



HAL
open science

**Ville et sobriété énergétique : agencements
multiscalaires des lieux et des fonctions au service d'un
"thermo-urbanisme"**

Vaclav Stransky

► **To cite this version:**

Vaclav Stransky. Ville et sobriété énergétique : agencements multiscalaires des lieux et des fonctions au service d'un "thermo-urbanisme". Architecture, aménagement de l'espace. Université Paris Est Créteil, 2022. tel-03698094

HAL Id: tel-03698094

<https://hal.science/tel-03698094v1>

Submitted on 22 Jun 2022

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

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



UPEC

Connaissance - Action

**UNIVERSITÉ
PARIS-EST CRÉTEIL
VAL DE MARNE**

UNIVERSITÉ PARIS - EST CRÉTEIL - VAL DE MARNE

ÉCOLE DOCTORALE 528 – VILLE, TRANSPORTS ET TERRITOIRE

DOSSIER D'HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Discipline :

Aménagement de l'espace, urbanisme

Présentée et soutenue par

Vaclav Stransky

le 23 mai 2022

Volume n°1 :

Ouvrage original

Villes et sobriété énergétique :
agencements multiscalaires des lieux et des fonctions
au service d'un « thermo-urbanisme »

Garant :

M. Philippe Menerault, Professeur, Université de Lille

Membres du jury :

M. Laurent Chapelon, Professeur, Université Paul Valéry Montpellier 3

M. Xavier Desjardins, Professeur, Sorbonne Université

Mme Jocelyne Dubois-Maury, Professeure émérite, Université Paris Est – Créteil

Mme Sonia Guelton, Professeure, Université Paris Est – Créteil

Mme Frédérique Hernandez, Directrice de Recherche, Université Gustave Eiffel

M. Jean Laterrasse, Professeur honoraire, Université Paris Est – Marne-la-Vallée

M. Jacques Teller, Professeur, Université de Liège

SOMMAIRE

Introduction

1.- Les sociétés humaines au prisme de l'énergie

1.1.- Une définition de l'énergie

1.2.- Energie et modes de vie

1.3.- Energie et économie

2.- Deux limites amont + Une limite aval = Trois pénuries

2.1.- Pénurie d'énergies fossiles

2.2.- Pénurie de minerais

2.3.- Pénurie de temps

3.- Vers une approche BELT de la gestion des pénuries

3.1.- Un débat ancien : Doomsdayers *versus* Cornucopiens

3.2.- Les impasses de la high-tech face aux trois pénuries

3.3.- L'alternative des low-tech

3.4.- L'approche basse énergie et low-tech en urbanisme : la ville BELT

4.- L'agencement au service d'une ville BELT

4.1.- Une question de besoins

4.2.- Satisfaire les besoins en mode BELT : potentiel de l'agencement

4.3.- Agencer quoi ?

4.4.- Agencer comment ?

4.5.- Décrire l'agencement d'une ville BELT

5.- Le chantier de la ville BELT

5.1.- Cadre général : l'énergie solaire pour un état stationnaire de longue durée

5.2.- AXE 1 : Quels transformateurs naturels pour la ville BELT ?

5.3.- AXE 2 : La sobriété de la ville BELT par ses agencements

5.4.- AXE 3 : Questionner et accompagner la transition vers la ville BELT

Conclusion

Bibliographie

Table des matières

Introduction

Le sujet de ce travail est né d'une rencontre entre une conviction — déjà ancienne — relative à un potentiel, et une prise de conscience — plus récente — relative à une urgence.

Le potentiel est celui de « l'agencement » comme levier pouvant être mis au service d'un dessein. La conviction quant à la valeur opératoire de ce potentiel a été acquise au fil du temps avec la multiplication de travaux explorant cette piste : le potentiel de l'agencement d'une infrastructure viaire pour apaiser la circulation automobile ; le potentiel de l'agencement d'un itinéraire piéton ou cycliste pour encourager les modes actifs ; le potentiel de l'agencement d'un quartier de gare pour augmenter l'attractivité du mode ferré ;...

L'urgence est celle de la question énergétique à l'échelle planétaire. La prise de conscience concerne moins l'épuisement des combustibles fossiles et les conséquences climatiques (thèmes très abordés depuis des décennies) que le contraste saisissant entre, d'un côté, le rôle fondamental que joue l'énergie dans le fonctionnement de l'univers en général et dans celui des sociétés humaines en particulier et, de l'autre, l'occultation dont elle fait l'objet dans les processus décisionnels.

C'est cette rencontre qui motive une réflexion sur des « agencements » de la ville — au sens large et à différentes échelles — susceptibles de limiter sa consommation énergétique.

Il n'est certes pas très original de constater que les villes, et notamment leurs transports (aux infrastructures desquels sont souvent consacrées des surfaces disproportionnées au dépens de patrimoines fonciers, naturel et agricole), absorbent beaucoup de ressources, notamment énergétiques, et rejettent beaucoup de déchets¹ ; l'idée d'étudier les liens entre « **forme urbaine** » et « **durabilité** » n'est pas nouvelle non plus².

Cependant, au regard de l'ampleur des enjeux et du contexte d'urgence face à un avenir énergétiquement très contraint, il s'agit ici de revisiter cette idée en explorant diverses modalités d'agencements d'une ville qui offrent aux habitants le potentiel de (sur)vivre en cas de pénurie sévère, ce qui implique un haut degré d'autonomie, notamment alimentaire. D'une certaine manière, c'est l'acception originelle de la notion de durabilité qui est privilégiée : « *une des premières approches de la ville durable, avant que le terme ne soit établi, porte sur la ville « autosuffisante ». Elle est défendue par David Morris (1982), pour qui le développement auto-suffisant (self-reliance) est un développement qui stimule la capacité à satisfaire localement les besoins fondamentaux.* » (Emelianoff, 2010). Mais au-delà d'une logique « survivaliste » dans l'éventualité d'une situation critique temporaire, c'est la mise en évidence de la contribution de l'agencement d'une ville au potentiel d'adaptation à long terme des modes de vie de ses habitants qui est visée.

Le choix de s'intéresser à une situation de pénurie grave qui n'est aujourd'hui qu'hypothétique conditionne l'approche adoptée. Celle-ci procède d'une démarche de « simulation ». Telle que nous la concevons, cette approche, sous sa forme aboutie, comporte trois étapes en interaction. La première consiste à recenser un ensemble de modalités d'agencements (de différentes

1/ Notamment les travaux sur le métabolisme urbain traitent de ces thématiques (Barles, 2002).

2/ Un des premiers exemples en est la mise en regard par les chercheurs australiens Newman et Kenworthy, il y a plus de quarante ans, de la densité d'une ville en tant que mesure de son étalement (donc une caractéristique relevant de la « forme urbaine ») et de la consommation annuelle de carburant par habitant en tant que mesure de sa « durabilité » (Newman et Kenworthy, 1989).

natures, à différentes échelles) susceptibles³ de rendre possibles, pour les habitants d'une ville, des pratiques peu ou pas dépendantes des énergies fossiles. Ces diverses modalités sont ensuite articulées, selon une logique de complémentarités et de synergies, sous forme de principes d'aménagement mobilisables comme fondement d'une structure qui, par construction, favorise des modes de vie énergétiquement sobres. Des modèles de ville dont l'organisation est conforme à différentes déclinaisons et hiérarchisations de ces principes peuvent enfin être proposés et faire l'objet de simulations (pas forcément informatiques) dans différentes hypothèses de pénuries. Cette approche n'a aucune prétention prédictive, le propos n'étant pas d'affirmer qu'un agencement serait sobre « en soi » ; l'idée défendue est que certaines configurations ont un *potentiel de sobriété* (pouvant —ou non— être mobilisé par les habitants) objectivement supérieur à d'autres et qu'à ce titre, elles peuvent servir de pistes pour rendre la transition énergétique moins douloureuse : en offrant un cadre propice à des changements de pratiques, elles facilitent l'adaptation des modes de vie.

La formalisation d'un tel modèle dépasse néanmoins amplement les ambitions de ce travail, qui s'apparente à une pré-modélisation. Il doit être lu comme une « réflexion d'étape », se situant à la charnière entre un parcours de recherche passé et une intention de recherche future, dont il présente l'argument et la motivation.

Cette réflexion est structurée en cinq chapitres.

D'une certaine manière, le premier chapitre est un plaidoyer pour notre choix de faire de l'**énergie** à la fois l'entrée principale et le fil conducteur de ce travail. Après avoir précisé cette notion — un rappel d'autant plus nécessaire que l'énergie semble faire l'objet de fréquentes confusions et interprétations erronées —, il s'attache à mettre en exergue la place centrale de cette grandeur physique dans les modes de vie des sociétés humaines, une place centrale trop souvent ignorée par nombre de raisonnements économiques qui, en raison de cette « myopie » vis-à-vis de la physique, se retrouvent déconnectés du monde réel et affectent la pertinence des processus décisionnels auxquels ils participent.

Le chapitre 2 rappelle que le sujet de l'énergie est indissociable d'autres questions, celle du climat n'en étant qu'une parmi d'autres. En raison de cette interdépendance, la pénurie d'énergies fossiles entraîne en cascade d'autres pénuries, dont la convergence, combinée à l'urgence climatique, représente un défi sans précédent pour l'humanité. Par-delà ce diagnostic inquiétant, le chapitre cerne les enjeux, les contradictions et les marges de manœuvre liés à la gestion des ressources énergétiques dans ce contexte très contraint, qui invite à examiner des éventualités envisageant le pire et à mener une réflexion sur des réponses **radicales**.

Les éléments de contexte étant ainsi posés, le troisième chapitre développe une réflexion sur la gestion de la pénurie énergétique (et des pénuries afférentes) en identifiant les différentes options envisageables dans l'état actuel des connaissances. A l'issue d'un examen argumenté des alternatives, l'approche par la **sobriété** apparaît comme la seule à ne pas conduire, à terme, à une impasse. Cette approche est ensuite enrichie par des éléments empruntés au concept de low-tech qui permet de préciser des axes de réflexion et des domaines d'action privilégiés, de sorte que la réponse proposée aux pénuries annoncées est une gestion des ressources soutenue par une logique combinant « basse énergie » (BE) et « low-tech » (LT), donc reposant sur une « démarche BELT ». Appliquée au domaine de l'urbanisme, cette approche conduit à cerner la notion de « ville BELT », déclinaison radicale d'une ville énergétiquement sobre et conforme aux principes low-tech.

3/ A différents degrés de fiabilité : observations plus ou moins généralisables, conjectures, indices convergents...

Point d'orgue de ce travail, le chapitre 4, de loin le plus long, s'attache à explorer le potentiel de l'**agencement** à offrir aux habitants la possibilité de satisfaire leurs besoins fondamentaux — idéalement sans recourir aux énergies fossiles—, donc à favoriser la « sobriété BELT » définie au chapitre 3. Il commence par préciser les notions de « besoin » et « d'agencement » avant de traiter successivement deux questions complémentaires : « agencer quoi » et « agencer comment ». Pour la première question, une typologie binaire d'éléments — ou *adresses* — « à agencer » est proposée ; fondée sur le critère de l'énergie, elle opère une distinction entre « adresses naturelle productrices » et « adresses artificielles consommatrices », dont les différentes modalités d'agencements — objet de la seconde question — sont ensuite étudiées et classées en huit « familles », servant de base à une première tentative de caractérisation d'une ville BELT.

Parmi les nombreux questionnements soulevés tout au long de ce travail — qui n'avait pas vocation à apporter des réponses —, certains servent de prétexte à la formulation d'une intention de recherche. Si la réflexion n'est pas suffisamment aboutie pour qu'elle puisse donner lieu à la proposition d'un véritable programme structuré et hiérarchisé, une déclinaison de cette intention en **axes de recherche** est néanmoins présentée ; c'est l'objet du cinquième chapitre.

1.- Les sociétés humaines au prisme de l'énergie⁴

1.1.- Une définition de l'énergie

Dans les media « grand public » — articles, débats, entretiens,... — l'énergie fait souvent l'objet d'une sorte « d'association d'idées ». L'une des plus courantes relève d'un raisonnement de nature économique, où l'énergie est appréhendée à l'aune d'une somme à payer, comme une facture d'électricité ou un plein d'essence. Pourtant, exception faite des ménages les plus modestes⁵, cette facture passe relativement inaperçue, aussi bien dans un budget familial que dans celui d'une entreprise. Par exemple, le montant des « achats d'énergie » de la SNCF — premier consommateur d'électricité et un des premiers consommateurs de carburant en France — ne représente qu'environ 3% de ses charges. Il n'en reste pas moins que si, en termes relatifs, l'importance de sa facture est plutôt secondaire, l'énergie est vitale pour la SNCF : sans elle, les trains ne partent plus.

Ce premier exemple pointe les limites d'une approche économique — plus exactement comptable — qui assimile l'importance d'un facteur à son « poids » en termes monétaires. Tenir un tel raisonnement sur l'énergie est le meilleur moyen de passer à côté de l'essentiel : car que son « coût » relatif soit de 1% ou de 90% du coût total, le monde moderne en est totalement dépendant.

Un autre exemple d'association d'idées assez fréquente ces dernières années — notamment dans nombre de discours officiels — est le recours quasi systématique à l'adjectif « renouvelable » : pas un entretien, pas un débat sur la transition énergétique qui ne vante les vertus des « énergies renouvelables ». C'est pourtant à ces énergies là que l'humanité a eu recours durant toute son histoire, à l'exception des deux derniers siècles où elle a fait exactement l'inverse : le légionnaire (ou l'esclave) bâtisseur de voies romaines, le moulin à eau médiéval, l'animal de trait du laboureur traditionnel ou le vaisseau de ligne du XVIII^e siècle ne « consommaient » que des ressources renouvelables, à la différence de la tractopelle, du moulin électrique, du tracteur ou du porte-conteneurs actuels, « nourris » aux énergies fossiles. L'avantage des ces dernières est qu'une fois extraites, elles sont disponibles à volonté, pilotables, facilement transportables, facilement stockables et capables de fournir des puissances importantes, ce que les énergies solaire et éolienne, diffuses et intermittentes, ne permettent pas (ou pas facilement). Pour donner un ordre de grandeur, 1000 m³ d'air passant à une vitesse de 80 km/h au travers des pales d'une éolienne permettent de récupérer la même quantité d'énergie que celle provenant de la combustion d'une cuiller à café (3 ml) de pétrole⁶, bien plus simple à transporter, utilisable que le vent souffle ou non, et d'un coût bien plus modique, puisque la quantité de travail humain nécessaire pour « extraire » un kWh de l'environnement est 50 à 100 fois inférieure (Jancovici, février 2020). Autant de (très bonnes) raisons qui ont conduit l'humanité à passer des énergies

4/ Ce chapitre s'appuie principalement : - sur plusieurs conférences données par Jean-Marc Jancovici dans diverses formations entre 2018 et 2021, notamment à l'ADEME (Jancovici, 2018), à Sciences Po (Jancovici, 2019), à l'Ecole Centrale de Nantes (Jancovici, février 2020), à l'EIVP (Jancovici, novembre 2020) et à l'INSEAD (Jancovici, janvier 2021) ; - sur les travaux développés dans le cadre du The Shift Project (<https://theshiftproject.org/>), un laboratoire d'idées — ou think tank — créé en 2010 ; - sur différents rapports du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) ou IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) en anglais ; c'est à la version anglaise que nous renvoyons systématiquement en bibliographie, car certains documents ne sont pas disponibles en langue française.

5/ Comme l'a montré le « mouvement des Gilets jaunes » apparu en France en automne 2018.

6/ Sans même évoquer la quantité de pétrole nécessaire à la construction de l'éolienne.

renouvelables aux énergies fossiles, dont la part dans l’approvisionnement mondial est passée, entre 1860 et 2020 (figure 1), de 10% à 80% (dont 31% pétrole, 26% charbon et 23% gaz naturel)⁷ ; en d’autres termes, la révolution industrielle a consisté à mettre au travail des machines fonctionnant aux énergies fossiles, en raison des caractéristiques physiques intrinsèques de ces

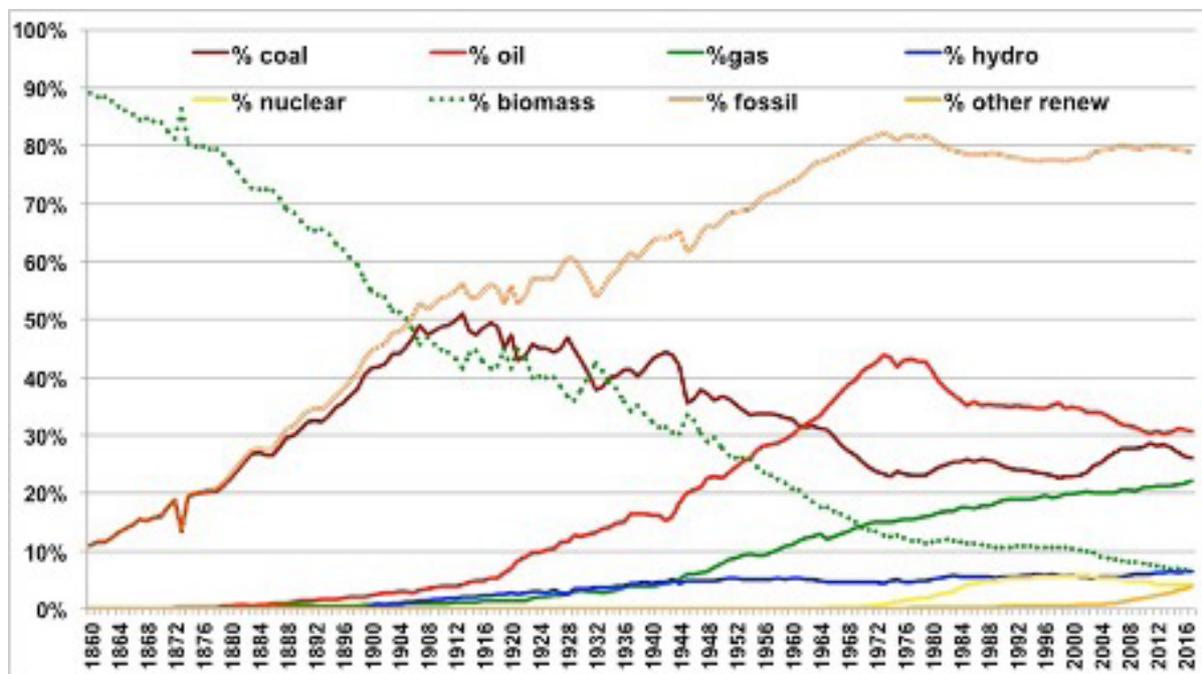


Figure 1 : Part de chaque énergie dans l’approvisionnement mondial.

Calcul de J.-M. Jancovici sur données Shilling *et al.*, BP Statistical Review (Jancovici, février 2020).

dernières, notamment leur densité énergétique⁸.

L’intérêt de ce second exemple est d’attirer l’attention sur un point qui semble souvent occulté dans les débats sur l’énergie : c’est qu’avant d’être un sujet de controverse citoyenne ou un objet de promesses politiques, elle est surtout une grandeur physique.

Parmi ses différentes définitions normatives, nous retenons la suivante : **l’énergie est une grandeur permettant de quantifier⁹ le changement d’état d’un système.**

Dès lors qu’il y a transformation (d’une vitesse, d’une masse, d’une température, de l’état d’un corps dans un champ avec lequel il interagit, etc), de l’énergie entre en jeu.

Dans une vision anthropocentrée opérant une distinction entre l’humain d’un côté, son environnement de l’autre, il nous est impossible de transformer le monde qui nous entoure sans mettre en jeu de l’énergie, de même qu’il est impossible de mettre en jeu de l’énergie sans trans-

7/ Jancovici, février 2020.

8/ Un autre intérêt des énergies fossiles est qu’étant extraites du sous-sol, elles n’entrent pas en concurrence avec différents usages du sol en surface, comme c’est le cas par exemple des énergies provenant de la biomasse (herbe pour nourrir les animaux, bois de chauffage). Le sol est l’objet d’un grand nombre d’usages concurrentiels entre lesquels il est nécessaire d’arbitrer.

9/ L’unité de mesure de l’énergie est le Joule (J). D’autres unités sont utilisées, notamment le Kilowatt-heure (1 kWh = 3 600 000 J = 3,6.10⁶ J) ou la tonne équivalent pétrole (1 tep = 11 630 kWh = 4,187.10¹⁰ J)

former le monde qui nous entoure : l'énergie est une manière de quantifier la transformation de notre environnement. Selon cette même vision, toute transformation s'accompagne d'effets (d'importance proportionnelle à celle de la transformation), dont certains seront considérés comme « bénéfiques », d'autres « indésirables » (la frontière entre les deux pouvant d'ailleurs être subjective et variable), mais allant toujours de pair, comme les deux faces d'une médaille.

En vertu de la loi de conservation (inviolable, comme toute loi physique), l'humain ne crée pas d'énergie : il l'extrait de son environnement (où elle existe déjà) pour l'utiliser à son profit. A cette fin, il a besoin d'un convertisseur capable de récupérer cette énergie pour en faire autre chose. D'ailleurs, l'être humain lui-même est déjà un tel « convertisseur biologique », puisqu'il a la capacité d'aller chercher dans son environnement deux types d'énergie — le rayonnement solaire (par simple exposition) et la nourriture — pour les transformer en chaleur (nécessaire au maintien de sa température corporelle à 37°C) et en travail (l'ensemble de ses activités). Mais il peut aussi mobiliser d'autres convertisseurs à son avantage : convertisseurs biologiques dans un premier temps (animaux domestiques, esclaves), suivis de convertisseurs inanimés qui, par leur aptitude à transformer d'autres formes d'énergie (éolienne, hydraulique), augmentent sa capacité d'action sur l'environnement (moulin à eau, moulin à vent, marine à voile) ; enfin, cette capacité d'action est démultipliée une nouvelle fois avec l'avènement des machines, c'est-à-dire de convertisseurs inanimés en métal (machines à vapeur puis moteurs à combustion interne) capables d'exploiter d'autres sources d'énergie encore : le bois (en tant que combustible), le charbon (qui a sauvé les forêts européennes), suivi d'hydrocarbures et d'uranium. Toutes les ressources naturelles qui viennent d'être évoquées « contiennent » de l'énergie, appelée énergie primaire¹⁰ (énergie initiale d'un produit non transformé) ; l'énergie secondaire est la quantité d'énergie restante à l'issue d'une transformation (dans une centrale thermique, par exemple, environ un tiers de l'énergie primaire est récupérée sous forme d'électricité, le reste se transformant en chaleur¹¹) ; l'énergie finale est l'énergie arrivant au point de consommation (après transformation et après transport), prête à être « consommée » ; enfin, l'énergie utile est celle qui procure le service recherché¹².

L'objet de ce bref développement sur les convertisseurs est d'attirer l'attention sur un abus de langage — ou tout au moins un raccourci — trop fréquent, consistant à assimiler les humains à des « consommateurs » d'énergie, alors qu'en réalité, ils mobilisent à leur profit des machines qui convertissent l'énergie en « service » (par exemple un travail). D'une certaine manière, utiliser une machine revient, pour l'humain, à se doter d'une prothèse ou d'un « exosquelette » (Jancovici, 2018) qui démultiplie les capacités de son corps à agir sur son environnement. La machine est l'esclave des temps modernes, nourri (directement ou indirectement) de ressources naturelles que l'humain lui-même ne peut consommer. Énergie et machine sont indissociables : l'expression « utiliser de plus en plus d'énergie » signifie en réalité « mobiliser de plus en plus de machines » (et/ou des machines de plus en plus puissantes).

Donnons quelques ordres de grandeur de la « capacité à transformer le monde » de ces exosquelettes comparativement à celle de l'humain. Un travailleur manuel ou un sportif peut

10/ Pour donner un ordre de grandeur, la consommation mondiale d'énergie primaire en 2019 était de 14 Gtep (milliards de tonnes équivalent pétrole), dont 84% d'énergies fossiles (33% pétrole, 24% gaz naturel, 27% charbon).

11/ En thermodynamique, on appelle *dissipation* cette transformation en chaleur. Cette dernière diffère des autres formes d'énergie en ce qu'elle ne peut pas être intégralement convertie en une autre forme (mécanique, électrique, chimique,...).

12/ Par exemple, dans une ampoule à incandescence, 5% seulement de l'énergie électrique finale est récupérée sous forme de lumière, le reste part en chaleur.

développer, pendant plusieurs heures d'affilée, une puissance de l'ordre de 10 W avec ses bras, 100 W avec ses jambes (un cycliste, par exemple). La puissance d'un aspirateur équivaut donc à une quinzaine de cyclistes ; appuyer sur un bouton dans l'ascenseur revient à en faire pédaler une cinquantaine ; on passe à quelques centaines de cyclistes avec un tracteur, quelques milliers avec une semi-remorque, quelques dizaines de milliers avec un train ; un engin de travaux publics (de type tractopelle) développe la même puissance que plusieurs milliers de paires de bras ; quant au Boeing 747, il multiplie par dix millions la puissance des bras du pilote.

Ces exosquelettes ont besoin d'être nourris (généralement en hydrocarbures ou en électricité). Un litre d'essence « contient » environ 10 kWh, qu'une machine « sait » convertir en 2 à 4 kWh d'énergie mécanique (selon le rendement), soit l'équivalent d'une à dix semaine de labeur intensif d'un travailleur manuel (selon qu'il mobilise ses bras ou ses jambes). Il ne reste plus qu'à mettre en regard le prix du litre d'essence et une à dix semaines de salaire du travailleur, même s'il n'est payé qu'au smic...

Ainsi, recourir aux énergies fossiles revient à recourir à des entités ayant une capacité de transformation du monde considérablement supérieure à la nôtre, et pour beaucoup moins cher¹³.

1.2.- Energie et modes de vie

Aujourd'hui, chaque terrien « consomme » un peu plus de 20 000 kWh par an (moyenne mondiale¹⁴) ; cette valeur représente en réalité la quantité « d'aliments pour machines » (énergies fossiles à plus de 80%) dont il nourrit son exosquelette (Jancovici, 2018). L'énergie mécanique pouvant être fournie en un an par un travailleur manuel étant comprise entre 10 et 100 kWh, tout se passe comme si chaque terrien avait à sa disposition 200 à 2000 « esclaves énergétiques »¹⁵. Une telle profusion de main d'œuvre à disposition de chacun d'entre nous ne peut qu'affecter profondément nos modes de vie.

Il y a deux siècles, la population française est composée aux deux-tiers d'agriculteurs. Cela signifie qu'à cette époque, chaque agriculteur est physiquement à même de se nourrir lui-même, plus une demi-personne qui peut avoir une autre occupation. Pour faire face à l'augmentation de la population, la seule possibilité est alors d'augmenter la surface cultivée au détriment de la forêt (en 1850, l'Europe passe par un minimum avec une couverture forestière qui tombe à 15% contre 25% aujourd'hui). A partir de la moitié du XIX^e siècle, le nombre d'agriculteurs se met à diminuer en raison de l'accroissement de la productivité dû aux machines qui commencent à être mises à leur service. Dans un premier temps, avec les débuts de l'industrialisation, elles fournissent colliers de trait, charrettes, cerclages de roues, charrues, etc... en quantité croissante à l'agriculteur, qui commence ainsi à étoffer son exosquelette, ainsi que celui de ses auxiliaires animaux. Plus tard, les machines au service de l'agriculture se diversifient : certaines sortent dans les champs où elles remplacent les animaux de trait¹⁶, d'autres, très puissantes, fabriquent massivement engrais chimiques et produits phytosanitaires ; en trois décennies (1945 – 1975),

13/ Même l'esclave (qui ne perçoit pas de salaire, mais doit néanmoins être nourri, logé, soigné) revient 10 à 100 fois plus cher qu'une machine (Jancovici, février 2020). L'abolition de l'esclavage ne serait-elle pas le fait de l'avènement des machines et des énergies fossiles bien davantage que d'un sursaut moral de l'humanité ?

