territoire devait devenir autonome pour sa production d'énergie et de biens, la distribution des consommations en France aurait cet aspect, avec des agglomérations très consommatrices malgré des centres systématiquement en retrait.



Consommation énergétique primaire moyenne par jour par ménage en région parisienne : apparition du clivage Nord – Est / Sud – Ouest (kWh/menage.jour)

Glossaire

Analyse de cycle de vie (ACV)

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.

Agent (énergétique)

Territoire défini par une emprise spatiale et une comptabilité énergétique. Voir géonergie.

Aérogénérateur

Ou éolienne. Voir éolien.

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.

Autarcie

Etat d'un territoire qui n'échange pas de flux d'énergie avec les autres territoires.

Automate cellulaire

Objet mathématique et informatique unitaire (type cellule d'une grille) évoluant selon des règles très simple. Les évolutions sont des générations auxquels sont appliquées les règles.

Autonomie

Etat d'un territoire n'ayant pas besoin d'échanges d'énergie avec les territoires environnants pour couvrir ses besoins.

Biomasse

Energie primaire disponible sous forme de matières organiques.

Carnot (cycle de)

Cycle thermodynamique théorique le plus efficace pour obtenir du travail à partir de deux sources de chaleur de températures constantes.

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 u.a. (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. Sur Terre elle est de : 1 360,8 W/m².

Contenu urbain

Désigne la population présente sur un territoire, calculée à partir du taux d'occupation réel dans l'intervalle d'établissement du bilan énergétique. Associé aux variables intensives *d* (densité de population) et *e* (emprise individuelle dans le bâti).

Contenant urbain

Désigne l'espace bâti d'un territoire accueillant le contenu urbain. Associé aux variables intensives *c* (coefficient d'emprise du bâti) et *h* (nombre de niveaux du bâti).

Degré-jours

Le nombre de degrés jours unifiés (Dju) est déterminé en faisant la différence entre la température de référence, par exemple 18 °C, et la moyenne de la température minimale et la température maximale du jour considéré.

Demande énergétique

Flux d'énergie nécessaire au fonctionnement et au développement du territoire tant du point de vue du contenant que du contenu.

Démolition sélective

Méthode de démolition permettant le réemploi de l'énergie et des matériaux stockés par le contenant urbain (bâtiments, infrastructures…).

Densité urbaine

Cette quantité mesure la densité d'occupation de la surface urbaine. La densité est une mesure instantanée ou moyennée.

$$d = \frac{n_{individus}}{m^2_{sol}}$$

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.

Emprise bâtie

De façon générale, sera considérée comme « emprise bâtie» tout ce qui possède un toit, qui créé une ombre et une protection partielle à la pluie. Est associé à la variable *c* dans la *Formalisation.*

Emprise énergétique

Total des énergies nécessaires à la réalisation/satisfaction d'un usage qui permet de lier les consommations finales à l'ensemble du besoin énergétique qu'elles créent.

Energie 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.

Energie grise

Voir énergie incorporée.

Energie mécanique

Energie d'un système emmagasinée sous forme d'énergie cinétique et/ou d'énergie potentielle mécanique. C'est une quantité conservée lorsqu'aucune force extérieure n'intervient dans le système

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.

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.

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).

Fossile (énergie)

Energie primaire disponible produite à partir du soleil ancien et stockée sur terre depuis des milliers d'année (charbon, pétrole et gaz)

Géothermique (énergie)

Energie issue de l'activité interne du globe terrestre, disponible sous forme de chaleur.

Géonergie

Discipline étudiant les caractéristiques spatiales et temporelles de l'utilisation d'énergie des territoires à l'aide d'une comptabilité énergétique, exergétique et anergique : étude des sources d'énergies primaires, des niveaux de consommation, des relations avec l'environnement et des relations entre territoires.

Hydrocarbures

Composés organiques formés exclusivement d'atomes de Carbone et d'Hydrogène, dont les hydrocarbures fossiles, stockés dans la croûte terrestre, font partie (pétrole, gaz, charbon…).

Information

Tout objet dont peuvent être dérivés mesures quantitatives ou faits qualitatifs, relatifs à un sujet. Voir néguentropie

Irradiation terrestre

Quantité d'énergie issue du rayonnement solaire reçue par la terre.