14/ La « consommation » moyenne dans les sociétés développées est bien supérieure à cette moyenne mondiale : en France, par exemple, elle est de 60 000 kWh par an et par habitant.

15/ Encore une fois, il s'agit d'une moyenne mondiale. Le nombre d'esclaves énergétiques par personne est bien supérieur dans les sociétés occidentales (chaque Français dispose en moyenne de 600 à 6000 esclaves, par exemple).

16/ Assez tardivement en France : après la Seconde Guerre mondiale.

les rendements céréaliers en France sont alors multipliés par dix. Grâce aux machines abreuvées en énergies fossiles, c'est désormais 1,5% de la population — et non plus les deux-tiers — qui nourrit les Français, de surcroît avec un menu comportant cinq fois plus de viande qu'il y a cent ans et à un prix qui jamais au cours de l'histoire des Hommes n'a été aussi bas : au début du XIX^e siècle, la nourriture représente les deux-tiers du budget des ménages ; deux fois moins cent ans plus tard ; aujourd'hui, cette part est de 2%¹⁷. Le prix réel de la nourriture — et en particulier de la viande — en France a été divisé par trente en deux siècles et ce, du fait de l'abondance d'aliments pour machines : les énergies fossiles.

Durant la même période, celles-ci sont mobilisés par l'industrie pour transformer d'autres ressources naturelles, notamment celles extraites de mines, en une variété d'objet de plus en plus grande. Les agriculteurs devenus inutiles en raison des gains de productivité évoqués plus haut peuvent être mis au service des machines : un emploi dans l'industrie est un emploi de serviteur de machine ; sans cette dernière, l'ouvrier n'est d'aucune utilité.

Après les chocs pétroliers des années 1970 et 1980, la quantité d'énergie « consommée » (plutôt : mise en jeu) par habitant, après avoir connu une augmentation fulgurante (valeur multipliée par quatre en un siècle), se stabilise, nous l'avons vu, à 20 000 kWh par terrien (c'est la valeur moyenne d'aujourd'hui). La taille des machines poursuit néanmoins sa croissance, notamment grâce à leur robotisation : une production de plus en plus importante est désormais assurée par un nombre de machines de plus en plus faible (une ligne de production robotisée est assimilable à une seule machine), nécessitant de moins en moins de serviteurs (ouvriers). Ainsi, après les chocs pétroliers, la production industrielle continue à augmenter (en France, par exemple, elle est multipliée par deux entre 1974 et 2007) ; simplement, étant assurée par des machines plus grandes, le nombre d'emplois dans l'industrie diminue. Plutôt que de désindustrialisation, il serait plus juste de parler de pertes d'emplois dans l'industrie.

Le nombre croissant d'objets (au sens large) produits par l'industrie et mis en circulation justifie la création d'emplois pour s'en occuper, transmettre l'information sur la manière de s'en servir, les vendre, les financer, les entretenir, les réparer, etc : ce sont des emplois de services (aux entreprises, aux particuliers) relevant du secteur tertiaire, dont l'envolée (qui s'accroît après les chocs pétroliers) reflète un parc de machines de plus en plus varié et de plus en plus abondant. Ce point peut être illustré par un raisonnement inverse : si l'industrie automobile venait à disparaître et si plus aucune voiture n'était vendue en France, tous les emplois liés à la réparation, à l'assurance, à la régulation de la circulation, à l'apprentissage de la conduite (auto-écoles),... — et de manière générale, tous les emplois de services au secteur automobile — disparaîtraient corrélativement. Ainsi, contrairement à une idée répandue, la multiplication des emplois tertiaires va de pair avec l'augmentation de la production industrielle et l'automatisation : une société fortement tertiaisée est une société s'appuyant sur un important parc de machines en fonctionnement.

Dans la mesure où l'organisation optimale de la production industrielle et des échanges qui s'ensuivent (c'est-à-dire l'activité tertiaire) est de rapprocher les ouvriers des machines qu'ils servent et les emplois de services des bénéficiaires de ces derniers, le cadre le plus adapté pour tous ces emplois est la ville, dont les habitants peuvent être nourris loin des champs grâce à des exosquelettes assurant un transport rapide et performant des produits agricoles, complétés par d'autres permettant leur conservation, même de ceux les plus périssables. Contrairement

17/ Le prix qui figure sur un ticket de caisse semble plus important que cela, mais n'oublions pas qu'il intègre d'autres coûts que celui de la production de la nourriture elle-même : transport, conditionnement, emballages, budget publicitaire, salaires des magasiniers et des employés de caisse, etc.

à l'époque où la taille et le nombre d'habitants des villes étaient contraints par le surplus agricole dégagé par un disque de rayon équivalent à un ou deux jours de transport par charrette à bras, la ville des sociétés disposant d'une énergie abondante peut se développer quasiment sans limites ; le nombre de métropoles dans le monde dépassant les dix millions d'habitants (dont l'agglomération parisienne) en est une illustration.

Si l'abondance énergétique vide les campagnes et remplit les villes, elle modèle également la forme de ces dernières. Aux temps anciens, toutes les villes suivent un même schéma, avec un centre regroupant les « adresses » où ont lieu les échanges — la place du marché pour les objets, l'église pour les valeurs et la morale, l'école pour les savoirs, l'édifice de la représentation du pouvoir¹⁸ pour les règles de vie en commun —, car cette disposition est optimale dans un monde où les déplacements s'effectuent à pied. Mais au sein d'une ville apparue en même temps que l'automobile (c'est le cas, par exemple, de certaines villes aux Etats-Unis), cette organisation n'a plus lieu d'être : pour un habitant d'Atlanta, la notion de « centre-ville » est vide de sens, simplement parce que l'abondance d'énergie permet que les flux d'échanges aient lieu n'importe où ailleurs ; c'est elle également qui permet aux villes de s'étaler¹⁹.

Ces quelques très succincts²⁰ éléments de réflexion rappellent, si nécessaire, à quel point les modes de vie actuels sont le fait de la multitude de machines (principalement nourries aux combustibles fossiles) composant les exosquelettes dont se sont dotées nos sociétés. Le corollaire en est la situation de dépendance de ces dernières vis à vis de la moindre variation d'approvisionnement en énergie.

Les « chocs pétroliers » en sont une illustration : en limitant la quantité disponible d'aliments pour machines, c'est le nombre de leurs « serviteurs » qui s'en trouve altéré. Il s'ensuit un chômage structurel qui affecte tous les pays, indépendamment des partis politiques au pouvoir à ce moment là.

Les répercussions d'une moindre disponibilité d'énergie sur la reproductibilité des modes de vie issus d'une situation d'abondance dépendent évidemment de l'ampleur de la baisse d'approvisionnement. Dans un monde très urbanisé commençant à être énergétiquement contraint, la question du devenir des habitants des villes se pose de manière prégnante : la baisse du nombre d'emplois à pourvoir, tant dans l'industrie (moins de machines à faire fonctionner) que, corrélativement, dans le secteur tertiaire (moins de services à assurer), provoque une situation de déshérence économique se manifestant en premier lieu dans les zones des villes les plus dépendantes de l'énergie (notamment pour le transport), en particulier les banlieues ; la crise des Gilets jaunes en est une manifestation.

Si les machines au service des grandes villes cessaient de fonctionner pour cause de pénurie grave, les habitants mourraient de faim (rappelons qu'en France, un camion sur trois transporte des produits alimentaires) ; les conséquences du blocage des raffineries et des dépôts de carburant à l'automne 2010 sur l'approvisionnement de certaines grandes surfaces — vidées en une journée — témoigne de l'extrême dépendance à l'énergie des citoyens pour la satisfaction de leurs besoins fondamentaux.

18/ Pouvoir royal, municipal ou autre : maison de ville au Moyen Age, maison communale, hôtel de ville,...

19/ Selon des modalités différentes, en fonction du ou des modes de transport, ainsi que du contexte géographique. Le système urbain suisse « contraint » de rester à fond de vallée et caractérisé de ce fait par un étalement limité et des densités fortes propices à une desserte efficace par les transports collectifs en est une illustration.

20/ et très simplificateurs !

1.3.- Energie et économie

Si le fonctionnement des sociétés humaines est à tel point surdéterminé par l'énergie, il est légitime de s'étonner que le rôle de cette dernière n'apparaisse pas comme absolument central en termes économiques.

Appréhender la société humaine du point de vue de l'énergie revient à la considérer comme un système physique. Or ce système physique ne se manifeste pas en tant que tel dans la vie de tous les jours, où le seul indicateur quantitatif couramment utilisé (à côté du temps) est celui de la monnaie : c'est (par exemple) en euros, et non pas en kWh, qu'est exprimée la valeur d'un bien ou d'un service. Mais l'euro est un produit de l'économie qui, par construction, « s'est rendue myope vis à vis de la physique » (Jancovici, 2019).

L'économie est « l'ensemble des activités d'une collectivité humaine relatives à la production, à la distribution et à la consommation des richesses »²¹. Pour Jean-Baptiste Say, l'un des pères de l'économie politique (appelée aujourd'hui « économie classique »), l'objet de cette dernière est d'étudier comment les ressources rares sont employées pour la satisfaction des besoins des hommes vivant en société. Puisqu'il s'agit de focaliser sur la gestion « de ce qui est rare », la gestion « de ce qui ne l'est pas » reste en dehors du champ d'investigation de cette discipline naissante, selon laquelle les « richesses naturelles » relèvent de cette seconde catégorie : « [...] les uns [besoins] sont satisfaits par l'usage que nous faisons de certaines choses que la nature nous fournit gratuitement, telles que l'air, l'eau, la lumière du soleil. Nous pouvons nommer ces choses des richesses naturelles, parce que la nature seule en fait les frais. Comme elle les DONNE indifféremment à TOUS, personne n'est obligé de les acquérir au prix d'un sacrifice quelconque. Elles n'ont donc point de valeur échangeable. » (Say, 1803). Dans son *Cours complet d'économie politique pratique* écrit dans les années 1828-1829, l'auteur ajoute que « Les ressources naturelles sont inépuisables, car sans cela, nous ne les obtiendrions pas gratuitement. Ne pouvant ni être multipliées ni épuisées, elles ne sont pas l'objet des sciences économiques. »

Il est vrai qu'au début du XIX^e siècle, où la Terre est peuplée de moins d'un milliard d'êtres humains, le capital et le travail humain sont les deux principaux facteurs limitants du système productif ; dès lors, ce sont les seuls à être pris en compte dans les modèles économiques. Mais du point de vue du physicien — pour qui *produire* signifie *transformer*²² —, ce que la science économique appelle « système productif » s'apparente plutôt à un « système de transformation » : tous les objets que nous « produisons » sont en réalité des ressources (tous les éléments du tableau de Mendeleïev) prélevées dans notre environnement avant d'être transformées (un peu par nous, mais surtout par les machines). Plus ces prélèvements deviennent importants par rapport aux stocks disponibles, plus les « richesses naturelles » (matières et énergies) évoquées par Jean-Baptiste Say commencent à relever de la catégorie des « ressources rares » pour devenir à leur tour un facteur potentiellement limitant du système productif. Pourtant, l'axiome relatif à la gratuité de ces richesses naturelles continue à être utilisé dans des modèles économiques qui, de ce fait, se retrouvent en décalage par rapport à la réalité physique pointée plus haut : le rôle essentiel des ressources — notamment énergétiques — dans l'économie²³.

21/ <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/economie/27630>

22/ « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme » selon la maxime attribuée à Antoine Lavoisier, qui aurait reformulé ainsi une phrase du philosophe grec Anaxagore : « Rien ne naît ni ne périt, mais des choses déjà existantes se combinent, puis se séparent de nouveau ».

23/ Le seul coût que cette dernière prend en compte relativement à l'énergie est celui du travail nécessaire pour

L'importance de ce rôle peut d'ailleurs être mise en évidence par la mise en regard, à l'échelle mondiale, du PIB et de l'énergie consommée : la représentation graphique (millions de tonnes équivalent pétrole en abscisse, milliards de dollars constants en ordonnée) en est une droite (**figure 2**). En d'autres termes, à l'échelle planétaire, ces deux grandeurs sont proportionnelles. Dit encore autrement, la convention très consensuellement admise aujourd'hui consistant à mesurer l'activité économique par le PIB exprimé en unités monétaires pourrait être remplacée par une autre : mesurer la « quantité de transformation » de son environnement par l'Homme (et ses exosquelettes), exprimée en kWh ou en TEP. Cela revient au même (Jancovici, mai 2021). L'énergie consommée est un très bon indicateur global de l'activité économique.

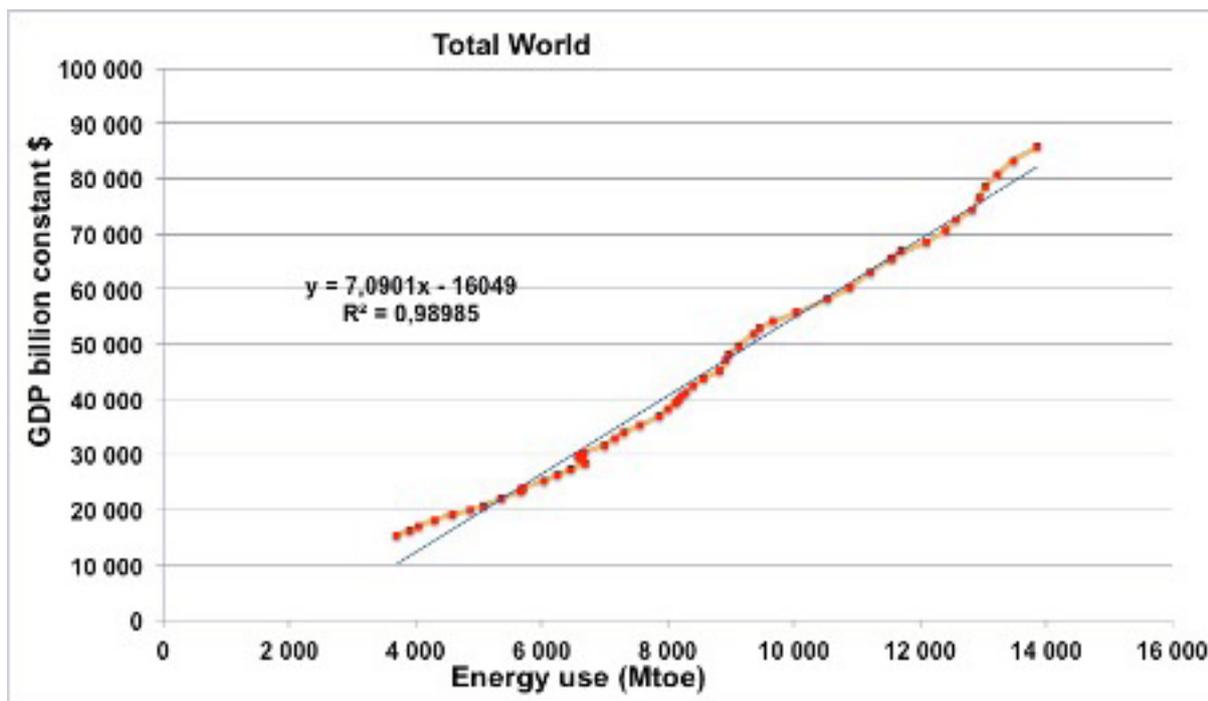


Figure 2 - PIB en fonction de l'énergie consommée, pour le monde.

Données primaires World Bank pour le PIB et BP Sal Review pour l'énergie (Jancovici, 2019).

Par ailleurs, puisque, d'une part, aucune entité économique ne fonctionne sans les transports et, d'autre part, ces derniers fonctionnent à plus de 98% grâce aux énergies fossiles, la quantité de pétrole extraite du sol est un très bon « indicateur avancé » de l'économie (Jancovici, 2019), comme le montre la **figure 3**, où le PIB par personne (courbe bleue) varie corrélativement avec la quantité de pétrole sorti de terre (courbe rouge). L'indicateur est « avancé » car lorsqu'il y a décalage, la variation de la courbe rouge précède légèrement la variation de la courbe bleue, suggérant un lien de causalité, c'est-à-dire le statut du pétrole en tant que « facteur limitant » du système productif : le transport étant indispensable à la production, l'activité économique (synonyme de capacité transformative) dépend directement de la quantité disponible de pétrole.

Il convient d'insister sur le fait que c'est bien la *quantité* — et non pas le prix — du pétrole

extraire cette énergie de l'environnement : coût de recherche de la source, coût des compensations versées au pays où elle se trouve (éventuellement coût d'une guerre si ce pays refuse), coût des installations nécessaires à l'extraction, coût du transport, etc. Mais la ressource elle-même est gratuite... **par convention**. Tout ceci est valable pour n'importe quelle autre ressource naturelle (pas seulement l'énergie).

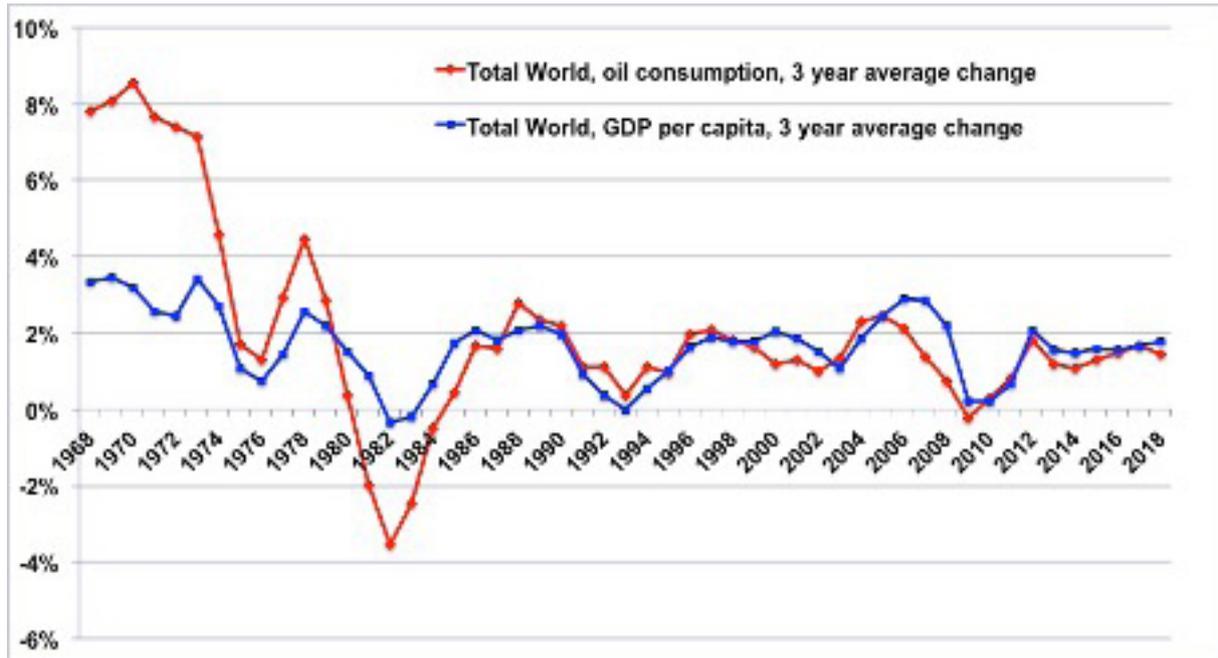


Figure 3 - Variations du tonnage de pétrole extrait (monde) et du PIB par personne.
 Jancovici, 2019, sur données World Bank & BP Statistical Review.

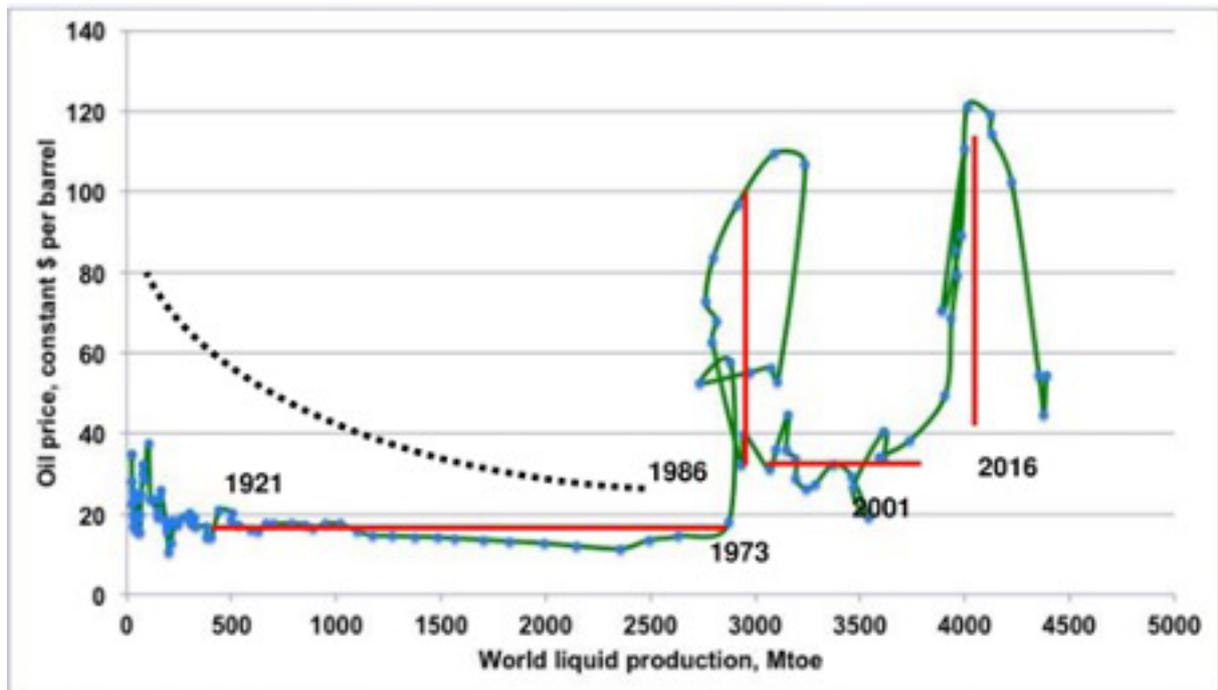


Figure 4 - Prix du baril en fonction du volume vendu sur le marché de 1921 à 2016.
 Jancovici, 2019, sur données BP Statistical Review.

qui importe dans ce « modèle prédictif », simplement parce qu'il n'existe pas d'élasticité « prix/volume » de long terme pour les énergies fossiles (Jancovici, 2019). La **figure 4** représente la quantité de pétrole disponible sur le marché (millions de TEP) en abscisse, son prix (dollars constants) en ordonnée.

L'existence d'une élasticité entre ces deux grandeurs se traduirait par une courbe, comme celle (imaginaire) en pointillés sur la figure ; mais la réalité observée depuis les chocs pétroliers est celle de la courbe de couleur verte, qu'un économiste pourrait interpréter comme une succession de régimes inélastiques : un régime où le prix est fixe et où le volume est indépendant de ce dernier (segments horizontaux de couleur rouge) et un régime où le prix est indépendant du volume, qui est fixe (segments verticaux). L'explication en est qu'à mesure que les réserves s'épuisent et que des gisements plus coûteux à exploiter sont mobilisés, le prix du baril augmente, décourageant la demande ; mais avec une demande moindre, la recherche de nouveaux gisements est ralentie. De ce fait, le prix d'un pétrole commençant à être contraint n'est ni « haut », ni « bas » : il est « oscillant » ou « volatile », rendant vain tout exercice d'extrapolation par un raisonnement économique « classique ».

Répetons donc que, comme le suggère la **figure 3**, le meilleur moyen de « prédire » l'évolution du PIB consiste à essayer d'obtenir l'information sur la quantité vraisemblable de pétrole qui devrait sortir des puits dans les prochaines années.

Conclusion

En première approximation, nous sommes le résultat de l'abondance énergétique. Toutes les facettes de notre vie en sont affectées : études longues ; secteur d'activité ; congés payés ; retraite ; cadre de vie (mégapoles) ; etc. ; même les aspects « sociétaux » sont concernés, comme la généralisation des divorces et de l'éclatement de la cellule familiale²⁴. De manière générale, c'est cette abondance énergétique qui a permis l'adoption de modes de vie radicalement différents de ceux du début du XIX^e siècle. Pour le meilleur... et pour le pire. Car nombre de problèmes économiques des dernières décennies trouvent leur explication dans la limite physique, à l'échelle planétaire, de la disponibilité d'énergie. Dès qu'elle devient contrainte, nos modes de vie sont appelés à changer, de gré ou de force.

Une des vérités politiquement indicibles est qu'avec les centaines, voire milliers, d'esclaves énergétiques dont dispose chaque habitant de la terre (tout au moins d'une partie des sociétés humaines), les conditions de vie d'un Gilet jaune sont celles d'un « privilégié » au regard de ce qu'elles étaient au Moyen-Âge.

L'autre vérité politiquement indicible est que cette situation ne va pas durer.

24/ Dont la rareté dans les « sociétés traditionnelles » n'est pas forcément liée à des questions de morale, mais de « faisabilité économique ». L'abondance énergétique n'a pas « provoqué » ces phénomènes ; elle les a rendus possibles, les a facilités.

2.- Deux limites amont + Une limite aval = Trois pénuries

Des énergies fossiles abondantes et gratuites ont permis à l'humanité de croître jusqu'à atteindre huit milliards d'individus ; elles ont permis également à une partie de cette humanité d'adopter des modes de vie fondés sur un recours massif à des « exosquelettes » de plus en plus nombreux alimentés par ces énergies qui, n'étant pas renouvelable à l'échelle temporelle de la vie des sociétés humaines, s'épuisent. Une limite est donc atteinte. Mais celle-ci, relative aux ressources énergétiques, s'accompagne d'une autre, relative aux ressources de minerais, dont certains stratégiques. A ces deux goulets d'étranglement « en amont » s'en ajoute un troisième « en aval » : celui de l'exutoire pour les rejets de nos exosquelettes. C'est donc une triple pénurie qui s'annonce : pénurie d'énergie, pénurie de minerais et pénurie de temps pour trouver des réponses adéquates.

2.1.-Pénurie d'énergies fossiles

Pour une ressource naturelle non renouvelable, c'est-à-dire dont le stock est donné une fois pour toutes, il est facile de démontrer par l'absurde que son extraction cumulée ne peut pas dépasser la valeur de ce stock. Il est facilement démontrable aussi que l'extraction annuelle — entre le moment où elle commence (avant cette date, elle est nulle) et le moment où elle s'arrête (après cette date, elle est nulle également, la ressource étant épuisée) — passe par un maximum, appelé pic de production. Quelle que soit la ressource concernée, la question n'est donc pas de savoir *si* ce pic arrivera, mais *quand* il arrivera.

Dans le cas du pétrole, la réponse varie selon le mode d'extraction, avec une distinction binaire entre pétrole conventionnel²⁵ et non conventionnel²⁶. Selon le rapport annuel 2018 de l'Agence internationale de l'énergie, la production de pétrole conventionnel dans le monde est passée par un maximum en 2008 ; depuis, elle est en décroissance constante : 67 millions de pétrole brut par jour en 2018 contre 69,5 millions dix ans plus tôt (International Energy Agency, 2018). Les avis sont plus partagés concernant le pic mondial « tous pétroles confondus », donc prenant en compte le pétrole non conventionnel : selon certains, il serait déjà atteint ; pour d'autres, il ne le sera qu'au cours de la décennie 2030. Mais de manière consensuelle, il interviendra de toute façon avant 2040. Ces différences s'expliquent par des évaluations divergentes des spécialistes sur les principaux paramètres, en particulier les réserves des gisements de pétrole en production et la rapidité de leur déclin, la vitesse de mise en production des nouveaux gisements, l'apport du pétrole non conventionnel, ... entre autres facteurs.

Comme le fait remarquer Jean-Marc Jancovici, si l'on raisonne non pas en termes de production globale mais d'approvisionnement par personne, le pic a eu lieu il y a 40 ans déjà, lors du premier choc pétrolier, en 1979 : « jamais un humain n'avait utilisé autant de pétrole que

25/ Il s'agit du « pétrole qui peut être produit dans des conditions techniques et économiques satisfaisantes ». Cette définition assez vague qui englobe les pétroles extraits depuis les terres émergées (en excluant les pétroles atypiques et la récupération « tertiaire » ou « assistée », par exemple par injection de vapeur, sur les gisements conventionnels) et les pétroles *offshore* (plateformes en mer) ainsi que ceux issus de gisements polaires, principalement en Alaska et dans l'océan Arctique ; les ressources de l'Antarctique sont pour l'instant protégées par traité (https://fr.wikipedia.org/wiki/Pic_pétrolier#Différentes_catégories_de_pétrole).

26/ Par cette expression sont désignés tous les pétroles qui ne sont pas produits par les techniques classiques de forage. Cette famille comprend notamment le pétrole extra-lourd du Venezuela, les sables bitumineux du Canada et les schistes bitumineux des Etats-Unis. Leur extraction est coûteuse, lente, et consomme beaucoup d'énergie en entrée (https://fr.wikipedia.org/wiki/Pic_pétrolier#Différentes_catégories_de_pétrole).

cette année là, et jamais plus il n'en utilisera autant. »²⁷ Les conséquences — dans tous les pays occidentaux et en même temps — du passage de ce pic de production par personne ont déjà été évoquées plus haut : chômage, endettement public, tertiarisation (services), mondialisation (recherche de gains de productivité en allant chercher ailleurs des travailleurs bon marché). Le pic du pétrole conventionnel de 2008 a été perçu comme la « crise des subprimes ». Quand au pic « tous pétroles », il pourrait être imminent ; car s'il est vrai que les sables bitumineux du Canada et les pétroles de roche mère des Etats-Unis ont pu (plus que) compenser la baisse de la production du pétrole conventionnel au cours de la dernière décennie, leur rentabilité est remise en question en raison d'un prix du baril insuffisant, de sorte que depuis 2019, la production a cessé de croître. Compte tenu de l'étroite corrélation (évoquée précédemment) entre la variation de la quantité globale de pétrole produit et celle du PIB mondial, ce dernier entamera une décroissance structurelle lorsque le pic sera dépassé (Jancovici, avril 2020).

2.2.-Pénurie de minerais

La substitution des « énergies vertes » aux hydrocarbures fossiles semble être la réponse adéquate : en remplaçant les moteurs à combustion interne par des moteurs électriques alimentés par de l'électricité « propre » produite par des centrales éoliennes et solaires, elle permettra de relancer croissance et prospérité.

Mais cette production requiert la mobilisation d'autres ressources non renouvelables, notamment celles désignées par le terme générique « métaux rares » (catégorie comprenant une famille spécifique appelée « terres rares »). Le rôle de ces derniers est bien plus important, par exemple, dans une voiture électrique (ils sont une composante incontournable de la batterie) que dans une voiture à combustibles fossiles (où ils ne sont pas indispensables pour les fonctions mécaniques). De manière plus générale, ils sont constitutifs des « technologies vertes », notamment des aimants des éoliennes et des cellules photovoltaïques. C'est à cette limite que risquent de se heurter les ambitieux projets visant à faire évoluer la part renouvelable de la production mondiale d'électricité, pour passer des 10% actuels (dont les trois-quarts sont d'origine hydraulique) à 50% en 2050. Pour donner un ordre de grandeur, la construction d'une grande centrale éolienne *offshore* nécessite — outre une importante mobilisation d'énergie (d'origine fossile) pour la mise en œuvre et le transport des matériaux — une tonne de métaux rare, extraits dans seulement quelques pays qui en détiennent les principales réserves²⁸. Et si la production de génératrices d'éoliennes fait appel à certaines ressources métalliques (néodyme, dysprosium,...), celle des panneaux photovoltaïques en convoque d'autres (gallium, indium, sélénium, cadmium, tellure,...) et la production d'électricité d'origine nucléaire (qui, bien que non renouvelable, fait partie des alternatives aux hydrocarbures, du moins à titre temporaire) en nécessite d'autres encore²⁹, de surcroît non recyclables une fois irradiés.

Ainsi, le prix à payer pour une moindre dépendance aux énergies fossiles est une autre dé-

27/ Jancovici, J.-M., « Du pétrole, ou pas », *L'Express*, 9 avril 2020. [En ligne] <https://jancovici.com/publications-et-co/articles-de-presse/du-petrole-ou-pas/> (consulté le 23 juin 2021).

28/ Par exemple, le cobalt est extrait essentiellement des mines de la République démocratique du Congo ; le lithium des mines d'Australie, du Chili et de Bolivie ; le nickel, le zirconium et l'étain des mines d'Indonésie ;...

29/ Par exemple, bore, cadmium, hafnium, indium, sélénium ou argent pour absorber les neutrons dans les barres de contrôle et de commande, tungstène et zirconium pour les conteneurs et « l'emballage » du combustible nucléaire, cobalt, nickel, tantale ou titane que requièrent les alliages à haute performance de la « robinetterie nucléaire » (Bihouix, 2014).

pendance : celle aux métaux rares. Mais pas uniquement, car d'autres ressources sont massivement mobilisées. C'est le cas du cuivre qui, en tant qu'élément indispensable de la technologie électrique, fait l'objet d'une exploitation de plus en plus intensive, et la question d'une pénurie à brève échéance se pose avec acuité : selon l'estimation d'Olivier Vidal, le pic de production de cuivre primaire pourrait survenir entre 2030 et 2040 (Vidal, 2018).

D'autres exemples encore peuvent être évoqués : pour reprendre le cas de la centrale éolienne, en plus des 20 tonnes d'aluminium et 500 tonnes d'acier, sa construction nécessite de grandes quantités de béton ; or contrairement à la bauxite et au fer, présents en abondance dans la croûte terrestre, le sable — entrant aux deux-tiers dans la composition du béton — fait l'objet d'une pression croissante, si bien que là encore, une pénurie est désormais sérieusement envisagée³⁰ au point de devenir un enjeu planétaire³¹.

La dépendance aux minerais, qu'il s'agisse de métaux rares ou de matières plus « ordinaires » (ou longtemps considérées comme telles), n'est cependant pas le seul prix à payer pour une moindre dépendance aux énergies fossiles. Il en est un autre de nature « environnementale », car l'extraction des minerais faisant l'objet d'une demande croissante s'accompagne d'importants dommages. A titre illustratif, reprenons les trois exemples précédents.

Concernant les métaux rares, la Chine, qui détient d'importantes réserves de ces matières stratégiques, en est le premier producteur mondial. Ce pays fournit par exemple les deux-tiers d'un minerai particulièrement prisé des industriels des technologies vertes, le graphite, qui est raffiné par des ouvriers peu protégés dans des usines encore archaïques, dispersant les résidus à des dizaines de kilomètres autour des sites et menaçant gravement l'activité agricole de régions entières. Le pays compte par ailleurs des milliers de mines et de raffineries d'autres métaux rares — indium, antimoine, gallium, tungstène, germanium,... — dont la demande mondiale augmente, pour certains d'entre eux, de 25% par an, faisant payer à la Chine un tribut environnemental et humain très lourd à la « transition énergétique ».

Pour le cuivre, la mine de Chuquicamata — plus grande mine de cuivre à ciel ouvert du monde, située au Chili (13% des réserves mondiales) — offre un autre exemple de désordre de grande ampleur lié à l'exploitation de minerais. Le métal devenant de plus en plus rare au fur et à mesure de l'extraction, le raffinage nécessite des quantités croissantes d'eau, de sorte que l'impact de cette activité s'étend toujours davantage : les métaux lourds sont disséminés dans l'eau et dans l'air à des centaines de kilomètres. De plus, la mine et les raffineries ont besoin d'électricité, fournie par les centrales thermiques de Tocopilla, alimentées par du charbon provenant de Colombie, à des milliers de kilomètres. En somme, l'extraction du cuivre nécessaire à la production d'énergies renouvelables conduit à intensifier l'exploitation du charbon...

Le sable, quant à lui, a pendant longtemps été perçu comme inépuisable. Mais celui des déserts étant impropre à la construction, les groupes du bâtiment, après avoir exploité les rivières et les carrières, se sont tournés vers la mer, provoquant une catastrophe écologique en devenir, car le sable joue un rôle essentiel dans la protection des côtes et l'équilibre des écosystèmes marins. Des îles entières ont disparu (tandis que s'en construisaient d'autres, artificielles, à Dubaï ou à Singapour), les trois-quarts des plages du monde ont été amoindries et rendues fragiles aux tempêtes et à l'érosion, des espèces de poissons et d'autres créatures marines ont disparu...

Aux pénuries prochaines de minerais et aux désordres liés à leur extraction qui accompagnent

30/ <https://www.natura-sciences.com/environnement/penurie-sable.html>

31/ <https://information.tv5monde.com/info/penurie-de-sable-un-enjeu-planetaire-environnemental-et-economique-185813>.

une transition massive vers les énergies vertes s'ajoute une pression accrue sur des ressources certes renouvelables, mais dont la surexploitation risque d'entraîner des conséquences environnementales graves. Selon un récent article³² de la revue *The Economist*, le rythme en forte croissance de l'exploitation du balsa équatorien, dont le bois sert à fabriquer les pales d'éoliennes³³, pourrait constituer une menace sérieuse pour la forêt amazonienne, et donc pour la planète...

L'évocation de ces désordres d'ampleur planétaire contraste singulièrement avec une réalité en apparence bien plus enthousiasmante, mais relevant d'une forme de schizophrénie. Le cas de la Scandinavie en est un révélateur. En Norvège, où la transition verte est une histoire qui remonte à une vingtaine d'années, une voiture sur deux est électrique, toutes les voitures vendues le seront après 2025, et à cette date, Oslo comptera 8000 bornes d'alimentation électrique contre 400 aujourd'hui : la Norvège semble être dominée par les énergies vertes. Mais le prix à payer est « ailleurs », le calcul des émissions de CO₂ s'arrête aux frontières de la Norvège, et celle-ci finance la transition vers les énergies renouvelables en exportant du pétrole...

Pour les pays qui en sont détenteurs, les minerais stratégiques pour la « transition énergétique » sont une aubaine économique. D'ailleurs, à l'image de la Chine, ils comptent devenir producteurs d'envergure mondiale : la Bolivie, par exemple, concentre entre 50 et 60% des réserves de lithium de la planète et prévoit de mettre à profit une demande qui devrait être multiplié par vingt au cours des quinze prochaines années en raison de la très forte hausse de production des batteries de véhicules électriques. Ces minerais sont « le pétrole du futur »... jusqu'au pic qui surviendra d'autant plus tôt que la pression s'intensifiera : depuis le début du XXI^e siècle, la consommation de nombreux métaux — et de béton — a doublé, et cette tendance continue à s'accroître. Certes, le parc d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques est un « patrimoine ». Mais sa durée de vie est limitée : une vingtaine d'années dans le cas d'une éolienne... qu'il suffit de recycler ? Les dizaines de milliers de tonnes de pales d'éoliennes allemandes en attente de l'être permettent d'en douter : elles sont entreposées dans la nature (à l'image des déchets nucléaires, sans la radioactivité) avant d'être broyées et mélangées à d'autres matériaux pour servir de socles aux futures éoliennes. Car le recyclage des métaux rares est coûteux... en énergie.

Au final, un recours massif aux énergies renouvelables comme réponse au pic des énergies fossiles revient à accélérer l'avènement du pic des minerais et l'aggravation de désordres environnementaux.

2.3.- Pénurie de temps

Aux désordres environnementaux liés à l'extraction des minerais s'ajoutent les rejets de gaz de combustion des énergies fossiles. Les conséquences climatiques de ces émissions font l'objet d'un suivi, depuis plus de trente ans, par le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC)³⁴ qui publie régulièrement des « rapports d'évaluation » dont

32/ <https://www.economist.com/the-americas/2021/01/30/the-wind-power-boom-set-off-a-scramble-for-balsa-wood-in-ecuador>

33/ Le balsa peut certes être substitué par d'autres matériaux, notamment le PET (un plastique issu du pétrole) ou des composites à base de fibre de verre et de mousse de polyuréthane, mais ces derniers connaissent de plus en plus souvent des périodes de pénuries et des problèmes d'approvisionnement.

34/ IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) en langue anglaise. Son rôle est « d'expertiser l'information scientifique, technique et socio-économique qui concerne le risque de changement climatique provoqué

nous reprenons certains éléments dans cette section.

La question du réchauffement (ou changement) climatique continue à faire débat, notamment à propos de son origine anthropique, parfois (plus rarement) concernant sa réalité même³⁵. Il est difficile à un non spécialiste de prendre part à cette polémique entre partisans (largement majoritaires aujourd'hui) et opposants (« climatosceptiques », certains d'entre eux préférant le terme « climato-réaliste »), les seconds accusant les premiers de s'appuyer sur des données trop minces ou scientifiquement non avérées³⁶. Un suivi régulier de la controverse durant les dernières années nous a permis d'apprécier arguments et contre-arguments ; si la malhonnêteté ou l'absence de sérieux de certains est parfois évidente (utilisation de citations ou de séries temporelles tronquées, par exemple), il est en revanche malaisé de prendre parti dans d'autres cas (notamment lorsque s'affrontent deux climatologues réputés, avérés comme tels). Le fameux « à qui profite le crime » ne permet pas non plus de trancher, tant il est vrai qu'il peut théoriquement s'appliquer aux deux camps. Notre adhésion à celui des tenants de l'origine anthropique du changement climatique tient, d'une part, à la qualité de l'argumentaire³⁷ (dans les documents consultés, celui des climatosceptiques nous est apparu globalement moins convaincant, moins complet, moins étayé et/ou davantage sujet au recours à des procédés contestables) et, d'autre part, à un raisonnement relevant du principe de précaution : compte tenu des enjeux du dérèglement climatique, le pari d'ignorer les conclusions du GIEC sous prétexte qu'il subsiste un doute sur certains points est beaucoup trop risqué.

En consommant les énergies fossiles à un rythme de plus en plus soutenu au cours des deux derniers siècles, les exosquelettes dont l'humanité s'est dotée (et dont elle continue à se doter) ont rejeté en quantités croissantes du dioxyde de carbone (CO₂) : entre 1860 et 2018, les émissions annuelles totales ont été multipliées par vingt, passant de 2 à près de 40 Gt (milliards de tonnes), dont la moitié provient des combustibles fossiles³⁸.

Comme la vapeur d'eau, le méthane, le protoxyde d'azote, l'ozone ou les fréons, le CO₂ est un gaz à effet de serre (GES)³⁹ de forme moléculaire stable, comme tout oxyde. En d'autres termes, une fois qu'il est dans l'atmosphère, il y reste pour l'éternité, à moins d'en être « extrait » par contact avec la surface terrestre, selon deux processus : la dissolution dans l'océan (par équilibre de pression partielle entre les deux fluides en contact, l'air et l'eau) et la photo-

par l'homme ». Précisons que le GIEC n'est pas un laboratoire de recherche, mais un organisme qui effectue une évaluation et une synthèse des travaux menés dans les laboratoires du monde entier. Ses trois groupes de travail conduisent des expertises sur les recherches portant respectivement sur le fonctionnement « physique » du climat et les variations climatiques passées ou à venir (groupe 1), la vulnérabilité de la biosphère et de notre système socio-économique face aux risques du changement climatique (groupe 2) et les scénarios d'émission de gaz à effet de serre et la manière de réduire nos émissions (groupe 3). Entre 1990 et 2022, le GIEC a publié six rapports d'évaluation et leurs synthèses, complétés par des rapports méthodologiques et des rapports spéciaux ; tous sont disponibles en ligne sur le site : <https://www.ipcc.ch/reports/>.

35/ <https://www.climato-realistes.fr/la-temperature-moyenne-globale-est-en-train-de-chuter/>

36/ Cf. par exemple l'ouvrage *L'urgence climatique est un leurre* de François Gervais.

37/ Ceux développés sur le site de *Skeptical Science* (<https://skepticalscience.com/>) par J.-M. Jancovici (que les représentants de l'autre camp accusent évidemment de partialité) sur différents supports (par exemple : <https://jancovici.com/changement-climatique/croire-les-scientifiques/quest-ce-que-le-giec/>) en sont une illustration parmi d'autres.

38/ Jancovici, novembre 2020.

39/ La surface de la Terre reçoit l'énergie de rayonnement du Soleil qu'elle restitue notamment sous forme de rayonnement infrarouge (de grande longueur d'onde) que certains gaz, appelés GES, ont la capacité d'intercepter. La surface de la Terre étant aux deux-tiers couverte d'océans, les activités humaines n'ont guère d'influence sur la teneur atmosphérique en vapeur d'eau, qui est le premier GES par ordre d'importance, le CO₂ étant le deuxième.

synthèse (réduction de la molécule grâce à l'énergie solaire, rendant le carbone disponible pour la croissance des plantes). Ces deux processus sont réversibles : le sens du transfert de CO₂ entre l'atmosphère et l'océan dépend des concentrations respectives de ce gaz dans l'air et dans l'eau, d'une part ; lorsque la plante meurt, le carbone qu'elle contient est relâché dans l'atmosphère, d'autre part. Pour que l'épuration naturelle puisse fonctionner, il est nécessaire que l'océan ne soit pas saturé en CO₂ et que les conditions environnementales, notamment climatiques, permettent aux plantes de se développer et ne favorisent pas les incendies de forêts. Par ailleurs, à l'aune des temporalités humaines, ces processus sont lents : dans un scénario (fictif et irréaliste) d'arrêt total *hic et nunc* des émissions humaines, le surplus de CO₂ d'origine anthropique déjà accumulé dans l'atmosphère serait encore présent à hauteur de 50% dans quarante ans, 40% dans un siècle et 25% dans mille ans (IPCC, 2014). En raison de cette inertie, quelles que soient les mesures prises, la baisse de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone d'origine humaine n'interviendra qu'avec un décalage temporel sans commune mesure avec les pas de temps auxquels sont habituées nos sociétés (dont certaines rythmées par des mandats électifs) pour gérer les problèmes. En attendant, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère (**figure 5**) continue de croître⁴⁰.

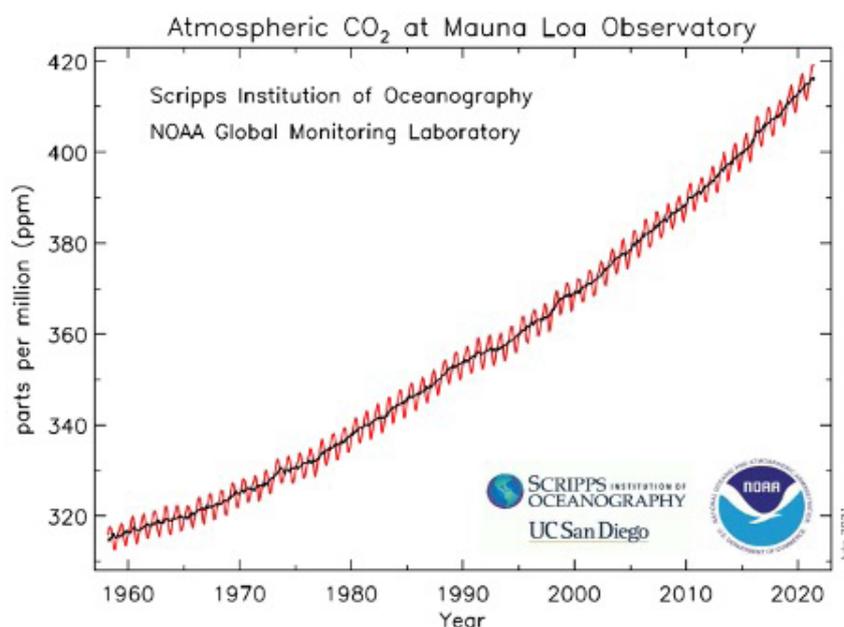


Figure 5 - Concentration atmosphérique en CO₂ depuis 1959.

Données NOAA ESRL (<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>).

La température de la Terre est le fruit de l'équilibre entre l'énergie qu'elle reçoit du Soleil et l'énergie qu'elle émet, dont une partie — celle correspondant à certaines longueurs d'onde de rayonnement infrarouge — est captée par les gaz à effet de serre. Leur présence dans l'atmos-

40/ Les émissions mondiales de CO₂ d'origine anthropique étaient d'environ 36,5 Gt (milliards de tonnes) durant l'année 2019 (<http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>). En raison de la crise sanitaire, elles ont baissé d'environ 2,5 Gt en 2020, mais sont désormais à nouveau reparties à la hausse et devraient atteindre, selon l'Agence Internationale de l'Énergie « un niveau jamais vu d'ici à 2023 » https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/07/20/les-emissions-mondiales-de-co2-devraient-atteindre-un-niveau-jamais-vu-d-ici-a-2023_6088848_3244.html.

phère fait que cette dernière agit comme un isolant dissymétrique qui laisse passer la chaleur du Soleil mais conserve la chaleur de la Terre. Par conséquent, plus la concentration en gaz à effet de serre — et notamment celle en CO₂ — est importante, plus la température de surface de la Terre s'élève. Depuis sa mise en évidence au XIX^e siècle (notamment par Joseph Fourier et Svante August Arrhenius), ce mécanisme de l'effet de serre a fait l'objet de nombreux travaux qui ont montré la complexité réelle d'un processus apparemment simple. Elaborés par plusieurs équipes au niveau mondial, différents modèles climatiques, qui prennent en compte de nombreux facteurs⁴¹, montrent tous une corrélation⁴² entre concentration en CO₂ dans l'atmosphère et température de la surface terrestre.

En raison de la grande durée de résidence du dioxyde de carbone dans l'air, cette corrélation est un facteur d'inertie du système climatique. Les simulations réalisées à l'aide du modèle de climat IPSL-CM6A-LR (Boucher *et al.*, 2020), testé pour sept scénarios différents d'émission de gaz à effet de serre, en sont une illustration (**figure 6**).

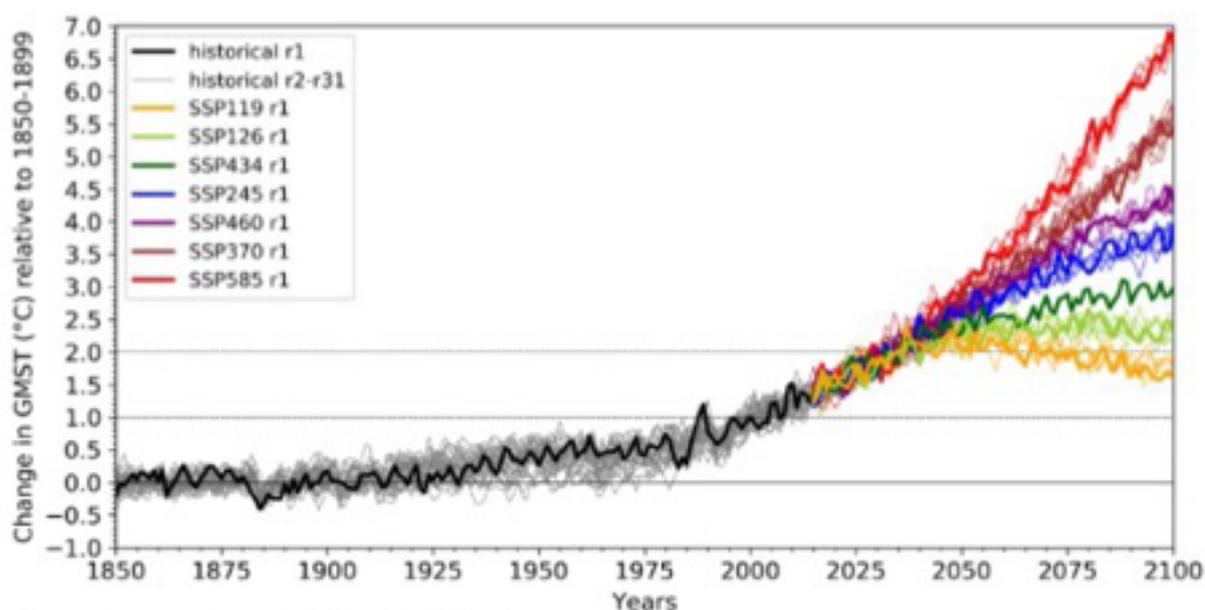


Figure 6 - Simulations réalisées à l'aide du modèle de climat IPSL-CM6A-LR

(Boucher *et al.*, 2020).

41/ Outre les rayonnements reçus et émis par la Terre et la façon dont ils sont captés par les gaz à effet de serre, ces modèles intègrent des données relatives à l'atmosphère (température, contenu en vapeur d'eau et en nuages, mouvements des masses d'air,...), aux océans (température, salinité, mouvements des masses d'eau,...), aux calottes polaires (précipitations neigeuses, glaciers, leur écoulement,...), aux échanges de CO₂ entre l'atmosphère, les océans ou la végétation, etc.

42/ Il est vrai qu'une corrélation ne signifie pas forcément un lien de cause à effet, ni ne donne le « sens » du lien : par exemple, une augmentation de l'activité solaire peut être à l'origine d'une élévation de température qui, *via* les mécanismes des échanges de CO₂ entre l'atmosphère, l'océan et la végétation, entraîne l'accroissement de la concentration de ce gaz dans l'air. Mais si, comme l'indiquent les archives paléoclimatiques naturelles (sédiments océaniques, glace des calottes polaires,...), de tels événements se sont effectivement produits par le passé, ce scénario est peu plausible pour la période récente : en effet, les mesures réalisées par ballons sondes au cours des quarante dernières années montrent que la stratosphère se refroidit, marqueur indiscutable du fait que le réchauffement actuel est dû non pas à un supplément d'activité solaire, mais bien à un supplément d'effet de serre (Jancovici, novembre 2020).

Les courbes, représentant chacune la variation de la température moyenne d'ici la fin du siècle pour un scénario donné, sont toutes superposées sur les deux prochaines décennies, ce qui signifie que pour cette période, l'évolution climatique est déjà « écrite » de par les émissions passées. En d'autres termes, les effets des mesures prises, quelles qu'elles soient, à un instant t ne commencent à être perceptibles qu'une vingtaine d'années plus tard. Cela signifie en particulier que la hausse de 1°C prévue par le modèle d'ici 2040 ne peut être évitée ; puis, selon les mesures mises en œuvre aujourd'hui, la température moyenne peut se stabiliser à cette date, voire commencer à décroître légèrement (scénario radical et irréaliste figuré par la courbe de couleur jaune, correspondant grosso modo à un coup d'arrêt brutal des émissions) ; mais elle peut aussi poursuivre sa croissance pour gagner 6°C d'ici la fin du siècle (courbe de couleur rouge correspondant à un scénario où les émissions continuent à croître au même rythme qu'aujourd'hui).

Il est difficile de mesurer pleinement la signification concrète d'une variation de quelques degrés de la température moyenne, d'autant plus que cette dernière — comme toute moyenne — est une construction intellectuelle impossible à apprécier par nos sens : nous sommes capables de ressentir une température à un moment et à un endroit donnés ; mais pas une température moyenne calculée sur une année à partir de valeurs mesurées en de nombreux endroits disséminés sur toute la surface du globe. L'étude d'événements passés peut aider à comprendre l'impact d'une variation de cet indicateur global (Jancovici, novembre 2020). A l'époque de la dernière période glaciaire, l'Europe du nord est recouverte d'un glacier de 3 km d'épaisseur ; il en est de même pour le Royaume Uni qui n'est pas une île, car le niveau de la mer est 120 m plus bas que le niveau actuel. Le climat étant plus froid, il est aussi plus sec, de sorte que les arbres ne peuvent pas se développer, et les écosystèmes européens ressemblent donc à ceux du nord de l'actuelle Sibérie (celui de l'actuelle France est capable de nourrir une population humaine de 100 000 habitants). Or la différence de température moyenne entre cette Europe d'il y a 20 000 ans et celle d'aujourd'hui n'est que de 4 à 5°C . Il est alors aisé de comprendre, au travers de cette expérience « grandeur nature » ayant consisté à élever le thermomètre planétaire de 4 à 5°C en 10 000 ans, qu'une élévation de la même amplitude thermique en seulement un siècle ne peut qu'entraîner des bouleversements profonds, dont voici quelques exemples.