« Maximum Entropy Production » (Principle of)

Ce principe stipule que le cheminement entre deux niveaux d'énergie d'un système se fait par celui maximisant l'entropie, pour atteindre le niveau d'entropie maximale stipulé par le principe d'entropie maximale. Voir François Roddier en bibliographie

Mix énergétique

Répartition des sources d'énergies primaires (combustibles fossiles, rayonnement solaire, énergie thermique terrestre…) consommées pour la production des différents types d'énergie consommés (électricité, chaleur).

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.

Offre énergétique

Quantité d'énergie disponible pour un territoire sous forme de solaire récent directement accessible dans l'espace du territoire. Peut aussi comprendre pour certains territoires les énergies renouvelables non solaires : géothermie profonde et énergie marémotrice.

Permanence énergétique

Pour un système (territoire), point d'équilibre énergétique atteint lors de l'égalité entre l'*offre* énergétique, c'est-à-dire le solaire récent, et la *demande* énergétique, c'est-à-dire la consommation du système étudié.

Puissance

Quantité d'énergie par unité de temps. Généralement exprimée en Watt.

Régime permanent

Régime énergétique d'un territoire en état de permanence énergétique, qui consomme au plus l'énergie disponible dans son offre de solaire récent (aucune ponction sur le stock n'est donc réalisée).

Résilience

Capacité d'un territoire à s'adapter aux changements de son environnement afin de garantir son fonctionnement et son développement continu.

Sankey (diagramme)

Diagramme de représentation de circulation et de distribution de flux dans lequel le volume de ces flux est figuré par la largeur des flèches.

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.

Stock (de différents termes)

Quantité d'énergie à la disposition d'un territoire pour couvrir ses besoins énergétiques, hors apports renouvelables.

Voronoï (diagrammes de)

Décomposition d'un espace métrique à partir d'un nombre discret de points. Chaque point se voit affecter une partition de l'espace constituée de l'ensemble des points plus proches de ce point particulier que de tous les autres points.

Bibliographie

Ouvrages, thèses et articles

Généralités sur environnement, climat et énergie

- Banerje R et al., *Global Energy Assessment. Toward a Sustainable Future,* International Institute for Applied Systems Analysis, Cambridge University Press, 2012
- Commissariat général au développement durable, *Chiffres clés de l'énergie*, édition 2012.
- de Rosnay, Joël, *Le macroscope. Vers une vision globale*, Seuil coll. "Points", 1975
- Descola, Philippe, *Par-delà nature et culture*, Paris, Gallimard, 2005.
- Diamond, Jared, *De l'inégalité parmi les sociétés : Essai sur l'homme et l'environnement dans l'histoire*, Paris, Gallimard, 2000, [éd. amér.1997].
- Henson, Robert, *The Rough Guide to Climate Change*, Londres, 2006.
- Hollnagel, Erik et Woods, David D., *Resilient Engeenering : Concept and Precept*, Ashgate, 2006.
- Jancovici, Jean-Marc, *C'est maintenant ! : 3 ans pour sauver le monde*, Seuil, coll. « Points », 2009.
- Jonas, Hans, *Pour une éthique du futur*, Paris, Payot, 1997.
- Larrère, Catherine et Raphaël, *Du bon usage de la nature : Pour une philosophie de l'environnement*, Paris, Flammarion, coll. « Champs », 2009 [Aubier, 1997].
- Lovins, Amory, Hunter, B. et L., von Weizsäcker, Ernst, *Facteur 4, Rapport au club de Rome*, Mens, Terre vivante, 1997.
- MacNeill J. R., *Something New Under the Sun: An Environmental History of the Twentieth-Century World*
- McKay David, *Sustainable Energy Without the Hot Air*, UIT Cambridge, 2009
- Meadows Donella, Meadows Dennis, Randers Jorgen. *Les Limites de la Croissance (dans un monde fini).* Édition Rue de l'échiquier, mars 2012.
- MVRDV et Huet, Sylvestre, Climax, catalogue d'exposition à La Grande Halle de la Villette, Adam Biro-Cité des sciences-Carré, 2003.
- Prigogine, Ilya, Stengers, Isabelle, *La Nouvelle Alliance, Métamorphose de la science,* Gallimard, coll. « Folio », 1986 [1979].
- 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
- Salomon Thierry, *Manifeste NégaWatt*, coédition Actes Sud/Colibris - Collection : Domaine du possible, janvier 2012.
- Salomon, Thierry, Jedliczka, Marc, Association Négawatts, Changeons d'énergie, Transition, mode d'emploi, Arles, Actes Sud, 2013.
- Schwartz, Peter et Randall, Doug, *Rapport secret du Pentagone sur le changement climatique*, Paris, Allia, 2006.
- Singh Madanjeet, *L'énergie solaire, comment vivre en paix avec la nature*, 1998
- Smil, Vaclav, *Energy Myth and Realities: Bringing Science to the Energy Policy Debate*, Washington, AEI Press, 2010.
- Wilson, William G., Constructed Climates, a Primer on Urban Environnments, Chicago, University Of Chicago Press 2011.

Visualisation, représentations de la complexité et métabolisme

- Barles Sabine, *Bilan de matières brutes, Haute-Garonne, 2006 ; méthode dérivée de la méthode Eurostat*, 2009 & 2011
- 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 Sabine, *Urban Metabolism of Paris and Its Region, Journal of Industrial Ecology*
- Brinton Willard C., *Graphic Presentation*, 1939
- Brunner Paul H., Rechberger Helmut, *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, draft, 2003
- Hausmann, Hidalgo et al., *The Atlas of Economic Complexity*

Thermodynamique et exergie

- A. Kleidon R.D. Lorenz (Eds.), *Non-Equilibrium thermodynamics and the Productionof Entropy, Life, Earth, and Beyond*, Springer
- Balocco C., Papeschib S., Grazzinia G., Basosib R., *Using exergy to analyze the sustainability of an urban area*, Ecological Economics 48 (2004) 231–244
- Cochet Yves, *Economie et Thermodynamique* dans Cosmopolitiques n°9, juin 2005
- Ertesvag Ivar S., *Energy, exergy, and extended-exergy analysis of the Norwegian society* 2000
- Gong Mei,Wall Göran, *On exergy and sustainable development—Part 2: Indicators and methods*, Exergy Int. J. 1(4) (2001) 217–233, 2001
- Roddier François, *Thermodynamique de l'évolution, un essai de thermo-bio-sociologie*, Parole Editions, 2012
- Sciubba Enrico, *A brief Commented History of Exergy From the Beginnings to 2004*, Int. J. of Thermodynamics, Vol. 10 (No. 1), pp. 1-26, March 2007

Offre : généralités sur les énergies renouvelables

- Boyer, J. S. (1982). *Plant productivity and environment. Science*, 218 (4571) :443–448.
- EPIA, *Solar Photovoltaics, Competing in the energy sector, on the road to competitiveness*, European Photovoltaic Industry Association, 2011

- European Commission, *Concentrating solar power – from research to implementation*, 2007[337]
- European Photovoltaic Industry Association (EPIA), *Solar Generation 6: Solar Photovoltaic Energy Empowering the World,* EPIA, Brussels, 2011
- European Wind Energy Association, *Wind Energy - The Facts: Volume 1 Technology*, EWEA, Brussels, 2004
- Ferry Robert, Monoian Elizabeth, *A field guide to renewable energy technologies,* Land Art Generator Initiative[338], 2012
- Freeston, D. H,. *Direct uses of geothermal energy* 1995[339]
- Gipe, Paul, *Le grand livre de* l'éolien, Le Moniteur, 2006
- GlobalData, *Small Wind Turbines- Global Market Size, Analysis by Power Range, Regulations and Competitive Landscape to 2020*, GlobalData, Denmark, 2011
- INES, *Quelles sont les perspectives technologiques en solaire photovoltaïque*, 2011.
- International Energy Agency (IEA) (2010), *Technology Roadmap: Concentrating Solar Power*, IEA, Paris[340].
- International Energy Agency, *Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy*, IEA, OECD, Paris, 2010
- IPCC, *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, Cambridge University Press, 2012
- IRENA, *Concentrating Solar Power, Renewable energy technologies : cost analysis series*, Juin 2012
- IRENA, *Solar photovaïcs, Renewable energy technologies : cost analysis series*, Juin 2012
- IRENA, *Wind power, Renewable energy technologies : cost analysis series*, Juin 2012
- Layzell, D. B., Stephen, J., et Wood, S. M., *Exploring the potential for biomass power in Ontario*[341]. 2006
- Lhomme, JC, *Les énergies renouvelables*, ed Delachaux et Nieslé, 2004
- Massachusetts Institute of Technology. *The future of geothermal energy*[342], 2006
- Mazria, Edward, *Le Guide de l'énergie solaire passive*, Marseille, Parenthèses, 1979
- McKay, David J. C., *L'Energie durable, pas que du vent*, Oxford, De Boeck, 2012.
- NREL, *Concentrating Solar Power Projects Database*, US Department of Energy[343], 2012
- Royal Commission on Environmental Pollution, *Biomass as a renewable energy source*, 2004[344].
- Solar Paces, Estela, Greenpeace, *Concentrating Solar Power*, Global Outlook 09, Why Renewable Energy is Hot
- Weller B., Hemmerle C ;, Jakubetz S., Unnewehr S, *Photovoltaics Technology Architecture Installation*, Edition Detail, 2010
- Zhu, X.-G., Long, S. P., et Ort, D. R. *What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass ?* Current Opinion in Biotechnology, 19 :153–159, 2008.