Selon un article de la revue *Nature Climate Change*, avec une telle hausse de température, les conditions extérieures deviendraient létales⁴³ pendant plus de la moitié des jours de l'année dans nombre de pays (dont certains très peuplés) situés en zone équatoriale ; seraient en particulier concernés l'Indonésie dans sa totalité⁴⁴, le sud de l'Inde et de la Chine, la moitié de l'Amérique du sud, l'Amérique centrale, l'Afrique équatoriale, ... (Mora *et al.*, 2017).

Le régime et la répartition des précipitations serait profondément altéré (IPCC, 2014) ; en particulier, certaines régions — dont la moitié sud de l'Europe⁴⁵ — connaîtraient des sécheresses ponctuées de phénomènes météorologiques intenses (du type « épisodes cévenols ») accompagnés d'inondations. Une des conséquences en serait un assèchement des sols dans les régions concernées — parmi lesquelles le pourtour méditerranéen, le sud de l'Afrique, une partie de Etats-Unis et, point inquiétant, l'Amazonie —, ce qui signifie la mort pour une partie

43/ Une température extérieure de plus de 40°C dans un air saturé d'humidité provoque la mort par hyperthermie, le mécanisme de la régulation de la température du corps par évaporation étant inopérant.

44/ Avec des conditions létales durant presque toute l'année pour les 250 millions d'habitants.

45/ Mais également une grande partie des Etats-Unis et de l'Amérique du sud, le Moyen-Orient, de vastes zones en Afrique, en Chine orientale et en Australie...

des écosystèmes naturels⁴⁶ et une sensibilité accrue des forêts aux incendies⁴⁷. Il s'ensuivrait également une baisse des rendements agricoles, avec des conséquences évidentes d'insécurité alimentaire et d'instabilité : révoltes, guerres, migrations massives, etc (IPCC, 2019).

L'élévation de la température près de la surface corrélativement au refroidissement de la stratosphère⁴⁸ amplifierait la puissance de la pompe convective qui active certains phénomènes climatiques tels que les ouragans, et donc leur violence (IPCC, 2013). Cette tendance à l'intensification correspond aux observations de la période récente, ainsi qu'aux simulations des modèles. Bien que ceux-ci, avec leur maillage de l'ordre de 100 km, ne permettent pas d'étudier des phénomènes de moindre étendue (orages, tornades), il est très probable que ces derniers seraient également concernés⁴⁹.

Bien que la question soit déjà très médiatisée, l'évolution récente des calottes polaires mise en regard avec l'évolution future du climat mérite d'être évoquée (IPCC, 2014).

Au nord, la banquise en désagrégation fait place à une surface océanique moins réfléchissante, donc absorbant davantage le rayonnement solaire ; l'augmentation de la température de l'air qui en résulte a amorcé la fonte des glaciers du Groenland, un processus auto-amplifié qui ne s'arrêtera plus : d'une part, la diminution progressive de l'altitude de la calotte expose celle-ci à des températures d'autant plus élevées que la fonte se poursuit ; d'autre part, cette fonte étant de moins en moins compensée par des chutes de neige en régression, elle fait apparaître de plus en plus fréquemment les couches successives de poussières amenées par le vent et qui, en raison de leur couleur sombre favorisant l'absorption du rayonnement solaire, participent également à l'augmentation de la température. L'absence d'un quelconque mécanisme d'amortissement dans ces phénomènes fait qu'indépendamment du scénario d'émissions de GES par nos sociétés, la calotte groenlandaise disparaîtra, du moins en partie, avec pour conséquence la montée du niveau des océans ; par exemple, une fonte à 50% conduirait à une élévation d'environ 3 mètres.

Au sud, les phénomènes en jeu sont différents (IPCC, 2014) : la désagrégation des langues terminales des glaciers par un océan plus chaud (une augmentation d'un dixième de degré suffit) favorise l'infiltration d'eau entre le socle rocheux immergé de l'Antarctique occidentale et la partie littorale de la calotte glaciaire, sur laquelle prennent appui les glaciers continentaux, arc-boutés les uns sur les autres. A la manière d'un château de cartes, une déstabilisation de la partie basse entraîne un écroulement progressif de l'ensemble et une accélération de la descente vers la mer d'une quantité de glace susceptible de faire s'élever le niveau de la mer de 6 mètres, qui viennent s'ajouter aux 3 mètres précédents et à la dilatation thermique de l'eau sous l'effet du réchauffement.

46/ Il est à noter qu'avec la hausse de 1,5°C qu'a connu la France depuis le début du XX^e siècle, certaines forêts françaises sont déjà en train de mourir en raison de leur inadaptation à des conditions climatiques plus chaudes et plus sèches ; il est très probable qu'avec une hausse supplémentaire de 3°C, elles disparaîtraient en grande partie.

47/ Selon le rapport de la mission interministérielle *Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts* de juillet 2010, les forêts landaises ou franciliennes de 2050 pourraient être aussi « inflammables » que celles de l'arrière-pays méditerranéen de 2010 (rapport disponible en ligne : <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/impacts-du-changement-climatique-sur-les-phenomenes-hydrometeorologiques/changement-climatique-et-feux-de-forets>).

48/ Rappelons qu'une caractéristique du réchauffement climatique dû à l'accroissement de l'effet de serre est l'augmentation du gradient thermique vertical.

49/ La tornade qui a dévasté le sud de la Moravie (République tchèque) le 24 juin 2021 pourrait en être un signe précurseur.

A l'échelle des temporalités humaines, les phénomènes qui viennent d'être brièvement évoqués sont lents : l'échéance de cette montée du niveau des océans est estimée à « quelques siècles », mais elle dépend de l'augmentation de la température moyenne. Par exemple, dans l'hypothèse où, en 2100, la température moyenne serait supérieure de 2°C à la valeur actuelle, la variation du niveau des mers d'ici cette date serait de l'ordre de 40 cm ; mais elle serait de plus de 80 cm avec 3°C (IPCC, 2019).

Le rappel de ces quelques effets⁵⁰, parmi d'autres, du réchauffement climatique — et ce, dès les prochaines décennies — est d'attirer l'attention sur la pression supplémentaire auxquelles seront confrontées nos sociétés et qui rendra encore plus difficile la gestion des problèmes relatifs aux pénuries de combustibles fossiles et de minerais évoquées précédemment. Cet état de fait pointe une situation d'urgence, donc une pénurie de temps pour trouver et mettre en œuvre des mesures pour gérer cette situation inédite.

Conclusion

L'humanité pourrait sans doute faire face — tout en maintenant les modes de vie actuels⁵¹ — à une contrainte à la fois : celle de l'énergie, celle des métaux ou celle du changement climatique. Mais le défi actuel est d'avoir à faire face aux trois — pic énergétique, pic géologique, menace climatique — à peu près simultanément : pour continuer à croître, il est nécessaire de mobiliser plus d'énergie pour extraire de notre environnement des métaux moins concentrés, plus de métaux pour en extraire une énergie moins accessible (Bihouix, 2014, p.67) ; et dans les deux cas, rejeter plus de gaz à effet de serre.

50/ Dont certains sont d'ores et déjà inévitables.

51/ Une situation de *statu quo* posant une sérieuse question d'équité : *quid* des sociétés qui aspirent à des consommations énergétiques comparables à celles des nations les plus « favorisés » ?

3.- Vers une approche BELT de la gestion des pénuries

La gestion des pénuries présuppose une identification préalable des domaines d'action. Par exemple, l'étude de la décomposition des émissions mondiales de GES⁵² montre que ces dernières proviennent à près de 60% de la combustion des énergies fossiles (Jancovici, novembre 2020) : 26 % pour les centrales thermiques⁵³, 7% pour les cimenteries, 10% pour les autres industries⁵⁴, 14% pour les transports⁵⁵, 6% pour le chauffage des bâtiments. Les 40% restants des émissions sont principalement le fait de l'agriculture (notamment l'élevage, qui émet de grandes quantités de méthane) à hauteur de 20% et de la déforestations (11%). S'il serait donc inexact d'assimiler lutte contre le changement climatique et transition énergétique, il existe néanmoins, en termes de domaines d'action, de vastes zones de recouvrement entre les deux, toujours sous contrainte des ressources disponibles (réserves) en minerais nécessaires aux réponses envisageables.

Les modèles de simulation de l'élévation de la température moyenne⁵⁶ en fonction des émissions mondiales cumulées de CO₂ d'origine anthropiques montrent que l'objectif de ne pas dépasser une hausse supérieure à 2°C d'ici 2100 pourrait être atteint si la quantité annuelle de dioxyde de carbone rejetée par nos sociétés était divisées par 3 d'ici 2050 (IPCC, 2013). Cela signifie que durant les 30 prochaines années, les émissions planétaires d'origine anthropique baissent d'environ 5% par an. Compte tenu du lien étroit unissant l'économie (PIB), la quantité d'énergie consommée et la quantité de CO₂ rejeté, l'objectif des 2°C est réalisable au prix d'une diminution de 5% du PIB (donc une récession économique comparable à celle de la crise sanitaire de 2020), chaque année, pendant les 30 prochaines années.

Certes, d'autres domaines d'action que la diminution du PIB peuvent être envisagés. Pour illustrer cela, Yoichi Kaya, un économiste japonais dans le domaine de l'énergie, imagine en 1993 une équation qui porte son nom, consistant à décomposer le terme de droite de l'égalité triviale « GES = GES » (la quantité annuelle émise de gaz à effet de serre d'origine anthropique est égale à elle-même) en un produit de quatre facteurs dont chacun a une signification concrète, quantifiables et interprétable ; afin que l'égalité soit respectée, le dénominateur de chacun d'entre eux est égal au numérateur du suivant :

$$\text{GES} = (\text{GES}/\text{Energie}) \times (\text{Energie}/\text{PIB}) \times (\text{PIB}/\text{POP}) \times \text{POP}$$

Selon cette décomposition, la quantité émise de GES est donc égale au produit de l'intensité carbone⁵⁷, de l'efficacité énergétique⁵⁸, du PIB par habitant et du nombre d'habitants. En

52/ En 2016, les émissions mondiales de CO₂ liées à la combustion d'énergies fossiles s'élevaient à 32 Gt.

53/ 19% charbon, 7% gaz et fuel.

54/ L'essentiel des émissions des industries provient de la fabrication des matériaux de base, comme les métaux et les plastiques.

55/ Routier 10%, maritime 2%, aérien 2%

56/ L'élévation de température est mesurée par rapport à la situation de référence, correspondant au début des émissions anthropiques massives de CO₂, à partir de la moitié du XIX^e siècle.

57/ L'intensité carbone est la quantité de GES émis pour la production d'une unité d'énergie (or près de 85% de l'énergie consommée dans le monde provient des énergies fossiles, fortement émettrices de GES).

58/ L'efficacité énergétique est l'énergie nécessaire pour produire un bien ou un service. Ce terme mesure donc le « degré de gaspillage » de l'énergie : c'est dans ce facteur qu'intervient, par exemple, l'isolation thermique des bâtiments, ou encore l'efficacité énergétique des objets utilisés au quotidien.

d'autres termes, les grandeurs que l'équation de Kaya prend en compte sont : comment l'énergie est produite, dans quelle mesure elle est gaspillée, combien d'énergie est utilisée par personne (en raison de la corrélation entre énergie et PIB) et la population totale.

En dépit des critiques qu'elle peut susciter⁵⁹, l'équation de Kaya a le mérite de mettre en évidence des domaines d'action pour réduire nos émissions de GES. Ces domaines peuvent d'ailleurs être regroupés en deux catégories, l'une de nature « technique » (intensité carbone et efficacité énergétique), l'autre de nature « comportementale » (PIB par habitant et nombre d'habitants).

Selon la publication en ligne *Our World in Data*⁶⁰, entre 1960 et 2016, l'intensité carbone du mix énergétique et l'efficacité énergétique ont conduit à des diminutions d'émissions d'environ 15% et 45%, respectivement⁶¹ ; le produit de ces deux facteurs est de l'ordre 0,5, ce qui signifie que les « progrès technologiques » ont permis de diviser par deux les émissions de GES au cours du dernier demi-siècle. Mais sur la même période, la population a augmenté de 150% et le PIB par habitant de 250% ; les « comportements » ont donc conduit à multiplier les émissions de GES par huit. Nous retrouvons bien évidemment (par construction même de l'équation de Kaya) l'augmentation constatée des émissions de CO₂ d'origine anthropique, qui sont passées de 9 Gt en 1960 à un peu plus de 35 Gt en 2016, soit une multiplication par quatre (en ordre de grandeur).

Afin de limiter le réchauffement global à 2°C au maximum d'ici 2050 par rapport à 1850, il est nécessaire, nous l'avons vu, de diviser par 3 les émissions mondiales de GES d'ici 2050.

Or pour les deux facteurs « comportementaux » de l'équation de Kaya, les estimations⁶² sont à la hausse : les 9,8 milliards d'habitants prévus en 2050 et les 3% de croissance annuelle du PIB par habitant correspondent à des augmentations d'environ 30% et 140% respectivement, soit une multiplication par trois de la composante « comportementale » des émissions au cours des trois prochaines décennies. Dans cette éventualité, le respect de l'objectif « 2°C maximum » équivaut à diviser par neuf la composante « technique » (intensité carbone et efficacité énergétique) si c'est sur cette dernière que devait reposer la totalité de l'effort à fournir, une solution politiquement mieux acceptable que celle qui préconiserait une diminution radicale de la population combinée à une sévère décroissance économique. « Mieux acceptable », certes ; mais faisable ?...

Au travers de la question des émissions de GES⁶³, cette lecture bipolaire de l'équation de Kaya rappelle un débat déjà ancien sur la manière de faire face à un problème — par exemple un risque de pénurie — avec, d'un côté, des solutions faisant massivement appel à des dévelop-

59/ En particulier, le choix des quatre facteurs peut être qualifié d'arbitraire dans la mesure où l'égalité « GES = GES » peut faire l'objet d'une infinité d'autres décompositions — même les plus fantaisistes — sans que sa « justesse mathématique » soit remise en cause, puisque les termes ne sont pas indépendants : la modification d'un facteur modifie la valeur des autres facteurs (<http://development-contours.com/identity-politics-kaya-red-queens-and-a-dash-of-climate-cROUTONS/>). C'est donc l'indépendance des termes de l'équation de Kaya qui doit être questionnée, en particulier l'effet rebond (par exemple, une forte diminution de l'intensité carbone pourrait avoir un effet incitatif à faire moins d'efforts sur l'efficacité énergétique).

60/ <https://ourworldindata.org/>. Cette publication s'attache à présenter régulièrement des données actualisées relatives aux évolutions des conditions de vie dans le monde.

61/ De moins en moins de GES par unité d'énergie ont donc été émis et l'énergie est utilisée de manière de plus en plus efficace.

62/ <https://www.un.org/development/desa/fr/news/population/world-population-prospects-2017.html>

63/ Cette entrée par les émissions, qui n'est pas celle retenue dans le cadre de ce document, n'en est pas moins intimement liée à cette dernière, compte tenu des vastes zones de recouvrement entre consommation d'énergie et émissions de CO₂.

pements de techniques de pointe et, de l'autre, des réponses fondées sur une diminution radicale des prélèvements de ressources grâce à un « juste dosage technologique » guidé par une logique de sobriété matérielle et énergétique. Bien que, comme nous le verrons, cette opposition dépasse largement la question technologique stricte, c'est en référence à cette dernière que nous utiliserons le qualificatif de *high tech* pour la première approche, *low tech* pour la seconde. Le choix de ces termes — de surcroît des anglicismes — fera l'objet d'une discussion dans le cadre de ce chapitre.

3.1.- Un débat ancien : Domsdayers versus Cornucopiens

La question de la capacité du progrès technologique à sauver — ou non — l'humanité des diverses situations de crise auxquelles elle sera confrontée remonte, au moins, à la fin des années 1940. A la sortie de la Seconde guerre mondiale, deux ouvrages marquent les esprits : l'un, intitulé *Road to survival*⁶⁴, est écrit par l'écologue et ornithologue américain William Vogt, spécialiste de la question du contrôle des populations ; l'auteur du second (*Our Plundered Planet*⁶⁵) est le célèbre naturaliste Henry Fairfield Osborn Jr., président de la *New York Zoological Society*. La thèse défendue dans ces deux ouvrages, qui relèvent d'une pensée néo-malthusienne, est que la croissance démographique couplée avec l'augmentation de la consommation par personne (les deux derniers facteurs de l'équation de Kaya) fera exploser les limites planétaires et que l'humanité se trouvera confrontée, à l'horizon d'une trentaine d'années, à de graves problèmes d'accès aux ressources et de pénurie, donc de famine d'ampleur planétaire. Dès leur parution en 1948, ces deux ouvrages connaissent un succès mondial⁶⁶, mais provoquent une vive réaction d'opposants (économistes et futurologues⁶⁷, notamment) qui attirent l'attention sur ce qui leur apparaît comme un grave défaut de raisonnement chez ces « lanceurs d'alerte écologistes » (pour reprendre la terminologie actuelle) : le fait de ne pas tenir compte de cette donnée pourtant essentielle qu'est le progrès technologique, alors même que celui-ci a toujours permis à l'espèce humaine de repousser les limites au fur et à mesure de leur apparition au cours de l'histoire. Par exemple, les prévisions catastrophistes de Thomas Maltus s'étant révélées être fausses, il n'y a aucune raison que celles de ces néo-malthusianistes se réalisent.

Au fil du temps, les intenses débats que suscite cette question de la croissance (économique et démographique) et de ses limites se cristallisent autour de deux courants de pensée, désormais connus sous les sobriquets dont chacun des deux camps a fini par affubler l'autre : les *Domsdayers* se retrouvent ainsi face aux *Cornucopiens*. Des deux côtés, les travaux et publications se multiplient.

Dans le camp des « tenants de l'apocalypse »⁶⁸ citons *The Population Bombe* (La Bombe P) de

64/ Vogt, W., *Road to survival*, Willial Sloane Assoc, 1948 (traduction en français : Vogt, W., *La faim du monde*, Hachette, 1950).

65/ Osborn, H. F., *Our Plundered Planet*, Boston, Little, Brown and Co, 1948 (traduction en français : Osborn, H. F., *La planète au pillage*, Payot, 1949).

66/ A propos de *Our Plundered Planet*, Albert Einstein écrit : « On sent d'une façon aiguë en lisant ce livre la futilité de la plupart de nos querelles politiques comparées avec les réalités profondes de la vie. »

67/ Inventé dans les années 1940 par un professeur allemand, Ossip Kurt Flechtheim, le terme « futurologie » désigne un domaine interdisciplinaire s'attachant à analyser des futurs plausibles ou probables. Dans les années 1950, la futurologie connaît un développement important aux Etats-Unis, notamment sous l'impulsion de l'U.S. Air Force (Armée de l'Air).

68/ Domsday : apocalypse, en anglais. S'inscrivant dans la continuité de leurs prédécesseurs de l'immédiat après-guerre, les Domsdayers, estimant que les ressources n'existent qu'en quantités finies et que les écosystèmes ont une capacité limitée à assimiler nos déchets, s'attachent à questionner la tenue dans la durée du modèle de crois-

Paul Ralph Ehrlich qui, grâce au succès qu’il rencontre, contribue à la sensibilisation d’un vaste public aux questions environnementales et au rôle joué par la taille de la population humaine⁶⁹. Paru en 1968, cet ouvrage est suivi quatre ans plus tard du fameux « Rapport Meadows »⁷⁰ commandé par le Club de Rome à un groupe de chercheurs du *Massachusetts Institute of Technology* qui, sur la base d’une simulation informatique dynamique⁷¹ du « système Terre », pointent les limites du modèle de croissance et présentent différents scénarios parmi lesquels les seuls à ne pas se terminer par un effondrement sont ceux qui abandonnent la recherche d’un accroissement perpétuel de la production. Il est important de noter que contrairement à ce qu’affirment certains détracteurs de ces travaux, l’équipe Meadows n’a jamais formulé de prédiction précise et datée, comme par exemple la « fin du pétrole en l’an 2000 ». Sur ce dernier point, c’est même le contraire, puisque — comme le rappelle Dennis Meadows dans la « Préface des auteurs » de la version actualisée de 2004 de l’ouvrage — « les scénarios présentés dans [...] *The Limits to Growth* [...] montrent que la première décennie du XXI^e siècle sera encore marquée par la croissance »⁷² (ce qui, de notre point de vue actuel, s’est avéré être exact). La seule conclusion forte du « Rapport Meadows » de 1972 est, répétons-le, que la croissance perpétuelle conduira tôt ou tard à un « effondrement ».

Dans le camp adverse, les Cornucopiens — « tenants de l’abondance⁷³ et du génie humain » — ont une vision plus optimiste au sens où selon eux, la créativité et l’intelligence finissent toujours par triompher des problèmes qui se présentent. En particulier, ils s’appuient sur le postulat que lorsqu’une ressource devient rare, la recherche et l’innovation s’en trouvent stimulées, ce qui permet de trouver un substitut « au moins aussi performant et abondant que ce qu’il remplace »⁷⁴ ; ou, selon la terminologie économique⁷⁵, le « signal prix » donné par le marché conduit inévitablement à l’émergence d’un produit de substitution. Un des acteurs de ce courant est l’économiste américain William Nordhaus qui, dans sa réaction critique au « Rapport Meadows », introduit la notion de « technique limite » (*backstop technology*) permettant de modéliser l’innovation qui émergerait en cas de contrainte, et donc de contourner l’obstacle physique de la finitude des ressources mis en avant par les Domsdayers. Cette même confiance en la possibilité d’une poursuite de la croissance est partagée par d’autres économistes, dont Julian Simon est une figure emblématique. Dans son ouvrage *The Ultimate Resource* (La ressource ultime)⁷⁶, il défend l’idée que la richesse grandissante et la technologie permettent l’apparition de plus de ressources. En effet, bien qu’elles puissent apparaître limitées physiquement, ces dernières doivent néanmoins être considérées comme économiquement

sance économique et démographique de la période dite « des 30 glorieuses ».

69/ Ehrlich, P., *The Population Bomb*, Ballantine Books, 1968 (traduction en français : Ehrlich, P., *La Bombe P*, Fayard, 1970). L’ouvrage a fait l’objet de vives critiques en raison de ses prédictions qui se sont avérées être infondées du fait de l’impact de deux facteurs non pris en compte : la révolution verte et la baisse de la croissance démographique de certains pays (notamment européens).

70/ Parue sous le titre *The Limits To Growth* (Meadows et al., 1972), cette publication a fait l’objet d’une actualisation en 2004, *The Limits To Growth. The 30-Year Update*, dont la traduction française est régulièrement rééditée (Meadows et al., 2020).

71/ Dérivé du modèle *World2* de Jay W. Forrester, le modèle utilisé, *World3*, est décrit en détail dans l’ouvrage *Dynamics of Growth in a Finite World*.

72/ (Meadows et al., 2020, p.31)

73/ *Cornu copia* signifie corne d’abondance, en latin.

74/ <https://blog-isige.minesparis.psl.eu/2019/09/25/ce-que-disent-les-mots/>

75/ Rappelons que le courant Cornucopien présente des points communs avec la pensée économique libérale.

76/ Simon, J., *The Ultimate Resource*, Princeton University Press, 1981.

infinies grâce au recyclage des ressources anciennes et au développement de nouvelles alternatives par le marché. S'inscrivant résolument en faux par rapport aux idées malthusiennes, Julian Simon estime que loin d'être un frein de la croissance, l'augmentation de la population serait au contraire une solution à la rareté des ressources ; car la « ressource ultime », ce sont les êtres humains eux-mêmes avec leur capacité à innover, potentiellement infinie.

Il faut bien reconnaître qu'avec le recul, la capacité de notre espèce à mettre en œuvre des solutions de substitution performantes est illustrée par de nombreux exemples de « transitions réussies » au sens où elles ont non seulement permis de poursuivre le développement et la croissance, mais de les accélérer. Dans le secteur de l'énergie, par exemple, le remplacement du bois par le charbon comme combustible dans les forges a permis la révolution industrielle tout en sauvant les forêts européennes ; de façon analogue, la pénurie imminente d'huile de baleine utilisée pour l'éclairage a été résolue grâce au pétrole, dont l'usage étendu à d'autres domaines a, là encore, profité à encore plus de croissance ; en lien avec le pétrole, le recours massif à la mécanisation et à la production d'engrais et de produits phytosanitaires dans le secteur de l'agriculture a permis de répondre, dans les années 1960 et 1970, aux vives inquiétudes⁷⁷ relatives à la capacité de nourrir une population en croissance rapide ; ...

Ces exemples, parmi beaucoup d'autres, sont de nature à rendre les thèses « cornucopiennes » mieux audibles et politiquement plus acceptables que celles des *Doomsdayers*, souvent qualifiées d'alarmistes. Le face à face perdure néanmoins.

Initié au sortir de la Seconde Guerre mondiale, le débat dont nous n'avons fait ici qu'esquisser les origines se poursuit aujourd'hui, avec un glissement progressif vers d'autres thématiques. Depuis le début du XXI^e siècle, celle du changement climatique occupe une place de plus en plus importante. Cette importance grandissante se retrouve dans la multiplication des initiatives et déclarations sur le sujet : Etat d'urgence climatique ; *Make our planet great again* ; Conseil de défense écologique ; *C40 cities* ; *One Planet Summit* ; Grenelles ; Assises ; ... Pourtant, en dépit des annonces, prises de position, *Conferences of Parties* (COP), etc, l'inflexion de la tendance à l'augmentation des émissions mondiales de CO₂ se fait toujours attendre : après leur chute historique⁷⁸ liée à la crise sanitaire de 2020, elles repartent à la hausse en 2021, comme le constate l'Agence internationale de l'énergie⁷⁹.

En dépit de la très grande variété de propositions élaborées en réponse au problème du changement climatique, en dépit de la richesse des débats que ces propositions suscitent, la dualité des courants de pensée sous-jacents à ces différentes réponses reste toujours très présente et clairement identifiable.

Le camp des *Doomsdayers* compte aujourd'hui dans ses rangs aussi bien les tenants de la non-croissance et de la décroissance⁸⁰ que les collapsologues (théoriciens de l'effondrement)⁸¹,

77/ Inquiétudes ayant d'ailleurs contribué au développement et au succès des idées des *Doomsdayers*.

78/ https://www.lemonde.fr/planete/article/2020/12/11/la-chute-historique-des-emissions-de-co2-en-2020-ne-devrait-pas-se-prolonger_6063030_3244.html

79/ https://www.challenges.fr/green-economie/climat-les-emissions-mondiales-de-co2-sont-deja-reparties-a-la-hausse_761748

80/ Parmi les publications marquantes au cours de la dernière décennie autour du concept à la fois politique, économique et social de la décroissance, citons *Prosperité sans croissance : la transition vers une économie durable* de Tim Jackson (économiste britannique) et *Sortir de la société de consommation* de Serge Latouche (économiste français).

81/ Initiée, en France, par Yves Cochet et Agnès Sinaï (co-fondateurs du laboratoire d'idées *Institut Momentum*) au début des années 2010, la collapsologie est un courant de pensée transdisciplinaire (faisant intervenir l'écologie, l'économie, l'anthropologie, la sociologie, la psychologie, la biophysique, ... parmi d'autres disciplines)

mais également les adeptes de la sobriété volontaire⁸², de la déglobalisation⁸³ ou de la résilience locale⁸⁴, ainsi que les partisans de l'approche dite *low tech* (sur laquelle nous reviendrons plus en détail).