[337] www.solarpaces.org/Library/library.htm
[338] http://landartgenerator.org/LAGI-FieldGuideRenewableEnergy-ed1.pdf
[339] geoheat.oit.edu/bulletin/bull17-1/art1.pdf
[340] http://www.iea.org/papers/2010/csp_roadmap.pdf
[341] www.biocap.ca/files/Ont_bioenergy_OPA_Feb23_final.pdf.
[342] geothermal.inel.gov/publications/future_of_geothermal_energy.pdf
[343] http://www.nrel.gov/csp/solarpaces/by_country.cfm
[344] www.rcep.org.uk

Stocks : généralités sur les stocks à différents termes[345]

- Chevalier, Jean-Marie, Derdevet, Michel et Geoffron, Patrice, *L'Avenir énergétique : Cartes sur table*, Gallimard, coll. « Folio », 2012.
- Church, R. A., Hall, A., et Kanefsky, J. *The history of the British coal industry. Vol. 3, 1830–1913 : Victorian pre-eminence*. Clarendon, Oxford, 1986
- Cochet Yves, *Pétrole Apocalypse*, Fayard, 2005
- Herring, J., *Uranium and thorium resource assessment.* In C. J. Cleveland, editor, Encyclopedia of Energy. Boston University, 2004
- Jancovici Jean-Marc et Grandjean Alain, *Le plein s'il vous plait*, Seuil, 2006
- Wingert Jean-Luc, *La vie après le pétrole, de la pénurie aux énergies nouvelles*, Collection Autrement, 2005

Stocks : focus sur énergie incorporée et géométries

- Bejan Adrian, Lorente Sylvie, *The constructal law of design and evolution in nature*, The Royal Society, 2010
- Beukers et Van Hinte, *Lightness: The Inevitable Renaissance of Minimum Energy Structures*
- Kazazian Thierry, *Design et développement durable : Il y aura l'âge des choses légères,* Victoires Editions, 2003
- Kolokotrones T, Van Savage, Deeds EJ, et coll. *Curvature in metabolic scaling.* Nature 2010, 464:753-6.
- McDonough, William et Braungart, Michael*, Cradle to Cradle. Créer et recycler à l'infini*, Paris, Alternatives, 2011.
- P. Pourouchottamin, C. Barbier, L. Chancel, M. Colombier, *Nouvelles représentations de l'énergie*, Cahier du Club d'Ingénierie Prospective et Environnement, avril 2013
- Valero Delgado Alicia*, Exergy Evolution of the mineral capital on earth*, 2008

Demande : généralités sur architecture et urbanisme[346]

- Antoni Jean-Philippe, Fléty Yann, Vuidel Gilles, de Sède-Marceau Marie-Hélène, *Vers des indicateurs locaux de performance énergétique : les étiquettes énergétiques territoriales. Une première approche à partir de l'estimation des mobilités quotidiennes*, 2009
- Arantes, Laetitia, *L'Intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située, thèse de doctorat*, ADEME/CSTB/Navier (dir. Olivier Baverel), fin 2012.
- Banham, Reyner, *L'Architecture de l'environnement bien tempéré*, Marseille, Parenthèses, 2011 [1969].

[345] Comprend à la fois les stocks énergétiques à très long terme (solaire ancien et la question de la déplétion des stocks d'hydrocarbures) mais aussi les stocks à court et moyen terme à la fois réversible (par exemple les stockages de chaleur intersaisonnier) comme à court terme.
[346] Certains de ces ouvrages comprennent évidemment des réflexions plus globales sur l'adéquation offre-stock et demande à l'échelle du projet architectural et urbain.