Les Cornucopiens d'aujourd'hui sont eux aussi représentés par des personnalités venant d'horizons très divers (parmi les plus connues, citons Laurent Alexandre⁸⁵ et Jeremy Rifkin⁸⁶, par exemple), mais qui ont toutes pour point commun leur positionnement en tant que promoteurs d'une réponse technologique performante aux problèmes environnementaux : révolution digitale comme levier majeur de dématérialisation de l'économie, économie de la connaissance, nanotechnologies, biotechnologies, géo-engineering, etc. Comme chez leurs prédécesseurs, la technologie occupe donc toujours une place centrale, avec une prédilection toute particulière pour les techniques de pointe ou *high-tech*⁸⁷. C'est pour cette raison que dans la suite de notre propos, nous utiliserons cette expression — qui présente le double avantage de la concision et de l'intelligibilité⁸⁸ — pour qualifier la déclinaison actuelle de ce courant de pensée.

s'attachant à étudier les risques et les conséquences d'un effondrement de la civilisation industrielle. Le terme a été inventé par Pablo Servigne et Raphaël Stevens, qui l'ont popularisé dans leur essai *Comment tout peut s'effondrer. Petit manuel de collapsologie à l'usage des générations présentes*. Bien que le caractère scientifique de la collapsologie soit réfuté par certaines critiques (Igalens, 2017), de nombreux centres universitaires y consacrent des travaux de recherche (Shackelford, 2020).

82/ Mode de vie consistant à réduire intentionnellement sa consommation, la sobriété (ou simplicité) volontaire plonge ses racines dans une histoire plusieurs fois millénaire. Elle repose sur une « philosophie de vie » selon laquelle la consommation n'apporte pas le bonheur et accroît l'aliénation, ce en quoi elle s'oppose au discours économique et social dominant (selon lequel la qualité de vie est considérée comme synonyme du progrès technique et du développement de la consommation). Les motivations des tenants de ce courant peuvent être multiples : philosophique, économique, écologique, religieux, voire ostentatoire. Il est à noter que les critiques de la sobriété mettent en avant l'impossibilité de « revenir en arrière » et assimilent ce courant à la « négation du progrès » (ce que pourtant les adeptes de ce mode de vie ne réclament pas). Parmi les publications récentes, citons *Sobriété volontaire : en quête de nouveaux modes de vie*, un ouvrage collectif sous la direction du philosophe Dominique Bourg et de Philippe Roch. Et plus spécifiquement sur la sobriété énergétique : https://negawatt.org/IMG/pdf/sobriete-scenario-negawatt_brochure-12pages_web.pdf.

83/ Selon Walden Bello, père de ce concept, la « déglobalisation » (ou démondialisation) est un modèle de réorientation des économies, consistant à renverser l'ordre des priorités : de celle à la production pour l'exportation vers celle à la production destinée aux marchés locaux (Bello, 2002).

84/ Le principe de la doctrine du localisme est de favoriser « le local » et ses diverses déclinaisons — démocratie participative, cohésion sociale, économie de proximité, emploi local, ... — dans un souci de préservation de l'environnement (notamment en lien avec la diminution des besoins de transport de personnes et de marchandises qui en résulte). Depuis le début du XXI^e siècle, divers mouvements et initiatives inspirés du localisme ont vu le jour : *Transition Towns* (Villes en transition), *Open Source Ecology*, AMAP (Associations pour le maintien de l'agriculture paysanne), Labels régionaux, Locavores, Financements participatifs locaux, SEL (Systèmes d'échanges locaux), SCIC (Sociétés coopératives d'intérêt collectif), Monnaies locales, Habitat groupé (ou cohabitat), Micro-crédits, etc. Le *Petit traité de la résilience locale* (Sinai et al., 2015) donne un aperçu de la doctrine du localisme.

85/ Pour qui « seul le développement technologique peut décarboner l'économie mondiale » (<https://www.mediapart.fr/journal/france/281119/climat-apres-le-scepticisme-scientifique-le-scepticisme-liberal>)

86/ Auteur des best-sellers *L'Économie hydrogène* en 2002 (cet ouvrage a fait l'objet d'une récente analyse critique solidement argumentée : <https://www.discoverthegreentech.com/l-economie-hydrogene-jeremy-rifkin/>), *L'Age de l'accès* en 2005 et, en 2011, *La troisième révolution industrielle*, ce dernier ayant suscité une vive réaction en raison d'un propos qualifié par certains de « rêve technologique » grâce auquel « il n'est plus nécessaire de penser aux impasses de notre trajectoire, à nos vrais besoins, il suffit de s'en remettre aux grandes entreprises, aux experts et aux entrepreneurs high-tech de toutes sortes qui vont nous offrir les solutions techniques pour sortir de l'impasse » (https://www.liberation.fr/terre/2014/10/21/la-troisieme-revolution-de-rifkin-n-aura-pas-lieu_1126521/).

87/ Abréviation de *high technology*.

88/ Le terme *high-tech* (orthographié également *high tech*, *high tech'* ou *high-tech'*) est passé depuis longtemps dans le langage usuel (bien que son emploi ne soit pas recommandé par l'Académie française). Le recours à cet anglicisme nous permet par ailleurs d'esquiver le débat terminologique entre adeptes des trois variantes que sont

3.2.- Les impasses de la high-tech face aux trois pénuries

Nous avons évoqué plus haut la prédilection des décideurs vis-à-vis des solutions high-tech ; il est vrai que le discours souvent alarmiste des Doomsdayers met mal à l'aise et contraste singulièrement avec le message optimiste et confiant relayé par le camp adverse. Néanmoins, force est de constater que la situation actuelle est à ce point inédite dans l'histoire de l'humanité et les pénuries imminentes à ce point plurielles que chaque proposition de réponse high-tech s'avère soit inopérante (en raison d'un obstacle imprévu) ou d'ampleur trop limitée, soit relever de conjectures relatives à des développements futurs aux temporalités incertaines. En d'autres termes, l'approche high-tech semble aujourd'hui confrontée à des impasses ou limites, dont le caractère « provisoire » mis en avant par les tenants de ce courant de pensée peut néanmoins être mis en doute en raison non seulement de certains phénomènes physiques (par définition « non négociables ») que du caractère « systémique » de la société actuelle. Dans son ouvrage *L'Age des low tech*, Philippe Bihouix propose de ces impasses ou de ces limites une revue solidement argumentée (Bihouix, 2014), dont nous reprenons ici quelques éléments en les complétant par une bibliographie additionnelle.

Comme nous l'avons rappelé aux chapitres précédents, notre société industrielle repose sur l'exploitation de ressources — énergies fossiles et minerais (métaux) — certes non renouvelables, mais disponibles en quantités vraisemblablement encore suffisantes pour plusieurs siècles⁸⁹. Mais c'est la transformation de *ressources* (potentiellement exploitables) en *réserves* (effectivement exploitables) qui pose problème : après épuisement des gisements et mines les moins « coûteux » à exploiter — en termes aussi bien d'accessibilité (proximité de la surface) que de qualité (concentration) — il est nécessaire d'aller plus loin, de creuser plus profond et/ou de mettre en œuvre des techniques plus pointues pour extraire une ressource de moindre qualité (donc nécessitant un surcroît de traitement après extraction), c'est-à-dire mobiliser davantage d'énergie. A cet égard, l'exploitation de combustibles fossiles — par rapport à celle des minerais métalliques — doit tenir compte d'un facteur supplémentaire, qui est le taux de retour énergétique (TRE, en anglais EROI : *Energy Return On Energy Invested*), très variable selon la ressource. Dans le cas du pétrole, il suffisait « d'investir » un baril pour en produire une centaine dans un champ *onshore* californien en 1950, alors que ce même baril ne permet d'en produire que trois dans le cas de certains sables asphaltiques canadiens⁹⁰. De plus, l'exploitation d'énergies moins accessibles requiert davantage de métaux, comme c'est le cas, par exemple, d'une plateforme *deep offshore* avec ses forages directionnels et ses navires de ravitaillement. Rappelons qu'il en est de même pour les énergies renouvelables, dont la production *via* éoliennes et cellules photovoltaïque mobilise de grandes quantités de métaux (pas seulement) rares amenant à terme, comme nous l'avons vu, une pénurie de minerais qui limite de manière radicale la possibilité de répondre par les énergies vertes à la pénurie des combustibles fossiles.

La solution très médiatisée du **recyclage** *ad vitam æternam* se heurte elle aussi à des limites

« techniques de pointe » (sans doute la forme correcte), « hautes technologies » et « technologies de pointe » (également d'usage courant).

89/ La question « morale » de la consommation — même si c'est à « long terme » — d'un stock fini n'en demeure pas moins entière.

90/ Selon un récent article de la revue *Nature Energy* (Raugei, 2019), il convient néanmoins de relativiser la valeur du TRE en fonction du point d'utilisation (*point of use*) du pétrole, afin de tenir compte du coût énergétique de raffinage, de la manutention et du transport, mais également du rendement de la centrale thermique lorsque l'énergie présente dans le pétrole est convertie en électricité.

(<https://energieetenvironnement.com/2019/02/24/leroi-a-manipuler-avec-precaution/>).

de différentes natures. Outre l'impossibilité de refondre certains matériaux (tels les polymères thermodurcissables), la complexité des produits, des composants (ceux des ordinateurs, par exemple, comportent des dizaines de métaux différents) et des matériaux (alliages métalliques, mélanges de plastiques et d'additifs, matériaux composites) ne permet pas d'identifier, de séparer et de récupérer les matières premières. Même les métaux aisément repérables et suffisamment coûteux pour justifier « économiquement » le recyclage, ce dernier n'est que partiel⁹¹. Quant aux métaux (en grand nombre) faisant l'objet d'usages dispersifs (encres, peintures, additifs, pesticides, fertilisants,...), ils sont par définition non recyclables. « *Perte par dispersion (à la source), perte mécanique (la boîte de conserve, l'agrafe et le stylo partis en décharge), perte fonctionnelle (par recyclage inefficace), [...] : tel est notre destin, le cercle vertueux du recyclage est percé de partout, et à chaque « cycle » de consommation on perd définitivement une partie des ressources.* » (Bihouix, 2014, p.69). Tant qu'un téléphone portable usagé ne pourra pas être transformé en un téléphone portable neuf moyennant un coût énergétique global significativement inférieur à la production de ce dernier, le caractère circulaire du recyclage restera un mythe. Compte tenu de la complexité des produits actuels (complexité « justifiée » par de meilleures performances énergétiques et environnementale), la « circularité » semble condamnée à demeurer très relative.

C'est précisément cette question de la complexité croissante (caractéristique des approches high-tech) qui interroge la pertinence des « **technologies vertes** » en tant que réponse aux pénuries. Car d'une certaine manière, elles joueraient même le rôle de facteur aggravant, dans la mesure où elles reposent, pour l'essentiel, à la fois sur des technologies nouvelles, sur le recours à une variété de plus en plus grande de métaux de moins en moins répandus et sur la complexification des produits, ce qui accroît encore davantage la difficulté du recyclage (et donc le problème de la pénurie de minerais). Dans le domaine de l'automobile, par exemple, une solution high-tech pour répondre aux impératifs de réduction des émissions de CO₂ sans renoncer aux caractéristiques des véhicules (taille, vitesse, résistance au choc) passe par leur allègement en recourant à des alliages métalliques encore plus complexes et irrécupérables en fin de vie. Il en est de même pour les bâtiments à énergie positive ou pour la « ville intelligente » nécessitant la mise en place d'un macrosystème technique fondé sur de nombreux équipements high-tech (*smart grids*, compteurs communicants, etc) gourmands en électronique et en métaux rares.

Dans le domaine (déjà abordé plus haut) des énergies renouvelables, divers scénarios sont régulièrement proposés pour remplacer les énergies fossiles tout en maintenant les consommations actuelles. Parmi les plus connus (depuis le début du XXI^e siècle), citons le projet Desertec⁹², prévoyant l'installation de centrales solaires à concentration dans le Sahara pour une production (d'ici 2050) correspondant à 13% de la consommation européenne actuelle et, plus ambitieux, le WWS (Wind Water Sun) de Mark Z. Jacobson de l'université de Stanford, censé couvrir (également en 2050) l'ensemble des besoins du monde en énergie exclusivement éolienne, hydraulique et solaire (Jacobson *et al.*, 2015)⁹³. L'un comme l'autre sont de nature à faire rêver. Mais s'il est vrai qu'en théorie, quelques dizaines de milliers de kilomètres carrés de panneaux solaires installés au Sahara pourraient couvrir la totalité des besoins énergétiques

91/ Le nickel des aciers inoxydables ne serait recyclé qu'à 55%, soit une perte d'environ 80% de la ressource au bout de trois cycles d'utilisation

92/ Le projet, initié en 2003 dans le cadre de la Fondation Desertec, a été abandonné en 2021, faute de financement (<https://www.elwatan.com/edition/economie/energies-renouvelables-desertec-na-pas-vu-le-jour-a-cause-de-son-cout-27-03-2021>).

93/ Le concept a été complété dans le cadre d'une publication récente (Jacobson, 2020).

mondiaux, un tel déploiement équivaut à plusieurs siècles de la production actuelle de cellules photovoltaïques, à renouveler tous les trente ou quarante ans. Certes, « il suffirait » de centupler les capacités de production (de telles révolutions se sont déjà produites par le passé) ; mais outre le défi industriel que représente la construction des usines d'usines nécessaire et de toutes les bases logistiques afférentes (sans compter le stockage de cette énergie intermittente et la distribution de l'électricité produite), la question de la disponibilité en métaux et en matériaux synthétiques issus du pétrole et difficiles à recycler reste entière, sans parler des problèmes d'entretien (quel est le coût énergétique du nettoyage 100 000 km² de panneaux solaires après chaque tempête de sable ?) et des graves conséquences environnementales, à l'échelle mondiale, de cette solution⁹⁴. Le projet WWS (qui compte son lot de partisans⁹⁵ et de sceptiques⁹⁶) de M.Z. Jacobson soulève les mêmes interrogations : *quid* des réserves mondiales de matières⁹⁷ nécessaires à la production, l'entretien et le renouvellement d'autant de centrales solaires, d'éoliennes et de dispositifs marins récupérant l'énergie des vagues et de la houle ? Et *quid* de la quantité de combustibles fossiles (navires, grues, camions, hélicoptères,...) nécessaire au déploiement d'un parc aussi gigantesque, souvent à des endroits d'accès difficile ?

De manière générale, les technologies vertes envisagées « à la bonne échelle », c'est-à-dire susceptibles d'apporter une réponse au problème d'une pénurie énergétique d'envergure mondiale, sont chaque fois rattrapées par des facteurs physiques non seulement de disponibilité de métaux et d'impossibilité de leur recyclage, mais également d'intermittence (nécessitant des dispositifs de stockage gourmands en métaux rares⁹⁸) et de consommation d'espace. D'autres facteurs viennent s'y ajouter, comme le bien connu effet Jevons ou « effet rebond » (baisse de coût d'utilisation entraînant une demande accrue) ou encore « **l'effet système** », caractéristique d'une situation où différents problèmes en interaction « *se renforcent par des boucles de « rétroaction positives* », *c'est-à-dire agissent comme des facteurs aggravants : moins de métaux implique moins d'énergie, et donc à terme moins d'accès aux métaux ; la saturation urbaine augmente la consommation d'énergie et de ressources métalliques ; les pratiques agricoles épuisent les sols qui requièrent plus d'intrants, donc plus d'énergie.* »⁹⁹ Dit autrement, la complexité croissante induite par une succession de réponses high-tech imbriquées les unes dans les autres fait qu'une supposée solution technique à une pénurie crée des dégâts ou d'autres pénuries ailleurs, mais également qu'une partie des innovations « *ne sert qu'à gérer, ou tenter de gérer, la complexité ou les effets négatifs induits par les innovations précédentes* ». En assemblant des sous-systèmes localisés à différents endroits de la planète, en utilisant des matières premières provenant de dizaines de pays différents, en fonctionnant en flux tendus, les grandes entreprises participent à cette complexité croissante à mesure que les « solutions » high-tech se multiplient, altérant d'autant plus la capacité du système à résister aux changements économiques et sociaux liés aux pénuries à venir et, plus généralement, à toute perturbation, qu'elle soit de nature climatique, géopolitique, technique (catastrophe industrielle), etc.

94/ <https://www.agenceecofin.com/dossier/2602-85638-transformer-le-sahara-en-un-pole-d-energie-solaire-la-fausse-bonne-idee>

95/ Par exemple : <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/energie-renouvelable-france-37235/>

96/ <https://www.lesechos.fr/thema/transition-energetique/scenario-100-energies-renouvelables-espoir-ou-mirage-1217731>

97/ Les métaux ne sont pas les seuls concernés : le risque de pénurie de matières plus « ordinaires » comme le sable nécessaire au béton des socles des éoliennes est un problème qui pourrait être d'actualité dans un avenir proche.

98/ Où trouver suffisamment de lithium pour équiper des centaines de millions de véhicules électriques ? Et de platine pour un parc équivalent de véhicules à hydrogène ?

99/ Bihouix, 2014, p.82.

Et si les technologies vertes pourraient être une opportunité pour une maîtrise de la production énergétique à l'échelle locale grâce au recours à des technologies simples (solaire thermique domestique, petites éoliennes), l'option high-tech choisie conduit au résultat inverse : seules quelques entreprises transnationales sont à même de fabriquer, d'installer et d'assurer la maintenance d'éoliennes géantes de plusieurs mégawatts, au prix d'une organisation de production mondialisée, de moyens industriels coûteux, d'une logistique hors norme (bateaux, remorques spéciales, grues,...), d'un réseau de fabrication et de distribution de pièces détachées riches en composants électroniques et en techniques de pointe,... ; une situation diamétralement opposée à celle, bien plus résiliente, d'une production autonome, maîtrisable par les populations et les entreprises locales et ancrée dans les territoires.

Les « **énergies prospectives** » (ou « énergies du futur »), fondées sur des technologies en cours de développement ou sur des pistes de recherches plus ou moins prometteuses « à développer », sont également au nombre des réponses high-tech.

Nous pouvons citer par exemple la technologie de la surgénération, avec les réacteurs à neutrons rapides (ayant déjà fonctionné par le passé, comme les projets Phénix et Superphénix en France, abandonnés à la fin du XX^e siècle) pouvant utiliser des « déchets d'uranium » (uranium appauvri) d'autres réacteurs, ou du thorium 232, un métal lourd radioactif (de la même famille que l'uranium), non fissile sous sa forme naturelle, mais capable de se transformer en uranium 233 par absorption d'un neutron ; présente en petites quantités dans la plupart des roches, cette ressource est bien plus abondante et mieux répartie géographiquement que ne l'est l'uranium¹⁰⁰. Si certains voient dans ces technologies¹⁰¹ reposant sur le cycle thorium-uranium une alternative au cycle classique uranium-plutonium (notamment en raison de moindres impacts sur l'environnement et la sécurité) — tout au moins pour « gagner du temps » en attendant la fusion nucléaire —, d'autres les considèrent comme une nouvelle impasse.¹⁰²

Du côté de la « maîtrise de l'énergie des étoiles », la construction du Tokamak¹⁰³ ITER¹⁰⁴ à Cadarache, dans le sud de la France, devrait permettre, d'ici 2025, de produire un premier plasma stable. En cas de succès, l'étape suivante, baptisée DEMO¹⁰⁵, consistera à démontrer (à l'horizon 2040) la faisabilité de l'utilisation de la fusion nucléaire pour produire de l'électricité à grande échelle¹⁰⁶. Enfin, quelques décennies supplémentaires seront nécessaires au développement et à la construction des centrales. Cet horizon annoncé (selon les estimations les plus optimistes) de la seconde moitié du XXI^e siècle est trop éloigné pour envisager que cette

100/ Trois à quatre fois plus abondant dans la croûte terrestre que l'uranium, le thorium présente l'avantage que la totalité de sa masse est utilisable (à masse égale, il contient 40 fois plus d'énergie que l'uranium naturel). Comme il s'agit d'un sous-produit de l'extraction des terres rares, plusieurs milliers de tonnes sont déjà disponibles. Il pourrait « assurer les besoins énergétiques de la planète pendant plusieurs millénaires » (<https://wp.unil.ch/futurs-possibles/2020/02/le-thorium-une-contribution-denergies-non-carbonees-au-climat/>).

101/ « Technologies » au pluriel, car plusieurs types de réacteurs sont envisagés. Le plus sûr et le plus prometteur semble être le « Réacteur à sels fondus » (<https://wp.unil.ch/futurspossibles/2020/02/le-thorium-une-contribution-denergies-non-carbonees-au-climat/>).

102/ <https://www.notre-planete.info/actualites/4739-reacteur-thorium>.

103/ Tokamak : abréviation russe de « chambre toroïdale avec bobines magnétiques ».

104/ *International Thermonuclear Experimental Reactor* (réacteur expérimental thermonucléaire international), ce programme ambitieux auquel participe un consortium de pays est un aboutissement de plusieurs décennies de recherches sur la fusion et doit démontrer que cette dernière peut être utilisée comme source d'énergie à grande échelle, non émettrice de CO₂, pour produire de l'électricité.

105/ *Demonstration Power Plant*.

106/ <https://www.iter.org/fr/sci/tkmkresearch>.

technologie¹⁰⁷ ne joue un rôle dans la gestion de la crise écologique que nous connaissons¹⁰⁸. Il convient également de relativiser la vision parfois idéalisée véhiculée par certains média de cette supposée énergie du futur : bien que la réaction nucléaire elle-même ne soit pas radioactive, le tritium l'est (le « combustible » d'ITER est le couple deutérium-tritium, deux isotopes de l'hydrogène), et le flux de neutrons très énergétiques rayonnés lors de la fusion peut, en bombardant les parois de la cuve du réacteur et ses composants internes, produire de grandes quantités de déchets radioactifs, si bien que les avantages par rapport à la fission ne sont pas évidents¹⁰⁹. La solution pourrait venir de l'hélium-3, dont le comportement « totalement différent dans les réactions nucléaires » permettrait de « nouveaux types de fusion »¹¹⁰ ne requérant ni blindage lourd, ni circuit complexe de vapeur dans les centrales électriques. En revanche, c'est l'approvisionnement en hélium-3 qui pose question, dans la mesure où il serait nécessaire d'aller le chercher sur la Lune. En somme, le recours à cet isotope de l'hydrogène constitue une « surenchère dans la high-tech », sans parler de l'affrontement entre grandes puissances qui pourrait résulter de la compétition internationale d'une « course à la Lune ».¹¹¹

D'autres solutions technologiques prospectives font régulièrement l'objet de publications dressant des états des lieux synthétiques¹¹².

L'hydrogène naturel pourrait, selon certains auteurs, devenir un « nouvel eldorado » énergétique (L'Hôte *et al.*, 2021). Les investigations dans le domaine des possibilités d'exploitation de cette ressource qui jaillit du sous-sol (notamment au voisinage des « cercles des fées » ou le long des failles sous-marines) n'en étant encore qu'à leurs débuts (comme c'était le cas pour le pétrole ou le gaz il y a 160 ans), il demeure beaucoup d'inconnues sur les mécanismes de sa production et sur les réserves exploitables ; car si les outils disponibles permettent de mesurer l'hydrogène qui s'échappe à la surface de la terre, la quantité produite dans le sous-sol est difficile à estimer et les analogies avec le gaz naturel pourraient être trompeuses : la molécule de H₂ étant bien plus petite que celle du méthane, sa diffusion jusqu'à la surface est sans doute plus facile ; par ailleurs, sa consommation dans le sous-sol est certainement importante du fait de sa forte réactivité. La possibilité que de grandes quantités d'hydrogène soient piégées dans des réservoirs souterrains reste néanmoins une question ouverte, les technologies de forage et d'exploitation issues du monde gazier pourraient sans doute s'adapter et l'industrie gazière y trouverait une opportunité de reconversion...

A la différence de l'hydrogène naturel, le développement massif de la géothermie — souvent considérée comme une « ressource inépuisable » (Patriarche *et al.*, 2021) — peut s'appuyer sur des connaissances et des savoir-faire déjà solidement établis (il s'agit d'une « technologie mature ») pour produire non seulement « du chaud et du froid » (chauffage, climatisation), mais également de l'électricité. Étant par ailleurs non intermittente (contrairement au solaire et à l'éolien), la géothermie pourrait être appelée à occuper, dans le « mix énergétique » de la transition, une place bien plus importante qu'aujourd'hui¹¹³. Un tel développement se heurte néan-

107/ Sur laquelle seul un petit nombre de pays auraient la mainmise en raison de sa complexité et de son coût.

108/ <https://www.lemondedelenergie.com/fusion-nucleaire-energie-parfaite/2021/06/21/>

109/ Daniel Jassby, Thierry Pierre. *ITER est une vitrine des défauts de l'énergie de fusion nucléaire*. 2019. ffhal-02112048. (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02112048/document>).

110/ Ce point est contesté par certains physiciens, dont Frank Close.

111/ <https://www.egc.fr/infoguerre/laffrontement-mondial-pour-la-conquete-de-lenergie-du-futur-lhelium-3>

112/ Intitulé « La *terra incognita* de l'énergie », le dossier du numéro de mai 2021 de la revue *Pour la Science* réalisé en partenariat avec le groupe Engie en est un exemple (Pour la Science/Engie, 2021).

113/ 89 TWh, soit 0,3% de la production mondiale d'électricité en 2018 (source : Agence internationale de l'énergie).

moins à un certain nombre d'obstacles¹¹⁴. Certains sont de nature technique : car contrairement au chauffage, utilisant des sources d'eau chaude présentes dans certaines régions du globe à des profondeurs relativement faibles, la production d'électricité nécessite le recours à la chaleur diffuse du roc — récupérée par forage de puits et injection d'eau — à des profondeurs généralement comprises entre 3000 et 10 000 mètres, où règnent des conditions extrêmes : la roche, très dure, use rapidement mèches et tubes de forage ; la chaleur exige des alliages spéciaux coûteux ; les matières corrosives libérées par le forage s'attaquent aux pièces de métal et au béton coulé pour stabiliser le puits ; tuyauteries et valves s'obstruent par la vapeur chargée en minéraux et qui, en raison de sa forte pression, a par ailleurs tendance à fendre la roche le long du puits et à s'échapper par les fissures ; etc... A ces obstacles techniques — auxquels, selon une optique high-tech, le progrès et l'innovation ne manqueraient pas d'apporter des réponses — s'ajoutent des limites énergétiques : non seulement l'exploitation (hypothétique) de la totalité du potentiel géothermique ne représenterait qu'une fraction — certes non négligeables, selon certaines hypothèses — des besoins mondiaux¹¹⁵, mais surtout, la chaleur extraite du sous-sol ne se renouvelle que lentement, de sorte que les puits devraient régulièrement (tous les 4 à 8 ans) être forés à d'autres endroits et la région en exploitation abandonnée au bout de 20 à 30 ans ; d'une certaine manière, « [...] il faut considérer la géothermie comme l'exploitation d'une chaleur «fossile», accumulée dans le passé »¹¹⁶. Enfin, il convient de mentionner également les limites environnementales d'un procédé consistant à injecter en sous-sol de l'eau douce qui peut dissoudre et ramener à la surface divers minéraux potentiellement dangereux (arsenic, mercure,...) ; il en est de même pour les boues de forage, susceptibles en plus de véhiculer des matières radioactives relativement abondantes à ces profondeurs¹¹⁷.

Pour compléter ce rapide tour d'horizon, nous pouvons encore évoquer les multiples modalités innovantes de récupération de l'énergie « présente » dans les océans sous diverses formes — marées, vagues, chaleur, salinité (Buckley, 2021) — ou encore de celle des vents d'altitude grâce à des « cerf volants » (Van Oost et Versteirt, 2021) ; les limites de ces techniques sont identiques à celles déjà discutées à propos des technologies vertes dans le domaine des énergies renouvelables (disponibilité de matières non recyclables, coût énergétique d'installation, d'entretien et de renouvellement d'un parc colossal de tels dispositifs, impacts environnementaux, occupation d'espace,...).

Terminons ce rapide inventaire de réponses high-tech aux pénuries — et de leurs impasses — en complétant les trois précédents (croissance verte, recyclage, énergies prospectives) par un trio très en vogue : les biotechnologies, les nanotechnologies, et l'économie dématérialisée.

Très schématiquement, les **biotechnologies**¹¹⁸ sont destinées à fournir des « produits » de

114/ <https://energieetenvironnement.com/2020/07/29/comprendre-la-geothermie-et-ses-limites/>

115/ « La puissance installée de tous les équipements de production d'énergie du monde est de l'ordre de 12 TW (térawatts) [...]. En comparaison, la chaleur qui s'échappe des profondeurs représenterait un potentiel d'environ 9 TW d'énergie, si on pouvait la capter. En pratique, les techniques d'extraction de chaleur ont leurs limites et même si l'on pouvait exploiter la totalité de la surface des continents, on ne réussirait pas à extraire plus de 2 TW » (<https://energieetenvironnement.com/2020/07/29/comprendre-la-geothermie-et-ses-limites/>). Il est à noter que cette valeur (très optimiste) de 2 TW correspond à la borne supérieure d'une très large fourchette d'estimations variant entre 35 et 2000 GW ([https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_géothermique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_g%C3%A9othermique)).

116/ <https://energieetenvironnement.com/2020/07/29/comprendre-la-geothermie-et-ses-limites/>

117/ La chaleur des sous-sols est souvent due à la désintégration de matières radioactives.

118/ Il est question ici des biotechnologies contemporaines, postérieures à la découverte de l'ADN et de l'ARN (les biotechnologies « traditionnelles », par exemple différents processus de fermentation, sont connues empiriquement depuis plusieurs millénaires). En Europe, les biotechnologies sont classées en « catégories colorées » : bio-

trois sortes : des plantes et animaux génétiquement modifiés destinés à faire face à la pénurie alimentaire ; des biomatériaux (obtenus à partir de bio-ressources, comme le bois ou les résidus végétaux) destinés à faire face à la pénurie de matières (par substitution aux matériaux non renouvelables, par exemple issus de la chimie du pétrole) ; des biocarburants¹¹⁹, destinés à faire face à la pénurie de combustibles fossiles. En fonction du type de biomasse utilisée comme intrant, ces technologies sont plus ou moins opérationnelles : si les procédés reposant sur la chimie à partir des huiles ou à partir du sucre et de l'amidon sont bien maîtrisés, ceux qui devraient exploiter des molécules composant la structure des plantes (cellulose, hémicellulose) ou du bois (lignine) autrement que par voie thermochimique (gazéification, au prix d'une importante perte énergétique) ne sont pas vraiment prêts ; mais il est vrai que cet obstacle ne demande qu'à être vaincu par le « toujours plus d'innovation » inhérent à la démarche high-tech. En revanche, il est un deuxième problème que la technologie ne résoudra pas : celui de la disponibilité des bio-ressources. Car si la biomasse totale à la surface du globe avoisinerait les mille milliards de tonnes de matière sèche¹²⁰ pour une production annuelle de 170 milliards (à comparer aux 6 milliards de tonnes nécessaires aux besoins humains), « *l'immense majorité de cette biomasse n'est pas exploitable : pour des questions d'accessibilité (des lichens de l'Arctique aux forêts tropicales, en passant par l'immensité des océans), parce qu'elle est nécessaire à alimenter les niveaux trophiques supérieurs (ainsi des 50 milliards de tonnes du phytoplancton, qui alimente le zooplancton, puis les anchois... avant les poissons de troisième ou quatrième niveau trophique qui constituent l'essentiel de nos pêcheries), et parce que l'essentiel doit retourner immédiatement dans le cycle naturel — via la décomposition microbienne — sous peine d'interrompre un fragile équilibre d'écosystèmes limités en nutriments* ». ¹²¹ En ordre de grandeur, la récupération du carbone contenu dans les résidus agricoles mondiaux (avec toutes les difficultés logistiques afférentes) ne permettrait de satisfaire qu'un dixième des besoins en matières premières des biotechnologies (si elles devaient remplacer les carburants liquides et les matériaux aujourd'hui issus de l'industrie du pétrole). La mise en coupe réglée de la totalité des forêts du monde ne suffirait pas non plus. Le recours massif aux micro-algues (issues, par exemple, d'immenses batteries de production dans les déserts) se heurterait quant à lui au problème récurrent de déploiement industriel : consommation de matériaux et de métaux pour l'installation, l'entretien, le renouvellement, etc (cf. les technologies vertes).

Les **nanotechnologies**¹²², qui sont censées économiser de la matière en favorisant la miniaturisation, apportent en réalité leur contribution au problème des ressources non renouvelables, car dans l'immense majorité des cas, leurs applications sont dispersives : même si la consommation de métaux est moindre, le recyclage reste toujours hors de portée. Par ailleurs — et peut-être surtout —, la très large diffusion des nanoparticules (qui font désormais partie de notre quotidien dans les produits cosmétiques, emballages alimentaires, peintures, textiles, etc...) soulève la question de leur impact sanitaire : en raison de leur taille, elles pénètrent par différentes voies (même cutanée) dans l'organisme, où elles sont suspectées de provoquer des

technologies « vertes » (d'intérêt agricole), « rouges » (d'intérêt médical), « blanches » (applications industrielles), « jaunes » (traitement des pollutions), etc.

119/ A côté des biocarburants « de première génération » (exploitant la filière des biodiesel et bioéthanol) se développent ceux dits de deuxième et troisième générations, reposant sur la transformation de plantes entières ou de leurs résidus et sur la culture de micro-algues, respectivement.

120/ Selon les auteurs de l'article *The biomass distribution on Earth* (2018) qui estiment cette biomasse à 550 GtC (milliards de tonnes de carbone) : <https://www.pnas.org/content/pnas/early/2018/05/15/1711842115.full.pdf>

121/ Bihouix, 2014, p.90.

122/ dont les principaux champs d'activités sont la nanobiologie, la nanoélectronique et les nanomatériaux.

troubles potentiellement graves (respiratoires, cardiovasculaires, neurologiques, cancéreux,...).

La **dématérialisation** de l'économie repose sur l'idée que les possibilités offertes par le développement des technologies de l'information et de la communication génèreraient de substantielles économies, notamment de papier (plus besoin d'imprimer) et de déplacements (télé-travail, vidéoconférences). Les faits indiquent le contraire : selon le rapport *Lean ICT – Pour une sobriété numérique* publié en 2018 par le groupe de réflexion (*think tank*) *The Shift Project*, le numérique représente aujourd'hui 4% des émissions mondiales de gaz à effet de serre et sa consommation énergétique s'accroît de 9% par an. Car le secteur de l'informatique et des télécommunications n'a rien de virtuel, tout comme le réseau Internet : « *serveurs, antennes-relais, accessoires, ou câbles transocéaniques de faisceaux de fibres optiques que nous continuons à installer régulièrement pour accompagner la montée du trafic, consomment énergie et matières premières.* »¹²³ Et l'effet rebond se charge d'amplifier abondamment un recours de plus en plus soutenu¹²⁴ à des outils initialement présentés comme une réponse high-tech aux pénuries annoncées...

Si par le passé, la technologie a toujours permis à l'humanité de maintenir la tendance générale à la croissance, un faisceau d'indices convergents nous amène à penser qu'il ne pourra en être de même dans la situation actuelle. Bien que le débat entre cornucopiens et doomsdayers ne soit toujours pas clos et qu'il ne nous appartienne pas de le trancher dans le cadre de ce travail, la faisabilité des diverses solutions high-tech à la vitesse et aux ordres de grandeur nécessaires nous semble improbable. D'ailleurs, même dans l'hypothèse cornucopienne la plus optimiste où dans un avenir proche, la fusion nucléaire (par exemple) prendrait la relève de toutes les énergies actuelles et rendrait possible la poursuite du modèle de la croissance, ce dernier est de toute façon condamné à terme. Car tôt ou tard, l'humanité se retrouverait à nouveau face au paradoxe de la croissance infinie dans un univers fini. Avec une croissance de 2% par an (soit une multiplication par deux tous les 37 ans), nos besoins en énergie dans 1500 ans nécessiteraient un réacteur nucléaire de la taille de l'étoile solaire...

Tout ceci justifie l'exploration de voies alternatives, correspondant à un changement de paradigme : le passage d'une approche high-tech à une approche low-tech.

3.3.- L'alternative des low-tech

« *Puisque le système high-tech va dans le mur [...], pourquoi ne pas tenter autre chose, prendre le contre-pied et se tourner vers les low-tech ?* » (Bihouix, 2014, p.113).

Afin de cerner la notion de low-tech, nous nous appuyons sur le document intitulé *Vers des technologies sobres et résilientes – Pourquoi et comment développer l'innovation « low-tech »*?¹²⁵ publié en 2019 par la fondation *La Fabrique Ecologique*¹²⁶. Il faut cependant préciser que cette formalisation récente est l'aboutissement de différents courants de pensée dont certains très anciens. La critique des techniques remonte en effet aux débuts de la Révolution

123/ Bihouix, 2014, p.97.

124/ Le rapport intitulé *Climat : l'insoutenable usage de la vidéo en ligne – un cas pratique pour la sobriété numérique* (publié en 2019 par *The Shift Project*) souligne la dérive des usages du numérique, permises par les développements technologiques de ce dernier.

125/ Note définitive n°31 (issue d'un groupe de travail présidé par Philippe Bihouix) téléchargeable sur le site : <https://www.lafabriqueecologique.fr/vers-des-technologies-sobres-et-resilientes-pourquoi-et-comment-developper-linnovation-low-tech/>

126/ <https://www.lafabriqueecologique.fr/le-projet/>.

industrielle¹²⁷, celle des « illusions de la technique »¹²⁸ — et, un peu plus tard, celle de la robotique¹²⁹ — aux années 1940-1950. Parmi les penseurs de la seconde moitié du XX^e siècle opposés aux technologies modernes, citons Jacques Ellul (auteur, notamment, de *La technique ou l'enjeu du siècle* en 1954 et *Le bluff technologique* en 1988), Lewis Mumford (*Le Mythe de la Machine* publié en 1970) et Ernst Friedrich Schumacher qui, dans son ouvrage *Small is beautiful* de 1973¹³⁰, utilise la notion de « technologie intermédiaire », très proche — déjà — de celle de low-tech¹³¹. Plus récemment, l'informaticien Evgeny Morozov s'attaque au « solutionnisme technologique » consistant à voir dans le développement des nouvelles techniques numériques une réponse à n'importe quel problème humain, et dénonce également les risques de dérives (comme le développement du conformisme social ou la surveillance de masse) de ces technologies¹³².

L'actuel « mouvement low-tech » s'inscrit donc dans la continuité d'un processus historique séculaire caractérisé par le développement progressif d'une pensée critique des high-tech et par la recherche d'alternatives sous forme de « technologies douces » ayant fait l'objet de nombreuses tentatives de définition et conduit à l'essor d'une terminologie d'une grande richesse, qui témoigne de la multiplicité des angles d'approche suivis par différents auteurs : qualifiées, nous l'avons vu, d'« intermédiaires » par Schumacher, ces technologies sont aussi décrites comme « libératrices » par Murray Bookchin¹³³, « démocratiques » par Lewis Mumford¹³⁴, « conviviales » par Ivan Illich¹³⁵, « ouvertes » par Gilbert Simondon¹³⁶, « différenciées » par Denis-Clair Lambert¹³⁷,...

Ce très bref rappel historique éclaire le caractère multidimensionnel de la low-tech selon son acception récente¹³⁸. Bien qu'étant l'abréviation de *low technology* (« basse technologie »), elle ne concerne pas le seul domaine technique, mais désigne un ensemble de logiques visant à la fois (1) la *sobriété énergétique et matérielle*, (2) la *durabilité forte* et (3) la *résilience collective*. Ces trois principes reviennent à définir les low-tech comme une « philosophie » qui poserait trois questions :

La sobriété énergétique et matérielle interroge l'utilité d'un objet : son coût environnemental

127/ Dans l'Angleterre des années 1810, le mouvement de contestation des Luddites est une manifestation de l'hostilité au machinisme et de ses ravages sur l'emploi des artisans, ce qui conduit l'économiste suisse Jean de Sismondi à proposer l'introduction d'une taxe sur les machines.

128/ Cf. par exemple l'ouvrage *Die Perfektion des Technik* (1946) de Friedrich Georg Jünger.

129/ Traduit sous le titre *L'obsolescence de l'homme*, l'ouvrage en deux parties *Die Antiquiertheit des Menschen* (1956 et 1980) de Günther Anders est considéré comme un texte fondateur de la philosophie des techniques (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Low-tech>).

130/ publié en français en 1979.

131/ Schumacher est d'ailleurs considéré comme le père — ou en tout cas le préfigurateur — du concept de low-tech (<https://nosfuturs.ch/ernst-friedrich-schumacher-1911-1977-le-monde-moderne-et-ses-ressources/>).

132/ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Low-tech>.

133/ Bookchin, M., *Post-Scarcity Anarchism*, Remparts Press, 1971.

134/ Mumford, L., *Le Mythe de la Machine - Technique et civilisation*, Paris, Seuil, 1976.

135/ Illich, I., *La Convivialité*, Paris, Seuil, 2003.

136/ Simondon, G., *Sur la Technique*, Paris, PUF, 2014 (1983).

137/ Lambert, D.-C., *Le mimétisme technologique des tiers mondes - Plaidoyer pour le recours à des techniques intermédiaires et différenciées*, Paris, Seuil, 2003.

138/ <https://www.lafabriqueecologique.fr/vers-des-technologies-sobres-et-resilientes-pourquoi-et-comment-developper-linnovation-low-tech/>

est-il justifié par le « bénéfice » qu'il apporte ? Le premier principe est ainsi une invitation à réfléchir si une réponse technique à un besoin — serait-elle low-tech — est nécessaire, ou si une réponse « no-tech »¹³⁹ ne serait pas préférable. A cet égard, une démarche low-tech présente des similitudes avec celle de la décroissance¹⁴⁰, l'une comme l'autre appelant à questionner aussi bien la notion de « richesse » que celle du statut du travail humain : dans une optique de réduction des dépenses matérielles et énergétiques, c'est en effet le modèle économique lui-même de la société de consommation qui est mis en cause, notamment en raison des inévitables pertes d'énergie et/ou de matières lors du recyclage. Ce dernier n'étant pas total (loin s'en faut), c'est le recentrage de nos consommations sur nos besoins réels qui est à privilégier, de même que le développement d'économies locales rentables par le recours à l'artisanat et aux commerces de proximité.

Le deuxième principe est la *durabilité forte* au sens que donne à cette expression l'économiste américain Herman Daly¹⁴¹, pour qui ne peuvent être considérés comme durables que les flux matériels de l'économie qui remplissent trois conditions : (1) le rythme de consommation des ressources renouvelables ne doit pas excéder leur rythme de régénération ; (2) le rythme de consommation des ressources non renouvelables ne doit pas excéder le rythme auquel des substituts renouvelables et durables peuvent être développés ; (3) le rythme d'émission de pollution ne doit pas excéder la capacité de l'environnement à absorber et assimiler cette dernière.¹⁴² Ces trois conditions garantissent le maintien du « capital naturel » (ressources naturelles) qui, selon Daly, n'est pas substituable au « capital artificiel » (richesse créée). C'est en cela que cette « durabilité forte » s'oppose au modèle de la « durabilité faible » (compatible avec une approche économique néoclassique qui prévaut dans nombre d'organisations internationales — Nations unies, Banque mondiale,... — ainsi que dans l'Union Européenne¹⁴³) selon lequel les différentes formes de capital (« économique », « humain » et « naturel ») sont interchangeable.¹⁴⁴

En questionnant la durabilité dans le temps, ce deuxième principe s'oppose à l'obsolescence programmée des objets high-tech. Car à la différence de ces derniers, les objets low-tech pos-

139/ Un mode de vie no-tech évite le recours à la technologie chaque fois que c'est possible. Notons qu'il existe aujourd'hui de nombreuses définitions dont **certaines** apparentées à celle de la low-tech, mais plus « restreintes » au sens où chacune focalise sur un aspect ou une caractéristique particulière. A côté de la no-tech, on peut par exemple citer la retro-tech (mise à jour de ressources technologiques existantes en vue d'une « innovation frugale »), la small-tech (maintien d'un haut niveau de complexité technologique mais sur des bases différentes de celles du « Big-Tech » des GAFAM), la slow-tech (restriction à des technologies permettant des modes de vie lents), l'easy-tech (technologie simple et accessible à tous, il s'agit d'une composante de la définition des low-tech), la Lo-Tek (technologies traditionnelles, savoirs et pratiques fondées la « nature », TEK étant l'acronyme de « Traditional Ecological Knowledge »), etc.
(<https://fr.wikipedia.org/wiki/Low-tech>)

140/ Le concept de décroissance s'appuie sur les idées défendues (notamment) par l'équipe Meadows (Meadows *et al.*, 1972) ou par Nicholas Georgescu-Roegen (Georgescu-Roegen, 1979) qui se sont développées durant les années 1970 et qui ont donné naissance à un courant de pensée prônant la réduction de la consommation. Selon cette approche, la croissance économique telle qu'elle est mesurée habituellement (PIB/hab, par exemple) n'améliorerait pas (voire détériorerait) les conditions de vie de l'humanité, ce qui justifie la recherche de paradigmes alternatifs (comme la bioéconomie ou le localisme) et de moyens d'action (comme la création, en France, du Parti pour la décroissance). Il est à noter que depuis le début du XXI^e siècle, l'expression « décroissance soutenable » s'affiche en tant qu'alternative à un « développement durable » considéré comme un oxymore (voire comme une imposture) par certains partisans de la décroissance.

141/ Qui a suivi les cours de Nicholas Georgescu-Roegen à l'université Vanderbilt.

142/ Daly, H., *Steady-State Economics*, Washington, Island Press, 1991.

143/ <https://opee.unistra.fr/spip.php?article330>

144/ https://fr.wikipedia.org/wiki/Durabilité#La_durabilité_forte

sèdent trois caractéristiques essentielles : ils sont *réparables* (fonctionnement simple et compréhensible du plus grand nombre, facilité d'entretien et de réparation par l'utilisateur ou par un artisan de proximité), *recyclables* (possibilité de récupérer le maximum de ressources lors du recyclage, ce qui implique un recours aussi limité que possible aux matériaux composites au profit des « mono-matériaux » ainsi que la prise en compte de leur cycle de vie) et *viables* (conçus de manière à utiliser le moins de ressources possible et privilégiant les matériaux abondants, de préférence biosourcés ou géosourcés).

Enfin, le principe de la *résilience collective* soulève la question de l'accessibilité aux technologies : dans un contexte de « surenchère dans la complexité » des appareils high-tech, la simplification des chaînes logistiques et le recours à des ressources (tant matérielles qu'humaines), à des compétences, à des connaissances « les plus locales possibles » garantissent l'accessibilité des basses technologies au plus grand nombre avec, comme corollaires, l'apparition de métiers en rapport avec les low-tech, une incitation pour le consommateur à repenser son implication et sa responsabilité dans la chaîne de production et le cycle de vie des produits, et le développement du commerce et de l'artisanat de proximité créant du lien social et de la résilience. Accessoirement, en éliminant le besoin de métaux rares (indispensables dans les hautes technologies) souvent extraits par des mineurs très jeunes employés par des mafias, les low-tech apportent une contribution à l'éradication de ces pratiques.

On le voit, si les principes¹⁴⁵ de la low-tech se réfèrent à la dimension technique, celle-ci n'est qu'un aspect d'une approche beaucoup plus globale qui se définit en opposition à « l'obsession de la high-tech » en invitant à faire preuve de discernement. Contrairement à certaines critiques dont elle fait l'objet, cette approche n'est pas « technophobe », mais « technocritique », au sens où elle pose la question du « juste dosage technologique ». C'est pour cette raison d'ailleurs qu'il s'agit avant tout d'une *démarche* au sens large, le but n'étant pas d'évaluer si un produit ou un service est — ou n'est pas — low-tech¹⁴⁶, mais d'essayer de déterminer un niveau technologique « optimal » qui — tout en étant le plus bas possible — permet d'assurer les fonctionnalités essentielles.

Il est enfin possible de compléter cette tentative de définition par un raisonnement « en creux », c'est-à-dire par quelques précisions relatives à ce que les low-tech « ne sont pas ».

Pour commencer, il faut insister sur le fait qu'elles vont bien au-delà de solutions techniques « bricolées » ou « ressorties du passé », puisqu'elles sont porteuses, nous l'avons vu, de dimensions organisationnelles, systémiques, culturelles, politiques, philosophiques, ... En ce sens, l'acception actuelle se distingue radicalement de celle relevant de l'approche anglosaxonne

145/ Cette déclinaison n'est qu'une manière parmi d'autres de présenter la démarche low-tech. Plutôt que « trois principes », Philippe Bihouix retient « sept commandements » (remettre en cause les besoins ; concevoir et produire réellement durable ; orienter le savoir vers l'économie de ressources ; rechercher l'équilibre entre performance et convivialité ; relocaliser sans perdre les bons effets d'échelle ; démachiniser les services ; savoir rester modeste). Des idées similaires sont présentées, dans une expertise de l'ADEME (<https://www.ademe.fr/expertises/economie-circulaire>), en tant « composantes de l'Economie circulaire », reposant sur « 3 domaines – 7 piliers ». Principes, commandements, piliers, domaines, ... la manière de formaliser n'est pas essentielle, car la transition vers les basses technologies est de toute façon un processus à tel point « systémique » (avec des boucles de rétroactions positives ou négatives) qu'il est « inutile de dérouler un plan construit d'avance [...]. Comme dans le brouillard par mer agitée, avec une boussole imprécise, on peut se donner une idée de la direction des côtes dangereuses à éviter, et essayer de garder un cap avec quelques objectifs clairs. » (Bihouix, 2014, p.167).

146/ L'évaluation du caractère low-tech d'un produit ou d'un service nécessite en effet de tenir compte de l'ensemble de son cycle de vie : en soi, un vélo apparaît comme un produit low-tech ; mais sa fabrication nécessite de la haute technologie.

d'origine : le *Cambridge International Dictionary of English*¹⁴⁷ définit ainsi la low-tech comme une « technique non récente » ou « utilisant des matériaux anciens », et souligne l'absence de sophistication comme une de ses caractéristiques ; par exemple, plus une entreprise a un fonctionnement simple — ou moins un objet est sophistiqué —, plus cette entreprise — ou cet objet — sont low-tech. Selon une telle acception, la « low-tech », outre le fait de se référer exclusivement au seul domaine technique, exclut l'idée d'avancée technologique, et serait plutôt synonyme d'un « retour en arrière » : par exemple, si le télégraphe relève de la high-tech à une certaine époque, il devient low-tech avec l'avènement du téléphone.

L'innovation low-tech ne doit pas non plus être confondue avec l'innovation frugale : s'inscrivant dans une logique de profit, celle-ci vise en effet à répondre à un besoin « le plus simplement possible en utilisant un minimum de moyens » en vue d'ouvrir un nouveau segment de marché ; de ce fait, elle est susceptible de favoriser l'effet rebond (à la différence de l'innovation low-tech) au détriment de la notion de durabilité.

Une autre confusion à éviter est celle qui assimilerait « low-tech » à « low cost » : il est en effet parfaitement concevable que l'innovation low-tech nécessite des investissements lourds (au sens large) en recherche et développement.

Le point sans doute le plus important à souligner — car *a priori* contre-intuitif — dans cette manière récente d'appréhender l'approche low-tech est que cette dernière est **porteuse d'innovation**¹⁴⁸. Mais par construction, il s'agit d'autres formes d'innovations que celles que nécessitent les hautes technologies : en effet, une solution technique guidée par une logique low-tech est, nous l'avons vu, simple, bien pensée, bien dimensionnée et réparable ; elle favorise la fabrication locale, plus proche de l'artisanat que de la fabrication industrielle ; elle fait appel à des matériaux de réemploi (réutilisation, recyclage) et/ou biosourcés et géosourcés, ainsi qu'à des procédés énergétiquement peu coûteux. Or, assurer de manière satisfaisante les fonctionnalités demandées en respectant toutes ces exigences nécessite de vastes connaissances, du savoir faire, du sens pratique et, en premier lieu, de **l'ingéniosité dans la conception**.

3.4.- L'approche basse énergie et low-tech en urbanisme : la ville BELT

Dans les sections précédentes, deux catégories de réponses aux risques de pénuries annoncées ont été suggérées, correspondant à deux types d'approche — high-tech et low-tech. De même qu'au chapitre 2 nous avons pris position dans le débat entre partisans et opposants de la thèse de l'origine anthropique du dérèglement climatique, de même nous estimons l'approche low-tech plus pertinente. Dans les deux cas, un élément important de ce choix est le « principe de précaution raisonné » lié à l'importance des enjeux : aussi bien le pari d'ignorer les conclusions du GIEC que celui d'un excès de confiance en d'hypothétiques avancées technologiques révolutionnaires permettant de faire face simultanément aux pénuries d'énergie et de matière nous semblent trop risqués.

Pour cette raison, c'est l'approche low-tech telle que définie à la section précédente qui sert de cadre conceptuel à la réflexion sur la ville du futur qui est au cœur de ce travail.

Dans son *Age des low-tech*, Philippe Bihouix consacre un chapitre à l'exploration des possi-

147/ <https://dictionary.cambridge.org/fr/dictionnaire/anglais/low-tech>

148/ Depuis quelques années, le projet coopératif Low-tech Lab (<https://lowtechlab.org/fr>) s'attache à recenser et à diffuser les low-tech partout dans le monde, met à disposition une vaste base de données et propose un accompagnement aux entreprises et associations désireuses de développer de nouvelles low-tech.

bilités d'application des principes low-tech dans la vie quotidienne et dans différents secteurs d'activités, parmi lesquels les transports et l'urbanisme tiennent une place importante.

Les idées développées sont pour beaucoup de nature « comportementale » et plus ou moins radicales. Par exemple, si la mise en cause de la mobilité telle que nous la connaissons aujourd'hui semble inéluctable¹⁴⁹, des changements consistant à renoncer au « superflu » (partir moins en vacances et choisir des destinations plus proches) ou à pratiquer le covoiturage risquent d'être insuffisants. En revanche, le recours massif à la bicyclette¹⁵⁰ apparaît comme une solution, au moins transitoire, le temps que la civilisation (et l'urbanisme) de l'automobile s'adapte à la situation de pénurie énergétique. Le fait qu'une part importante des déplacements quotidiens actuellement réalisés en voiture soient inférieurs à 3 km (plus de 50% en Ile-de-France) et les importants progrès techniques de ces dernières années relatifs à ce mode (vélos couchés, vélos à assistance électrique, vélos pliables utilisés en association avec les transports collectifs, vélos adaptés au transport de fret,...) militent également en faveur de cette orientation ; les réflexions autour de la notion de « vitesse généralisée »¹⁵¹ développées par Ivan Illich vont aussi dans ce sens. Bien évidemment, le bouleversement que représenterait le passage de la mobilité individuelle motorisée à la mobilité cycliste s'accompagnerait nécessairement d'une réorganisation profonde de tout le système productif, compte tenu de la part du PIB consacrée actuellement (de manière directe ou indirecte) à la voiture et à son système technique : fabricants (constructeurs automobiles, producteurs de matières premières, robots et machines des usines, équipementiers,...), réseaux techniques et commerciaux associés (concessionnaires, garages, décharges, casses,...), l'ensemble du système pétrolier depuis l'extraction jusqu'à la station-service (plateformes, pétroliers, ports, raffineries, pipelines,...), les routes, parkings et équipements afférents (matériaux de construction, péages, panneaux, travaux publics, machines, sociétés d'entretien,...), etc. ; à cela s'ajoute tout un ensemble d'activités induites de contrôle et de régulation (radars, police,...), de « gestion des conséquences » (hôpitaux, juges, assurances,...), d'administration, de traitement des pollutions, de sécurisation des approvisionnements (pétrole, métaux). Philippe Bihouix estime que compte tenu du nombre d'emplois dépendants du système automobile — et dans l'hypothèse (certes très optimiste) de notre capacité collective à répartir équitablement le temps de travail —, il ne resterait en France que « *deux à trois jours de temps de travail par semaine, juste en économisant le travail généré par notre actuelle liberté motorisée.* » (Bihouix, 2014, p. 197). La contrepartie serait, notamment, l'acceptation générale de la baisse des besoins de consommation (corrélativement à la baisse du pouvoir d'achat) et de l'allongement du temps consacré aux déplacements, du moins avant que les « relocalisations » visant à minimiser les distances des déplacements puissent s'opérer. Si les infrastructures routières restent présentes (pour les besoins des vélos et des bus — nous y reviendrons —, ainsi que des véhicules de service, de transport de nourriture et de fret issu des productions ne pouvant être relocalisées), leur emprise est fortement limitée et va en s'amenuisant au fur et à mesure du dépérissement de celles devenues progressivement inutiles, libérant peu à peu l'espace public urbain et périurbain pour d'autres affectations et usages. Dans ce scénario, la place des transports collectifs est mitigée, pour deux raisons. D'une part, ils ne

149/ Dans un contexte énergétiquement contraint, il n'est guère envisageable de persister à déplacer un véhicule d'une tonne pour 80 kg de charge utile la plupart du temps, mais également à faire disparaître des millions d'hectares de terres agricoles au profit des routes et des parkings.