- Borasi, Giovanna et Zardini, Marko, *Désolé plus d'essence. L'Innovation architecturale en réponse à la crise pétrolière de 1973*, Montréal, CCA, 2007.
- Chatelet Alain (dir.), *Architecture climatique. Une contribution au développement durable* ; Tome 1, Bases physiques (avec Brejon, Paul et Fernandez, Pierre) ; Tome 2, Concepts et Dispositifs (avec Fernandez, Pierre et Lavigne, Pierre) Aix-en-Provence, Edisud, 1994 et 2000.
- Daniels, Klaus, *The Technology of Ecological Building: Basic Principles and Measures, Examples and Ideas*, Bâle, Birkhäuser, 1997.
- Dutreix, Armand, *Bioclimatisme et Performances énergétiques des bâtiments*, Paris, Eyrolles, 2010.
- Fernández-Galiano, Luis, *Fire and Memory: On Architecture and Energy*, Cambridge (Mass.), The MIT Press, 2001.
- Friedman Yona, *L'architecture de survie*
- Gonzalo, Roberto et Habermann, Karl J., *Architecture et Efficacité énergétique*, Bâle, Birkhaüser, 2008.
- Hegger, Manfred, Fuchs, Matthias, Stark, Thomas et Zeumer, Martin, *Construction et Energie : Architecture et Développement durable*, Lausanne, PPUR, 2011.
- Heschong Lisa, *Architecture et Volupté thermique*, Marseille, Parenthèses, 1981 [1979].
- Hopkins Rob, *Manuel de transition, de la dépendance au pétrole à la résilience locale*, 2010
- Id. et Schwaiger, Elizabeth, *Advanced Building Systems: a Technical Guide for Architects and Engineers*, Bâle, Birkhäuser, 2003.
- Kim, *Consommation énergétique, Paris 1801-2002*, 2012
- Liebard, A., De Herde, A. 2005. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*. éditions du Moniteur. 778 pages
- Lopez Fanny, *Déterritorialisation énergétique 1970-1980 : de la maison autonome à la cité auto-énergétique, le rêve d'une déconnexion*, 2010
- Masboungi, Ariella (dir.), *Projets urbains durables. Stratégies*, Paris, Le Moniteur, 2012.
- Maïzia Midjid, *Topologie urbaine : l'énergie de la ville*, mémoire HDR de l'UTC, 2008
- Mostafavi, Mohsen (dir.), *Ecological Urbanism*, Baden, Lars Müller Publishers-Harvard University Graduate School of Design, 2010.
- Olgyay, Victor, *Design with Climate, A Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*, Princeton, Princeton University Press, 1963
- Peuportier, Bruno, *Eco-Conception des bâtiments et des quartiers*, Paris, Presses de l'Ecole des Mines, 2008.
- Salat, Serge, *Les Villes et les Formes, sur l'urbanisme durable*, Paris, Hermann éditeurs, 2011.
- Salat, Serge, *The sustainable Design Handbook - China*, Paris, CSTB, 2006.
- Schittich, Christian (dir.), *Solar Architecture*, Münich, Détail, 2003.
- Souami, Taoufik, *Ecoquartiers et urbanisme durable*, Paris, La Documentation française, 2010.
- 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.
- Van der Ryn, Sim et Stuart Cowen, *Ecological Design*, Washington, Island Press, 1996.
- Vigano, Paola, *Les Territoires de l'urbanisme, Le Projet comme producteur de connaissance*, Genève, MetisPresses, 2012.
- Wright, David, *Manuel d'architecture naturelle*, Marseille, Parenthèses 2004.