150/ Véhicule à la fois conforme aux principes low-tech (durable, réparable,...) et présentant le meilleur rendement énergétique (il n'ajoute que quelques kilogrammes à la charge utile).

151/ Prenant en compte le temps de travail nécessaire pour se payer son moyen de locomotion (achat, carburant, entretien, assurance,...), la vitesse généralisée du vélo est supérieure à celle de la voiture (Illich, 1975).

sont énergétiquement efficaces qu'avec un taux de remplissage suffisant, souvent impossible à atteindre dans un contexte de ville « étalée par l'automobile ». D'autre part, leurs caractéristiques — très variables — sont à prendre en considération. Les bus, en raison de leur souplesse d'adaptation et des faibles dépenses en infrastructures, compteraient parmi les plus écologiques et soutenables ; dans une certaine mesure, il en est de même pour les tramways, car une fois réalisé l'investissement d'infrastructure, celle-ci est peu sollicitée (en raison des faibles vitesses d'exploitation), et le matériel roulant ne nécessite pas, pour rester fonctionnel, un « contenu technologique » élevé. Tel n'est pas le cas pour les métros, les trains régionaux et (*a fortiori*) les trains à grande vitesse¹⁵², plus fragiles et requérant bien plus de hautes technologies (systèmes informatisés et perfectionnés pour la gestion de sécurité, réseau de moyens techniques d'intervention rapide, de gestion des pièces détachées, etc) et d'importants investissements « énergétiques » pour la construction et l'entretien des infrastructures.

La question du bâtiment et de l'urbanisme est également abordée, notamment autour de quatre impératifs : la réduction de l'énergie consommée par le parc existant ; l'arrêt urgent de l'artificialisation (qui met à mal la capacité à se nourrir des générations futures) et du morcellement des territoires (qui fragilise les écosystèmes) ; l'inversion de la tendance à l'urbanisation et à la concentration (sans que cette « désurbanisation » s'accompagne d'un étalement urbain¹⁵³) ; réduction draconienne du volume de constructions, en particulier de constructions nouvelles (pour privilégier les réhabilitations et réutilisations). Avec toujours en arrière plan l'idée de la réduction des besoins (moindres exigences au niveau des standards, accepter de « se serrer un peu plus »,...) et de la mutualisation (habitat partagé, multifonctionnalité affectation les bâtiments sous-utilisés à plusieurs usages¹⁵⁴,...).

L'un des intérêts de cette réflexion sur l'urbanisme et les transports est de montrer qu'en cas de pénurie énergétique grave (considérée comme inévitable par beaucoup, comme imminente par certains), les villes pourraient continuer à vivre moyennant (d'importantes) adaptations low-tech (étant admis que les high-tech ne permettront pas de faire face), la différence entre « effondrement » et « transition douce » tenant au calendrier de leur mise en place. Celles suggérées par Philippe Bihouix tiennent essentiellement aux choix de modes de vie (sobres¹⁵⁵) et de technologies (basses) ; en revanche, il est un domaine qui n'est que très peu évoqué, **l'agencement spatial et fonctionnel**. Bien qu'il ne soit pas absent du propos (par exemple lors de l'évocation de l'étalement urbain ou de l'artificialisation), il semble occuper une place secondaire et être considéré plutôt comme une conséquence d'autres choix (relocalisations) plus ou moins subis (par exemple lorsqu'il est question de laisser dépérir une partie du réseau routier¹⁵⁶). Or de notre point de vue, il peut devenir, en tant « qu'incitateur », un **levier d'action à part entière au service de la sobriété énergétique de la ville**. Sans anticiper sur la définition de cette notion d'agencement au chapitre suivant — où ses contours seront précisés notamment

152/ Pour rappel, l'énergie totale consommée dépend, en première approximation, de trois paramètres : la distance parcourue, la masse transportée et la vitesse.

153/ L'idée défendue est plutôt celle de la « redynamisation des villages et des bourgs, à une échelle qui permette un ancrage dans le territoire, des besoins de transport réduits, mais une vie sociale suffisamment riche. » (Bihouix, 2014, p.203).

154/ Par exemple, des entreprises pourraient utiliser durant la semaine des salles de réunions qui, pendant les week-ends ou en soirée, le seraient par des associations.

155/ La sobriété est une privation consentie, la pauvreté est une privation subie. D'une certaine manière, la différence entre « l'après-effondrement » et « l'après-transition » est que la population serait essentiellement composée de personnes vivant « pauvrement » dans le premier cas, « sobrement » dans le second.

156/ qui n'est pas sans rappeler — au signe près — un certain « laisser faire » des « villes automobiles ».

par rapport à l'expression « forme urbaine » —, nous défendons l'idée que « l'organisation spatiale de la ville » (par exemple, la façon de répartir et d'articuler entre elles zones bâties et non bâties à différentes échelles) est un potentiel considérable pour faciliter (ou à l'inverse compliquer) drastiquement certains modes de vie (par exemple sobres) par rapport à d'autres. Ou, dit lapidairement, la manière de « dessiner une ville » peut rendre celle-ci énergétiquement frugale (tout au moins au sens de son potentiel).

Il n'est évidemment pas question ici de prétendre que, de manière déterministe, une ville serait — ou pas — « basse énergie » du seul fait d'être agencée d'une certaine façon. En revanche, l'hypothèse que nous nous proposons d'explorer est que certaines configurations se prêtent davantage que d'autres à des pratiques et modes de vie conformes aux principes low-tech, et qu'il existerait donc un agencement potentiellement optimal à l'aune du critère énergétique, agencement que nous désignons par l'acronyme **BELT** juxtaposant **basse énergie** (BE) et **low-tech** (LT). Le choix de cette association qui relève du pléonasme¹⁵⁷ a été retenu pour deux raisons : d'une part, afin de mettre en avant l'entrée énergétique qui est à l'origine de ce travail ; d'autre part, afin de lever toute ambiguïté, dans la mesure où du seul point de vue technique¹⁵⁸, l'absence de high-tech n'est pas forcément synonyme de basse énergie (par exemple, une réponse au besoin de se chauffer est le feu à ciel ouvert, ne nécessitant aucune technologie mais énergétiquement très peu efficace). De manière symétrique, il est indispensable de compléter la mention basse énergie par l'expression low-tech en raison de l'imbrication des différentes limites capacitaires de la planète : énergies, matières, espaces, rejets (l'impossibilité de dissocier ces diverses pénuries a été abondamment discutée aux chapitres précédents). Par ailleurs, la nature même de la piste explorée dans ce travail — favoriser le potentiel de frugalité d'une ville par la manière dont elle est agencée — relève pleinement d'une démarche low-tech, puisque « l'innovation » relève de la conception et non du recours à une technologie sophistiquée (un crayon et du papier suffisent pour « bien dessiner » une ville).

La recherche d'un « optimum BELT » d'une ville par son agencement ne relève-t-elle pas de la quête illusoire — voire naïve et à l'ambition démesurée — d'une utopie irréalisable, surtout en situation d'urgence ? Dans cet ordre d'idée, à l'occasion d'un entretien télévisé¹⁵⁹, Jean-Marc Jancovici affiche son désaccord avec ce qu'il appelle une « tradition française » consistant à concevoir un système idéal sans se poser la question « comment on y va », et affirme son attachement à la démarche inverse dans la recherche de réponses aux problèmes énergétiques et climatiques : compte tenu des choix *existants*, faire le moins mauvais. Il nous semble pourtant que les deux approches sont plus complémentaires qu'incompatibles, la première s'attachant à essayer d'enrichir l'univers des choix de la seconde, c'est-à-dire augmenter la variété des réponses possibles à la question « où va-t-on » — et surtout « où veut-on aller » —, qu'il vaut sans doute mieux se poser en amont du fameux « comment on y va ».

C'est dans cette complémentarité que réside l'intérêt d'une formalisation d'agencements dans des futurs possibles où le critère énergétique occuperait une place centrale : compte tenu du contexte où — à l'image de scénarios comme celui de Philippe Bihouix — la nécessité d'une restructuration radicale plus ou moins rapide (effondrement *versus* transition) du système économique et productif semble être une éventualité probable, et dans la mesure où cette restructuration s'accompagnerait *de facto* de profondes modifications de nature spatiale (répartitions, affectations, ...), une réflexion préalable sur des configurations d'ensemble optimisant « globa-

157/ La frugalité énergétique étant l'un des principes de la low-tech, la mention BE est inutile.

158/ Cf. l'acception anglo-saxonne de la notion de low-tech.

159/ 4 mars 2021, sur Marianne TV (<https://www.youtube.com/watch?v=ihuK3gvWoQE&t=873s>).

lement » — selon un schéma cohérent à toutes les échelles — le potentiel de sobriété énergétique est une manière de contribuer « par anticipation » à l'orientation et à l'accompagnement des choix d'aménagement tout au long de la transition. Cependant, l'objectif de cette réflexion n'est pas de proposer une configuration BELT optimale (bien que, d'une certaine manière, il puisse faire office de fil conducteur, cet objectif est inatteignable ne serait-ce qu'en raison des spécificités propres à chaque cas, par définition unique), mais de formuler quelques principes d'agencement susceptibles d'être mobilisés pour tendre vers cet optimum et à les illustrer par des configurations allant dans ce sens.

Quant à la question de l'urgence, c'est précisément en raison de la situation d'imminence des pénuries que la lenteur et l'inertie qui caractérisent habituellement la transformation des structures urbaines pourrait ne pas être un obstacle rédhibitoire, l'histoire réservant parfois des surprises : il n'a fallu que quelques décennies à l'automobile pour modifier radicalement l'organisation des villes ; en faut-il nécessairement plus pour parvenir à des configurations plus propices à des modes de vie énergétiquement sobres et résilients ?

Pour finir, il convient de souligner le caractère exploratoire du travail entrepris qui, au travers du sujet traité, est un prétexte pour s'interroger sur la notion de besoin — un questionnement incontournable dans un contexte où le risque de pénuries est de plus en plus prégnant — , mais également pour tenter le pari de sortir du cadre disciplinaire de l'urbanisme afin d'enrichir la réflexion par des notions issues notamment de la biologie, l'écologie et l'agronomie, un détour justifié par la logique low-tech qui sous-tend le propos.

4.- L'agencement au service d'une ville BELT

Introduction

S'il est vrai que, comme l'affirme Jay W. Forrester, le comportement d'un système complexe dépend de sa structure, l'organisation d'une ville influe sur son fonctionnement, et par conséquent sur ses besoins en ressources, notamment énergétiques. La manière d'agencer nos territoires, à tous leurs niveaux d'intégration, apparaît alors comme une voie pour « *ralentir durablement leurs métabolismes, pour réduire les démesures de leurs besoins et de leurs déchets. Réduire leurs faux besoins en mobilité ou vitesse ou puissance, besoins en matières nobles, énergies libres, sols vivants, informations utiles, temps consacré, soins médicaux, etc. Pour garantir à tous leurs habitants la liberté de bien se situer. Pour débarrasser leur PIB de tout ce qui n'est que compensations ou corrections dispendieuses de leurs dysfonctionnements liés à leurs défauts de structure* » (Maupu, Stransky, 2018)

L'objet de ce chapitre est de formaliser des principes d'agencement spatiaux favorables à des modes de vie et des usages BELT. A cet égard, précisons d'emblée que par un abus de langage justifié par un souci de concision, chaque fois que nous utiliserons l'expression BELT (définie au chapitre précédent) pour qualifier un terme tel que « ville » (comme c'est le cas dans le titre du chapitre), « aménagement », « organisation », « agencement », voire « forme urbaine », ce n'est pas le terme « en lui-même » qui est censé être à la fois sobre en énergie et low-tech : ce sont les pratiques, les usages, les modes de vie qui sont concernés. Par exemple, un agencement est dit BELT lorsqu'il facilite des modes de vie BELT au détriment de ceux qui ne le sont pas.

En admettant qu'une ville doive offrir à ses habitants un cadre permettant de subvenir à leurs besoins (une affirmation qui semble largement consensuelle) et si, par définition, une ville BELT doit minimiser les besoins énergétiques de ses habitants, une réflexion sur la notion de « besoin » constitue un préalable indispensable à notre propos ; c'est l'objet de la première section du chapitre.

Centrale tout au long de ce chapitre, la notion d'« agencement » (qui, lorsqu'elle est utilisée en lien avec la ville, peut renvoyer à celle de « forme urbaine ») doit être précisée et questionnée à l'aune de son potentiel à faire passer « en mode BELT » la satisfaction de certains besoins des habitants d'une ville ; cette réflexion est menée dans le cadre de la deuxième section.

Ces deux précisions indispensables étant apportées, nous entrons dans le vif du sujet en abordant deux questions étroitement liées, mais traitées successivement dans les sections 3 et 4 : l'une relative à la nature de ce qui est agencé (« agencer quoi ? ») ; l'autre à la manière d'agencer (« agencer comment ? »).

Pour finir, nous proposons un bilan synthétique destiné à cerner les principales caractéristiques de la ville BELT (section 5).

4.1.- Une question de besoins

4.1.1.- Des classifications multiples

Notre propos étant d'explorer les possibilités de faire face aux pénuries de ressources par la sobriété, il est nécessaire de s'interroger sur la compatibilité entre, d'un côté, une diminution des consommations de ressources par l'humanité et, de l'autre, la satisfaction des besoins de cette dernière. Mais comme le laisse entrevoir la définition plurielle qu'en propose le diction-

naire Larousse¹⁶⁰, le besoin est loin d'être une notion triviale. Situé à la jonction entre le biologique et le culturel, entre le corps et l'esprit, et en mettant en jeu l'interaction entre l'individu et son environnement, le besoin est de ce fait un concept multidimensionnel ayant fait l'objet de travaux d'anthropologues, d'historiens, de psychologues, d'économistes, de philosophes, de théologiens, ..., souvent en lien avec d'autres notions, telles que utilité (« besoins solvables » et « besoins réels »), désir (« vrais » et « faux » besoins), mais également bonheur, liberté, etc... qui enrichissent la réflexion autour de ce concept en en ciselant les contours. A cet égard, il peut être utile de confronter la notion de besoin à d'autres termes avec lesquels elle est souvent confondue, par exemple aspiration, intérêt, désir ou envie¹⁶¹. Concernant ce dernier terme, si la seule limite de l'envie est l'imagination, tout besoin est, quant à lui, cernable en raison de son appartenance au concret qui — à la différence de l'imagination — n'est pas infini. Il en découle que si nous admettons, d'une part, que l'activité économique vise la réalisation de tous les besoins humains et, d'autre part, qu'à travers le phénomène de rareté, elle crée en même temps de **l'envie de consommation** (par nature illimitée), chaque envie est alors à l'origine d'un nouveau besoin (que l'activité économique, donc, a pour mission de satisfaire) et un cercle vicieux s'engage : à mesure qu'un besoin est satisfait, un autre apparaît. La satisfaction de tous les besoins issus du monde imaginaire des envies se heurtera donc inmanquablement, tôt ou tard, à la finitude — donc aux limites — du monde réel.

Dans un contexte où les ressources s'épuisent de plus en plus vite et sont sur le point d'atteindre (voire ont déjà dépassé) le pic, une réflexion sur la **hiérarchie des besoins** est nécessaire pour orienter la gestion des pénuries et ce, indépendamment de toute considération d'ordre moral¹⁶². L'établissement d'une telle hiérarchie ne va cependant pas de soi, comme en témoigne l'absence de consensus des travaux menés dans ce domaine. S'il est vrai que — par delà la proposition de listes de besoins censés être reliés à l'appartenance au genre humain¹⁶³ — certains de ces travaux s'attachent à établir des classements « par ordre d'importance »¹⁶⁴, ces listes et

160/ Besoin : Exigence née d'un sentiment de manque, de privation de quelque chose qui est nécessaire à la vie organique : Besoin de manger, de dormir. / Sentiment de privation qui porte à désirer ce dont on croit manquer ; nécessité impérieuse : Besoin de savoir. / Chose considérée comme nécessaire à l'existence : Le cinéma est devenu chez lui un besoin. / État qui résulte de la privation du nécessaire ; indigence, dénuement : C'est dans le besoin qu'on connaît le véritable ami. / [...] (citation incomplète)

Dictionnaire Larousse en ligne : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/besoin/8907>

161/ Comme le fait remarquer Franco Cortesi, de telles confrontations, ainsi que la diversité des acceptions du concept de besoin, soulèvent de nombreuses questions : « *Que peut-on dire de la genèse de ce concept ? Le besoin naît-il du désir, de l'aspiration ou de l'intérêt ? Le désir, l'aspiration ou l'intérêt engendrent-ils le besoin ? Quelle relation y a-t-il entre les besoins et les objets sensés les satisfaire ? Les mêmes objets peuvent-ils satisfaire des besoins différents ? Quel est le statut scientifique du concept de besoin ? Relève-t-il du physiologique ou dépend-il du social ? Est-ce que le besoin est le moteur de l'action et du changement social ?* » (Cortesi, 1978) p.156.

162/ Même un hypothétique scénario extrême, qui reposerait sur l'élimination de la majorité de l'humanité au bénéfice de quelques uns, ne ferait que retarder le moment où la satisfaction illimitée des besoins (au fur et à mesure qu'ils apparaissent corrélativement à la naissance de nouvelles envies) des survivants finirait dans l'impasse de l'épuisement des ressources.

163/ Par exemple : besoin de justice, de morale, d'appartenance à un collectif social plus vaste (comme la société, qui signifie « être associé à » ou la religion, qui étymologiquement veut dire « être relié à »), besoin de culture, etc.

164/ L'extrait suivant est une illustration d'une telle tentative, où une distinction est proposée entre trois catégories de besoins — « fondamentaux », « primaires » et « secondaires » :

« 1.- **besoins fondamentaux**, également appelés besoins élémentaires, nécessaires ou encore physiologiques, sont les besoins indispensables au système « humain » en tant qu'élément de base vivant dans un environnement défini : l'individu doit pouvoir se protéger des éléments qui mettent en péril son intégrité personnelle et son fonctionnement de base : se loger, s'habiller, assurer sa sécurité physique, se nourrir (air, eau, aliments), se reproduire, assumer ses processus de régulation interne (phéromones, hormones, influx nerveux...), se mouvoir, maintenir

ces classifications ne se recoupent que partiellement. Comme le fait remarquer Franco Cortesi : « Celui qui aborde l'analyse du concept de besoin se trouve confronté à d'innombrables définitions et classifications difficilement comparables entre elles et qui répondent à des critères différents »¹⁶⁵.

A titre illustratif, citons quelques exemples parmi les plus connus, dans différentes disciplines : la « Classification des désirs » d'Epicure (philosophie antique) ; la « Pyramide des besoins » d'Abraham Harold Maslow et les « Trois facteurs » de Clayton Alderfer (tous deux psychologues) ; les « Quatorze besoins fondamentaux » de Virginia Avenel Henderson (infirmière) ; les « Besoins humains fondamentaux » de Manfred Artur Max-Neef (économiste et environnementaliste) ; les « Besoins humains » de Len Doyal (sciences politiques et économiques) et Ian Gough (éthique médicale).

Sur la base d'une typologie des désirs qu'il développe dans sa *Lettre à Ménécée* (Morel, 2009)¹⁶⁶, Epicure opère une distinction entre « vrais » et « faux » besoins, les seconds — à la différence des premiers — ne pouvant être comblés. Par exemple, avoir un abri ou des amis relèvent, selon lui, de la première catégorie (donc de « ce qui est réellement nécessaire pour satisfaire notre nature ») ; mais posséder une grande richesse et être célèbre relève de la seconde (qui renvoie à l'opinion fondée sur l'imagination ; c'est ce qui explique l'impossibilité de satisfaire un « faux besoin », puisque l'imagination est sans limites). Il appartient à l'éthique de distinguer les vrais des faux besoins afin de permettre à l'individu de se « libérer » des seconds pour « être satisfait et heureux ». Dans sa réflexion sur les « vrais » besoins (les seuls qu'il est légitime de vouloir satisfaire), Epicure mobilise donc les notions de liberté et de bonheur.

Au début des années 1940, Abraham Harold Maslow, psychologue américain, établit un classement hiérarchique des besoins structuré à la manière d'une pyramide à 5 étages (Maslow, 1943). L'idée sous-jacente de cette analogie — renvoyant à la manière dont est construit un édifice — est qu'il est indispensable de terminer les « fondations » avant de bâtir, dans l'ordre et de bas en haut, les niveaux (« étages ») supérieurs. Dans ce modèle, les besoins physiologiques

les caractéristiques de son environnement direct dans le cadre d'un horizon prévisionnel suffisant, disposer d'une capacité de sauvegarde ou d'amélioration de son état de santé, d'avoir des contacts sociaux réels plutôt que fictifs (dans l'isolement total des phénomènes de dédoublement de personnalité peuvent survenir).

2.- Les **besoins primaires** sont des besoins légitimes mais qui se distinguent des précédents dans la mesure où leur satisfaction ne présente pas le même caractère d'urgence « vitale ». Leur satisfaction — bien que moins urgente — présente un caractère nécessaire ou à tout le moins hautement souhaitable pour les personnes concernées. Ainsi, le besoin d'éducation ou de formation pourrait représenter cette catégorie : l'absence d'éducation n'empêche pas de survivre, mais demeure l'un des besoins dont la nécessité n'est pas contestable dès que l'assurance de la survie d'une personne est acquise. La définition et l'expression des besoins primaires dépendent directement de la personne elle-même, ainsi que de la situation concrète, du temps et de l'environnement où elle se trouve.

3.- Les **besoins secondaires** recouvrent les besoins légitimes qui permettent aux personnes de se réaliser humainement, voire idéalement de se surpasser. Comme le dit Carl Jung, il s'agit que chaque personne « puisse faire de sa vie un destin ». Ce type de besoin n'est pas une urgence vitale (besoin fondamental), ni une priorité nécessaire (besoin primaire), mais relève de la volonté de la personne de trouver un sens et de réaliser et/ou d'achever sa vie en conformité avec sa volonté, avec son projet ou sa vocation ».

(Wikipédia [base de données en ligne], *Besoin*, [consulté le 25 mars 2021], disponible à l'adresse : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Besoin>).

165/ Cortesi, 1978, p.155.

166/ Epicure distingue les « désirs vides » (basés sur des opinions fausses, ils ne doivent pas être satisfaits), les « désirs naturels » (ni nécessaires ni vides mais simplement conformes à notre nature) et les « désirs naturels nécessaires » (faim, soif, mais aussi philosophie, amitié... qui doivent être satisfaits car nécessaires pour atteindre la plénitude).

(qui font office de « fondations », donc de niveau 1) doivent être satisfaits en premier, avant de pouvoir satisfaire, de manière progressive et de proche en proche, les besoins des autres étages, c'est-à-dire : besoin de sécurité (niveau 2), besoin d'appartenance (niveau 3), besoin d'estime (niveau 4), besoin de s'accomplir (niveau 5).

Ce modèle hiérarchique, auquel les successeurs de Maslow donnent une traduction graphique sous forme de triangle (la fameuse « pyramide » de la **figure 7**), est par la suite repris et régulièrement remis en question (il est aujourd'hui considéré comme « dépassé » de manière assez consensuelle). Néanmoins, de nombreux auteurs s'y réfèrent dans les décennies qui suivent sa publication (certains continuent d'ailleurs à s'y référer) et en proposent des variantes plus en accord avec leur propre discipline, variantes pouvant consister à focaliser sur une partie de la pyramide pour l'affiner¹⁶⁷, mais le plus souvent, à la reprendre dans son intégralité pour la « reformuler », notamment en « fusionnant » certains niveaux. Par exemple, les deux premiers (besoins physiologiques et besoins de sécurité), relatifs au « avoir », seraient des « besoins primaires », alors que les trois niveaux supérieurs (besoin d'appartenance, besoin d'estime, besoin de s'accomplir), relatifs au « être », seraient des « besoins secondaires ». De manière analogue, certains sociologues adoptent plutôt un regroupement en trois niveaux — besoins primaires (vitaux), besoins secondaires (sociaux), besoins tertiaires (personnels).

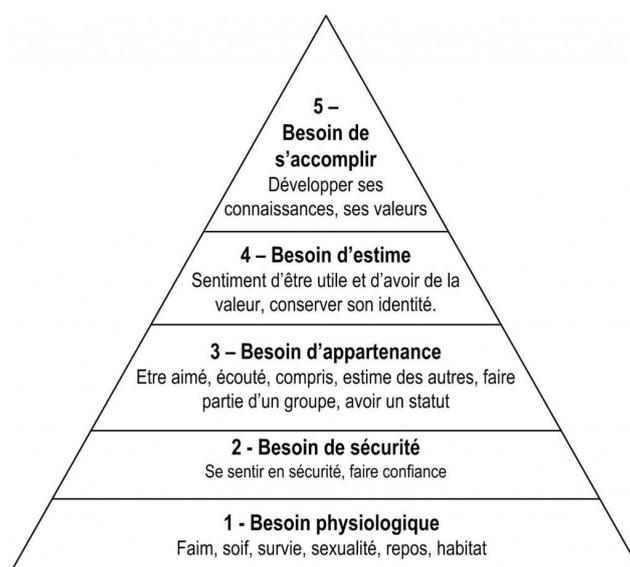


Figure 7 – La hiérarchie des besoins selon Maslow

Cette division ternaire est d'ailleurs fréquente. Par exemple, la « théorie des besoins SRP¹⁶⁸ » du psychologue américain Clayton Alderfer propose une relecture de la pyramide de Maslow qu'il réduit à trois niveaux (ou trois « facteurs »). Ceux-ci sont présentés comme complémen-

167/ Par exemple, pour aborder la question de la motivation au travail, le psychologue américain David McClelland mobilise le *Thematic Apperception Test* (TAT) pour étudier les besoins correspondant uniquement au sommet de la pyramide de Maslow. Publiée en 1961, sa « théorie des besoins » (Fondriat, 2011) fait ressortir les besoins de réalisation (envie de réussir), de pouvoir (avoir de l'influence sur autrui) et d'affiliation (besoin de relations sociales satisfaisantes) comme trois puissants moteurs de motivation.