Demande : focus sur formes urbaines

- Bettencourt Luís M. A., Jose Lobo, Dirk Helbing, Christian Kühnert and Geoffrey B. West, *Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities*, PNAS, April 2007
- CETE Normandie-Centre DEIOA, *Densité de population et morphologie du bâti*
- Charmes E., *Effet de mode ou solution durable ? La densification en débat*, Etudes foncières, n°145, mai-juin 2010
- Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme, *Habitat formes urbaines, Densités comparées et tendances d'évolution en France*, 2006
- Fouchier V., *Les densités urbaines et le développement durable, le cas de l'Ile-de-France et des villes nouvelles*, Edition du SGVN, December 1997
- Frankhauser Pierre, *La formation fractale des tissus urbains, Cahiers de géographie du Québec*, vol. 42, n° 117, 1998, p. 379-398.
- Kennedy C., Steinberger, J., Gasson, B., Hansen Y., Hillman, T., Havranek, M., Pataki, D., Phdungsilp, A., Ramaswami, A., Villalba Mendez, G., *Greenhouse Gas Emissions from Global Cities*, Environ. Sci. Technol. 2009, 43, 7297–7302
- Knowles, Ralph L., *The Solar Envelope: its meaning for energy and buildings*, Energy and Buildings, n°35, 2003, pp.15-25.
- Louail Thomas, *Comparer les morphogenèses urbaines en Europe et aux Etats-Unis par la simulation à base d'agents. Approches multi-niveaux et environnements de simulation spatiale.*
- 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 urbain*s, PUCA, 2010
- Menard R., *Dense Cities in 2050 : The Energy Option ?*, Summer Study Proceedings, ECEEE, juin 2011, 15 pages

Demande : focus sur alimentation

- Billen Gilles, *Empreinte alimentaire de Paris, Paris 2030*, 2009-2011, Laboratoire Sisyphe CNRS

Demande : focus sur mobilités

- Ademe, *Les transports électriques en France : un développement nécessaire sous contraintes*, Ademe &Vous, Stratégie & études, n°21, 21 juillet 2009
- Allaire J., *Choisir son mode de ville : Formes urbaines et transports dans les villes émergentes* , Les cahiers de Global Chance - N° 21 - mai 2006
- Breheny.M, *The compact city and transport energy consumption*, Transactions of the Institute of British Geographers, Volume 20, Number 1, March 1995 , pp. 81-101
- CCFA, *Tableau de bord automobile,* Premier trimestre 2009
- Frank L. D., Pino G., *Impacts of mixed use and density on utilization of three modes of travel : single occupant vehicle, transit and walking*, Transportation Research 1466, 1994, pp. 44-52.
- Grazi. F, Van den Bergh JCJM, *Spatial organization, transport, and climate change: Comparing instruments of spatial planning and policy*, Ecological Economics 67 (2008) 630 – 639
- Hickman.R, Banister.D, *Transport and reduced energy comsumption: what role can urban planning play?*, Transport Studies Unit Oxford University Centre for the Environment – Working paper N°1026 September 2007
- Lefèvre.B, *Long-term energy consumptions of urban transportation: A prospective simulation of' transport–land uses policies in Bangalore*, pour Benoit Lefevre PhD thesis, defended in December 2007 - Energy Policy (2008), doi:10.1016/j.enpol.2008.10.036
- Massot M. H, Korsu E., Eynault C., *Lieux de travail, lieux de résidence : figures de leur mise en cohérence et de leurs impacts sur les termes du développement métropolitain durable*, Territoire en mouvement, numéro spécial «Mobilité, Structuration et restructuration des espaces métropolitains », Lille, 2006.
- Morcheoine A., *Transports de marchandises, énergie, environnement et effet de serre*, ADEME, 2006, 26 p.
- Newman P., Kenworthy J., *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook*, Brookfield, Gower Publishing, 1989
- Newman P., Kenworthy J., *Cities and Automobile Dependence: An International Sourcebook*, Brookfield, Gower Publishing, 1989
- Newman P., Kenworthy J.,Urban *Design to Reduce Automobile Dependence*, Opolis , 2006, Opolis, UC Riverside
- Newman P.,Kenworthy J., *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*, 1999, Washington D.C., Island Press
- Newman, P. Kenworthy, J. and Laube, F. (1999) *An International Sourcebook of Automobile Dependence in Cities, 1960 –1990*, Boulder, University Press of Colorado
- Nicolas J.P., Mignot D., *Transport-Environment Issues and Countermeasures in Various Metropolises: Lyon*, in Nakamura H., Hayashi Y., May A. D. (Eds.). Urban Transport and The Environment - An International Perspective, Oxford : Elsevier, 2004. pp. 285-292.
- Nicolas J.P., Verry D., *Indicateurs de mobilité durable : outils d'analyse comparative de la mobilité urbaine* » [CD-ROM]. In : ASRDLF. Villes et territoires face aux défis de la mondialisation –XLI[ème] colloque de l'ASRDLF, 5-7 septembre 2005, Dijon, 2005, 20 p.
- Ntziachristos L., Samaras Z., COPERT III *Computer programme to calculate emissions from road transport*, Methodology and emission factors (Version 2.1), Technical report No 49, ETC/AEM, European Environment Agency, nov. 2000, 86 p.
- Nuissl H, Haase D, Lanzendorf M, Wittmer H, *Environmental impact assessment of urban land use transitions—A context-sensitive approach*
- Orfeuil J.P., *Déplacements, contrainte énergétique et effet de serre : quelques repère pour un débat*, Cahiers de l'IAURIF: Contraintes énergétiques et mutations urbaines, 147, février 2008, pp. 88-98.
- Raux C., Traisnel J.P., Pochet P., Maizia M., Croissant Y., Bagard V., Peguy P.Y. (2006) *Analyse et modélisation des comportements transports-habitat-localisation*s. ETHEL. Rapport R3. Action Concertée CNRS – Ministère de la Recherche. LET, Lyon, septembre 2006, 127 p.
- Roby F., *Vers la voiture sans pétrole* ?, EDP Science, 2006

Vidéos

- Geoffrey West, *The surprising math of cities and corporations*
- François Roddier, *La thermodynamique de l'évolution : du Big Bang aux sciences humaines*, Conférence donnée à l'IAP le 5 octobre 2010[347], par François Roddier, astrophysicien.
- Paine Ch., *Who Killed the Electic Car?*, documentaire long-métrage (USA), 1h32, 2006

Base de données disponibles

Données sur l'offre

- Inventaire mondial des énergies renouvelables, energies-renouvelables.org
- Cartographies par l'Irena, http://irena.masdar.ac.ae/
- Sur la géothermie en France, geothermie-perspectives.fr/
- Technologie de cadastre solaire et plusieurs exemples d'application aux Etats-Unis, en.mapdwell.com
- Sur la biomasse et les ressources mondiales des sols, uved.fr/fileadmin/user_upload/modules_introductifs/module2/site/html/m2c2_m2c2p4_4.htm
- Interactive Visualization and Measurement of Urban Areas http://urbmet.org/

Données sur la demande

- Cartographie mondiale de la demande alimentaire par habitant et par jour, http://knoema.com/gamzxd/food-supply

[347] https://www.youtube.com/watch?v=6lNz5vmKEFA

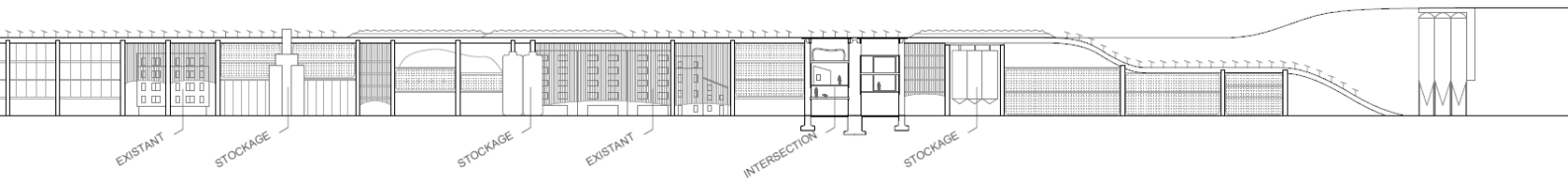
- Cartographie de l'IAU, http://sigr.iau-idf.fr/webapps/visiau/?id_app_visiaurif=32

Synthèse offre-stock-demande

- ETP 2012 data visualisation, IEA, http://www.iea.org/etp/explore/

Autres données

- Infographie sur la densité mondiale, http://persquaremile.com/2011/01/18/if-the-worlds-population-lived-in-one-city/
- Territoire-durable 2030, http://www.territoire-durable-2030.developpement-durable.gouv.fr/
- Sur les silos à grain http://www.lessilosmodernes.fr/
- Le best-of des dataviz sur l'énergie par TSP, http://theshiftproject.org/fr/cet-article/le-best-of-du-dataviz-en-matiere-denergie-et-de-climat
- The World Factbook par la CIA , https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/
- Dashboard de la ville de Londres, http://citydashboard.org/london/


EXISTANT
STOCKAGE
STOCKAGE
EXISTANT
INTERSECTION
STOCKAGE