168/ SRP pour : S = Subsistance, R = Relations, P = Progression (ERG dans la version originale : E = Existence, R = Relatedness, G = Growth).

taires, mais non hiérarchisés (Alderfer, 1969) : (1) Les besoins de subsistance (Existence needs), correspondant grosso modo au niveau 1 (besoins physiologiques) et à une partie du niveau 2 (besoin de sécurité physique) de la pyramide de Maslow : ce sont les besoins qui conditionnent la survie de l'individu. (2) Les besoins de sociabilité (Relatedness needs), qui sont des besoins liés à l'établissement de relations interpersonnelles, d'affectivité, d'estime, de reconnaissance des autres, d'intégration au groupe (ces besoins correspondent à une partie des besoins de niveau 2 — sécurité psychologique — et à ceux du niveau 3 de la Pyramide de Maslow) : l'individu se réalise, s'épanouit grâce à la considération que lui témoigne l'environnement social dans lequel il évolue. (3) Les besoins de progression (Growth needs) — plus ou moins les deux derniers niveaux de Maslow —, qui se manifestent chez l'individu par le besoin de développement (compétences, connaissances, création, innovation,...), de réaliser ses ambitions, de « grandir en tant qu'individu ». Il est important de noter que dans son modèle — utilisé surtout en gestion par les spécialistes en ressources humaines —, Alderfer n'établit pas de priorité de certains besoins par rapport à d'autres.

Parmi les auteurs refusant l'idée de hiérarchie figure également l'infirmière américaine Virginia Henderson qui, sur la base de son activité professionnelle, présente en 1947 une liste de 14 besoins « fondamentaux » : (1) respirer, (2) boire et manger, (3) éliminer, (4) se mouvoir et maintenir une bonne posture, (5) dormir et se reposer, (6) se vêtir et se dévêtir, (7) maintenir sa température, (8) être propre et protéger ses téguments, (9) éviter les dangers, (10) communiquer, (11) agir selon ses croyances et ses valeurs, (12) s'occuper en vue de se réaliser, (13) se récréer et se divertir, (14) apprendre. Ces besoins — établis selon une approche à la fois biologique et physiologique (homéostasie), psychologique, sociale et spirituelle (bien-être, développement personnel,...) — sont interdépendants, et s'ils peuvent être classés selon une liste ordonnée utilisée par les professionnels de santé lors des soins, ils ne font l'objet, dans le modèle proposé (Henderson, 2003 (1947)), d'aucun classement « par ordre d'importance » ou « par ordre chronologique de satisfaction ».

Dans les années 1980 et 1990, l'économiste et environnementaliste chilien Manfred Max-Neef (en collaboration avec le sociologue Antonio Elizalde et le philosophe Martin Hopenhayn) remet en question l'idée selon laquelle les besoins humains tendraient à être sans limite, changeraient tout le temps et seraient différents dans chaque culture, chaque environnement, chaque période historique. Selon lui, la toute première étape est d'opérer une distinction claire et sans ambiguïté entre, d'un côté, les besoins et, de l'autre, les « manières de les satisfaire » (qu'il désigne par le terme anglais « *satisfiers* », c'est-à-dire « combleurs ») : en effet, c'est précisément la difficulté à les différencier — donc une « lacune conceptuelle » — qui nous fait croire que les besoins sont infinis, insatiables, et en perpétuelle évolution. Pour sa part, il défend le point de vue opposé : les besoins humains fondamentaux seraient peu nombreux, classifiables et invariables, quelle que soit l'époque, la civilisation ou les conditions socio-économiques. Il classe ainsi tous les besoins en neuf catégories : (1) la subsistance, (2) la protection, (3) l'affection, (4) la compréhension, (5) la participation, (6) l'oisiveté, (7) la création, (8) l'identité, (9) la liberté. En mobilisant par ailleurs les quatre catégories existentielles de l'être, de l'avoir, du faire et de l'interagir, il construit une matrice à 36 cases (9 lignes et 4 colonnes) où s'inscrivent tous les besoins (Max-Neef, Elizalde, Hopenhayn, 1991, p.32-33), sans hiérarchie ni compétition¹⁶⁹. Dans cette approche, les besoins humains « font système » (au sens où ils sont interdépendants et interactifs) et peuvent demander à être satisfaits de manière simultanée, sans ordre préétabli

169/ Ces travaux ont inspiré Marshall Rosenberg, fondateur de la « Communication non violente ».

(ce en quoi le modèle de Max-Neef se distingue de celui de Maslow), *en dehors toutefois des éléments de base nécessaires à la subsistance et à la survie qui restent prioritaires.*

Au début des années 1990, à l'issue d'un travail censé mobiliser l'ensemble des connaissances scientifiques disponibles sur les caractéristiques des biens, des services et de toutes les ressources nécessaires pour améliorer la santé physique et l'autonomie humaine dans toutes les cultures et à toutes les époques, Ian Gough (professeur de sciences politiques et économiques) et Len Doyal (professeur d'éthique médicale) proposent un « modèle hiérarchisé des besoins » (Doyal & Gough, 1991). Cette « typologie » — de nature binaire — opère la distinction entre, d'un côté, les besoins fondamentaux¹⁷⁰ (au nombre de deux : la santé et l'autonomie critique, relevant de la physiologie « de base ») et, de l'autre, des besoins intermédiaires¹⁷¹ (au nombre de onze). Qu'ils soient fondamentaux ou intermédiaires, tous les besoins ainsi identifiés sont, selon les auteurs, de portée universelle. Pour y répondre, les individus doivent pouvoir accéder à un certain nombre de biens, de services, d'activités et de relations humaines qui sont autant de moyens ou de « sources de satisfaction de ces besoins »¹⁷². Mais à la différence des besoins eux-mêmes — censés être universels, donc « *absolus* » —, ces sources de satisfaction des besoins sont, elles, « *relatives* » à une culture ou à un contexte particulier. C'est la raison pour laquelle les auteurs n'en proposent aucune liste, puisque celle-ci aurait été contingente à une société ou à une époque donnée.

Nous arrêtons là ce rapide historique (qui ne se veut nullement exhaustif) dont la seule vocation est, rappelons-le, d'alimenter une réflexion sur la gestion des pénuries, une réflexion indispensable dans un contexte d'épuisement rapide des ressources qui nécessite des choix clairs de priorités en termes de satisfaction de certains besoins par rapport à d'autres : où fixer la limite entre ce qui est « vital » et ce qui ne l'est pas ? A cet égard, la grande variété des termes employés par les différents auteurs dans les classifications qu'ils proposent est quelque peu déroutante, au sens où selon le cas, une même dénomination peut renvoyer à des catégories de besoins très différentes, et à l'inverse, des termes différents peuvent désigner les mêmes besoins. Par exemple, certains considèrent comme étant des « besoins secondaires ou besoins d'ordre philosophique » ce que d'autres qualifient de « besoins fondamentaux ou besoins primaires ». Cette hétérogénéité terminologique invite à aborder avec une certaine prudence des listes se voulant « universelles » mais qui, ne pouvant s'affranchir d'une part de subjectif lié (par exemple) aux différences individuelles et au contexte social, présentent un caractère relatif : si un logement chauffé et bénéficiant de l'eau courante est généralement considéré comme un besoin fondamental dans les sociétés occidentales développées et sédentarisées, en est-il forcément de même chez les tribus traditionnelles et nomades d'Afrique ou d'Asie ?

4.1.2.- *Éléments d'accord : hiérarchie implicite et importance de l'échange*

En dépit de l'absence de consensus terminologique et conceptuel qui s'en dégage, le rapide tour d'horizon de ces quelques modèles révèle néanmoins un certain nombre de points communs ou « constantes » dont nous tirons deux « conclusions opératoires », fondamentales pour la suite de notre propos.

170/ *Fundamental needs.*

171/ *Intermediate needs.*

172/ *Need satisfiers.*

1.- Tous les besoins sont égaux, mais certains sont plus égaux que d'autres

La première conclusion est relative à la pertinence — ou non — de l'idée même de « classement par ordre d'importance » des besoins.

Nous l'avons vu, nombreux sont les successeurs de Maslow à remettre en question la conception pyramidale de son modèle, notamment l'idée selon laquelle l'être humain ne s'engagerait à combler un type de besoin que lorsque le précédent a été satisfait. Par exemple, personne ne devrait se lier d'amitié sans avoir d'abord trouvé de quoi se nourrir physiquement, ni appartenir à un groupe social sans s'être d'abord assuré d'être en sécurité. Clairement, ce séquençage ne correspond pas à bien des réalités observées. En d'autres termes, le modèle serait faux. Cependant, comme le fait remarquer Philippe Mouillot¹⁷³, cette conclusion s'insère dans un contexte politiquement et psychologiquement stable. Mais en début d'année 2020, le Covid-19 semble avoir « rabattu les cartes » de la hiérarchie des besoins — et ce, sur l'ensemble de la population mondiale —, puisqu'il replace la sécurité à la base de la hiérarchie de Maslow (niveau 2), après les besoins physiologiques (niveau 1). Par ailleurs, le confinement et la crainte de la contamination réduit toute activité (comme l'illustre notamment la chute drastique, entre le premier trimestre 2019 et le premier trimestre 2020, du niveau de pollution dans la zone géographique autour de Wuhan), raccourcit les circuits, fait monter en bourse la valeur des entreprises ou marques qui font du traitement de l'eau ou vendent des produits de première nécessité au détriment des marques de luxe, modifie les comportements : « [...] *on ne se saluera désormais plus au travers d'une bise ou d'une poignée de mains, ce qui risque de s'ancrer dans les coutumes occidentales si le danger sanitaire devait persister* » (Mouillot, 2020). D'une certaine manière, l'entrée dans une période de grande incertitude semble réhabiliter la pyramide de Maslow : « *rien d'autre ne compte que de survivre : les denrées alimentaires sont redevenues la priorité (niveau 1 de la pyramide) afin de pouvoir rester confiné chez soi, en sécurité (niveau 2) et ne pas être contaminé. Le besoin d'appartenance conforte sa place au niveau 3 : une fois que la survie et la sécurité sont assurées, on a besoin de prendre des nouvelles de ses proches, notamment s'ils sont en voyage, en zone critique ou, pire, en quarantaine. Quant à la reconnaissance et à l'accomplissement de soi (niveaux 4 et 5), cela viendra en temps voulu* » (Mouillot, 2020).

Enfin, indépendamment de cette illustration par la crise du Covid-19, force est de constater que même chez les auteurs refusant l'idée de hiérarchie, les besoins relatifs à la survie (qu'ils soient qualifiés de physiologiques, primaires, élémentaires, fondamentaux, indispensables,...) sont systématiquement cités en premier ; c'est le cas notamment des besoins relatifs à la « subsistance » et à la « sécurité », qui bénéficient toujours d'un traitement particulier ou, tout au moins, apparaissent toujours en tête de liste.

Pour paraphraser Orwell : tous les besoins sont égaux, mais certains plus que égaux que d'autres...

Dans la suite de notre propos, nous appelons « besoins vitaux » ces besoins considérés de manière très consensuelle comme prioritaires (même en l'absence de hiérarchisation formelle) : il s'agit de ceux relatifs à la survie (qui renvoient d'ailleurs à la « règle de 3 »¹⁷⁴) :

le **besoin de respirer**, ce qui sous-entend la possibilité de disposer en continu d'un air respirable, et donc une gestion appropriée de certains rejets ;

le **besoin de s'abriter**, ce qui sous-entend la possibilité de disposer de matériaux de construction ;

173/ Maître de Conférences HDR en Sciences de Gestion, IAE de Poitiers.

174/ Cette règle stipule que l'être humain peut survivre « 3 minutes sans oxygène, 3 heures sans abri, 3 jours sans eau, 3 semaines sans nourriture, 3 mois sans contacts humains » (certains « survivalistes » complètent cette règle par « 3 secondes sans vigilance » dans certaines situations).

le **besoin de boire**, ce qui sous-entend une source continue d'eau potable en quantité suffisante ;
le **besoin de manger**, ce qui sous-entend un approvisionnement continu de nourriture en quantité et en qualité suffisantes ;

le **besoin de se maintenir en bonne santé**, ce qui sous-entend (*a minima* et en lien avec les deux besoins précédents) une gestion appropriée des déchets — et, en particulier, du cycle alimentation-excrétion — pour éviter la contamination de l'eau potable et assurer une production de nourriture saine et équilibrée : « *Que ton aliment soit ton premier médicament* » (Hippocrate) ;
le **besoin de contacts humains**, ce qui sous-entend la possibilité de se déplacer. Par rapport aux précédents, ce besoin occupe une place à part dans cette petite liste, pour deux raisons. Premièrement, il est générique, puisque « le contact humain » est une réponse à une multitude de besoins, dont une partie de ceux figurant déjà dans la liste précédente ; par exemple, la satisfaction de besoins tels que « se maintenir en bonne santé », « s'abriter » ou « manger » peut nécessiter le contact impératif avec un détenteur de savoir-faire : un médecin, un bâtisseur, un agriculteur (la notion de « division du travail » relève du registre des contacts humains). Deuxièmement, dans la hiérarchie de la « règle de 3 » cité plus haut, la fréquence nécessaire est moindre : sauf exception, sa satisfaction relève d'une temporalité différente de celle des autres besoins vitaux (on peut « vivre sans » pendant des mois).

Nous estimons que ces besoins sont vitaux au sens où leur non satisfaction provoquerait très probablement une crise majeure et la désagrégation de « ce qui fait la ville » ; en d'autres termes, la satisfaction en toute circonstance de ces besoins est non négociable et devrait pouvoir être assurée, notamment — en accord avec le thème central qui sous-tend l'ensemble de ce document — en cas de pénurie énergétique grave.

A cet égard, en supposant qu'en première approximation, les émissions de gaz à effet de serre des activités humaines sont une mesure de la consommation d'énergies et de matières liée à la satisfaction des besoins de l'humanité (cf. chapitre 3), il est édifiant de mettre en correspondance, d'un côté, les différents postes d'émissions anthropiques de GES à l'échelle mondiale et, de l'autre, la petite liste précédente des besoins vitaux (le nombre entre parenthèse est une estimation du pourcentage de la contribution, en 2019, de chaque poste aux émissions) :

Agriculture (20 %) et déforestation (10 %), cette dernière essentiellement pour obtenir de nouvelles surfaces alimentaires : besoin de se nourrir.

Cimenteries (7%) : besoin de s'abriter.

Industrie hors cimenteries (10 %) : tous les besoins.

Production électrique à base de combustibles fossiles (26 %) : tous les besoins.

Transports (14 %) : tous les besoins

Chauffage des bâtiment (6%) : besoin de se maintenir en bonne santé

Autres, dont le traitement des déchets (7%) : besoin de boire, besoin de respirer, besoin de se maintenir en bonne santé

2.- *L'échange au cœur de la satisfaction de tous les besoins*

La deuxième conclusion est relative à la place centrale accordée, dans tous les modèles (certes de manière souvent implicite), à la notion d'*interaction* ou d'échange. Ce constat — sans doute pas très original mais qui mérite d'être mis en exergue — vaut aussi bien pour les besoins vitaux (ou de subsistance, ou primaires, ou fondamentaux, ou « vrais »,... selon la terminologie utilisée) que pour tous les autres besoins (ensemble aux frontières variables, correspondant *grosso modo* aux trois niveaux supérieurs de la pyramide de Maslow et regroupant les besoins désignés, selon les auteurs, comme secondaires, tertiaires, intermédiaires, de socialisation, de

progression, etc. . . . , sans oublier les « faux besoins » d'Epicure). Bien entendu, la nature de « ce qui est échangé », de même que la manière dont s'opère l'échange, varie en fonction du besoin à satisfaire : échanges de matières (liquide, solide, gazeux) pour certains besoins physiologiques (respiration, alimentation, excrétion, . . .) ; échanges d'énergie sous forme thermique pour d'autres ; échange d'information (au sens large) pour d'autres encore ; . . .

« Satisfaire un besoin » consiste donc à gérer des échanges, aussi bien en « positif » (favoriser certains types d'échanges) qu'en « négatif » (éviter ou limiter d'autres types d'échanges¹⁷⁵), le choix des échanges que la satisfaction d'un besoin conduit à favoriser — ou à limiter — étant d'ailleurs variable d'un moment à un autre¹⁷⁶, d'un contexte à un autre, d'un lieu à un autre, d'un individu à un autre, selon une variété infinie de modalités.

Mais dans tous les cas, la gestion d'un échange mobilise des ressources (matière, énergie) qui sont prélevées dans « l'environnement » auquel elles sont rendues sous une forme plus « désorganisée » au sens de la thermodynamique, c'est-à-dire avec un niveau d'entropie plus élevé ou, pour dire les choses autrement, avec un niveau de néguentropie¹⁷⁷ moins élevé.

De ce fait, satisfaire les besoins d'un individu et, plus largement, d'une société humaine, équivaut à la faire « traverser » par des flux : « ressources » en entrée, « déchets » en sortie, la différence entre les deux pouvant se résumer à leur néguentropie. Transformer le déchet en ressource (idée chère aux tenants de l'économie circulaire) — donc augmenter son niveau de néguentropie — n'est possible que par la mobilisation d'autres « ressources » (par exemple, dépolluer l'eau pour la rendre potable ou récupérer tous les métaux des alliages contenus dans un téléphone portable nécessitent de l'énergie) et la production d'autres « déchets » (par exemple des gaz à effet de serre).

175/ Réduire les déperditions ou les apports excessifs de chaleur, se protéger des agents pathogènes et de diverses formes de « nuisances » (visuelles, acoustiques, olfactives, . . .), limiter les contacts avec certaines personnes, etc.

176/ Par exemple, la satisfaction du besoin de « confort thermique » passe par une gestion des échanges énergétiques qui varie selon la saison ; celle du besoin d'interaction sociale est différente selon le moment de la journée (jour, nuit) ; etc

177/ La néguentropie — terme issu de la contraction de l'anglais *negative-entropy* c'est-à-dire *entropie négative* — est définie comme un facteur d'organisation des systèmes (qu'ils soient physiques, biologiques, sociaux ou humains), s'opposant à la tendance naturelle à la désorganisation (augmentation de l'entropie, selon le deuxième principe de la thermodynamique). Cette notion est utilisée en systémique comme synonyme de la force de cohésion et ne peut pas s'appliquer à des systèmes clos (c'est-à-dire n'échangeant ni énergie ni matière avec son environnement). Elle peut être interprétée en termes d'énergie ou en termes d'information, ce que l'on peut illustrer sur l'exemple d'une cellule vivante :

en termes d'énergie, la cellule tend à conserver sa néguentropie (une organisation, une structure, une forme, un fonctionnement) grâce à la consommation d'énergie qu'elle prélève sur son environnement (à sa mort, comme elle n'entretient plus cette néguentropie, elle se désagrège) ;

en termes d'information, le maintien d'une structure « ordonnée » (capable d'adaptation en temps réel face à un milieu variable) est rendu possible par les voies de communication entre le corps de la cellule et son environnement *via* des membranes qui sont poreuses, mais seulement de façon sélective : la perte de la capacité de sélection dans ses échanges avec son environnement conduit à la mort rapide de la cellule sous l'effet des toxines dont elle ne peut plus se protéger (Delaunay, 2021).

A une autre échelle, la planète Terre n'est pas non plus un système clos : la partie non réémise vers l'univers de l'énergie de rayonnement reçue du soleil est captée par les formes de vie terrestres, dont la néguentropie peut ainsi être préservée (Roddiar, 2012).

4.2.- Satisfaire les besoins en mode BELT : potentiel de l'agencement

« Les vrais besoins sont d'interagir avec des ressources et des entités assez riches et diverses pour vivre joyeusement » (Maupu et Stransky, 2018).

Toute satisfaction d'un besoin fait intervenir une forme d'échange, tout échange fait intervenir des modifications. Celles-ci sont quantifiées par une grandeur physique — l'énergie — qui peut prendre différentes formes : cinétique (mouvement), potentielle (gravitationnelle, mécanique, chimique, électromagnétique,...), thermique (cinétique à l'échelle microscopique), etc.

Certaines modifications peuvent être qualifiées de « spatiales », au sens où elles se réfèrent à la position dans l'espace (à l'échelle macroscopique). Ce sont elles qui sont mobilisées lorsque la satisfaction d'un besoin nécessite la coprésence d'entités (matières, énergies primaires, personnes, artefacts,...) situées en des lieux distincts, et qui doivent donc être déplacées dans l'espace¹⁷⁸ pour rendre possible d'autres modifications¹⁷⁹ ou permettre d'autres types d'échanges¹⁸⁰ (on peut noter que relèvent également de cette catégorie de « modifications spatiales » celles qui « déforment », au sens large¹⁸¹).

Dès lors, une manière de diminuer la quantité d'énergie nécessaire à la satisfaction d'un besoin faisant intervenir de telles modifications est de modifier les positions respectives des lieux — nous les appellerons des **adresses** — où sont situées les entités dont la mise en coprésence est nécessaire à la satisfaction de ce besoin.

Dit autrement, un des outils de l'approche BELT est l'**agencement**, expression qui doit être précisée.

4.2.1.- Notion d'agencement

L'acception la plus courante de l'agencement étant le « résultat de l'action d'**agencer** », c'est ce verbe que nous prenons pour point de départ en croisant les définitions qu'en proposent plusieurs dictionnaires¹⁸².

Agencer

— Disposer en combinant (des éléments), organiser (un ensemble) par une combinaison d'éléments.

— Disposer, arranger un ensemble de sorte que ses éléments soient exactement adaptés les uns aux autres et que le tout réponde au mieux à sa destination. (C'est nous qui soulignons).

Exemple : Bien agencer les développements d'une intrigue. (C'est nous qui soulignons).

— Disposer convenablement plusieurs choses ou les parties d'une même chose. (C'est nous

178/ La modification est donc celle de coordonnées spatiales des entités déplacées : biens, personnes, matériaux de construction,...

179/ Modification de la température d'un aliment ou de l'eau de douche ; modifications physico-chimiques de la nourriture au cours de son passage dans le corps humain ou dans un haut fourneau lorsque le minerai devient fonte ou acier ; etc

180/ Par exemple interpersonnels, dans le cadre d'interactions sociales, sur différents registres : commercial, informationnel, affectif,...

181/ Taille d'une branche en pointe, façonnage d'une motte de terre glaise en pot ou d'un bloc de marbre en statue, laminage d'un lingot en rail de chemin de fer,...

182/ Notamment Le Grand Robert en ligne (<https://dictionnaire.lerobert.com/definition/agencer>), Le Grand Larousse en ligne (<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/agencer/1618>) et la base de données en ligne Wiktionary (<https://fr.wiktionary.org/wiki/agencer>).

qui soulignons). Exemple : Préparer un repas, c'est **agencer** ces plats en un menu.
 — (*Beaux-arts*) Arranger et combiner les groupes d'une composition, les figures d'un même groupe, ou les parties d'une même figure [...].
 Exemple : Ce peintre **agence bien** ses figures. (C'est nous qui soulignons).
 — (*Architecture*) Heureuse combinaison de certaines parties de la construction avec les ornements, en parlant des distributions qui satisfont aux divers services. (C'est nous qui soulignons).
 — (*Musique*) Disposition des parties vocales ou instrumentales.
 Exemple : Dans ce morceau, les voix sont bien agencées (c'est nous qui soulignons).

A la lumière de ces quelques éléments il apparaît :

D'une part, que les « éléments » que l'action d'agencer « organise » ou « dispose en combinant » peuvent relever de registres très divers (comme les voix dans un morceau musical, des odeurs ou des goûts dans un menu, des idées dans un texte, des développements dans une intrigue, des événements dans un planning,...), pas forcément spatialisés ni même spatialisables (l'agencement peut par exemple être temporel, comme dans le cas des voix dans un morceau musical). Compléter le terme **agencement** par l'adjectif **spatial** n'est donc pas un pléonasme : c'est une précision utile.

D'autre part, que le verbe est, parfois, accompagné d'un adjectif, d'un adverbe ou d'une tournure qui renvoie à une idée d'optimisation (convenablement, heureuse, bien,...) par rapport à un objectif, une finalité, une **fonction** (satisfaire à divers services, répondre au mieux à sa destination, exactement adapté...).

C'est à dessein que nous avons utilisé l'expression fonction. Car dans certains cas, l'idée d'agencement renvoie à cette notion, à double titre.

D'un côté, du fait de l'amélioration apportée par un agencement à la capacité d'un objet (au sens large) à remplir une fonction en réponse à un besoin et ce, indépendamment de la nature de « ce qui est agencé ». Exemples : dans le cas d'un couteau, assurer — *avec moins d'efforts* — la fonction de couper, en réponse au besoin de se nourrir ; dans le cas d'une poutrelle, assurer — *avec moins de matière* — la fonction de soutenir une charge, en réponse au besoin de s'abriter ; dans le cas d'une ville, assurer — *en mode BELT* — la « fonction » d'échanger (au sens large), en réponse aux besoins vitaux de ses habitants.

De l'autre, en référence aux différentes « fonctions » complémentaires des éléments agencés. Exemples (identiques aux précédents) : les performances de l'alliage *en acier inoxydable* de la lame tiennent à la complémentarité entre la « fonction solidité » de l'acier et la « fonction protection contre l'oxydation » du chrome ; les performances statiques *du béton armé* de la poutrelle tiennent à la complémentarité entre la « fonction résistance à la traction » de l'armature métallique et la « fonction résistance à la compression » du béton ; les performances *BELT* de la ville tiennent à la complémentarité entre les « fonctions » des *différentes adresses* pouvant être mises en relation en mode BELT.

Chaque fois que l'agencement est orienté par une finalité (un objectif), ces deux manières de faire intervenir la notion de fonction en lien avec l'agencement illustrent le fait que la pertinence de ce dernier par rapport à cette finalité tient — selon l'angle d'approche, selon la manière d'envisager la question — à son seul caractère spatial, ou à son caractère à la fois spatial et fonctionnel. Le fait de compléter — ou non — l'expression *agencement spatial* par l'adjectif *fonctionnel* (ou dit autrement, de remplacer l'adjectif *spatial* par *spatio-fonctionnel*) permet de

préciser cet angle d'approche.

Il est important de souligner que le parallèle proposé — auquel nous avons recours pour illustrer de manière lapidaire et simpliste une idée qui est développée dans la suite du propos — entre des objets techniques (couteau, poutrelle) d'un côté et, de l'autre, une ville, constitue certainement un raccourci abusif qui est rendu possible par la polysémie et les différentes acceptions du terme *fonction*. Car selon le domaine, selon la discipline, ce dernier renvoie à différentes notions ; par exemple : *propriété* (d'un groupe d'atomes) en chimie ; *rôle* (d'une cellule, d'un organe, d'un organisme) en biologie, physiologie, médecine ; *processus* (de changement, d'interaction) ou *service* (écosystémique) en écologie ; *relation binaire* (entre deux grandeurs) en mathématiques ; *finalité, processus* ou *résultat* (suivant le cas) en anthropologie et en sociologie ; *comportement* en microéconomie (fonction d'utilité) ; *ensemble d'activités* (économique, politique, culturelle) en géographie (à propos des « fonctions urbaines ») ; etc... Notons aussi que par delà les disciplines, l'analyse systémique propose une hiérarchie des fonctions (des plus simples aux plus élaborées) en lien avec la typologie à neuf niveaux de complexité des systèmes proposée par Kenneth Ewart Boulding (Laterrasse, 2019). Dans le cas d'une ville, lorsqu'elle est abordée sous l'angle spatio-fonctionnel, la fonction relève possiblement de toutes les acceptions (rôle, service, processus, comportement, ensemble d'activités,...) selon le point de vue et selon l'échelle ; par exemple, à certains égards, la ville serait un agencement d'adresses jouant chacune un *rôle* (biologie), qui tient aux *activités humaines* (géographie) qui s'y déroulent, les fonctions dont il est ici question correspondant aux niveaux supérieurs de la hiérarchie de Boulding.

Ajoutons que si, dans cette approche faisant intervenir des lieux et leurs fonctions, aucune correspondance fixe entre un lieu et une fonction n'est *a priori* supposée (un lieu peut accueillir temporairement ou durablement une ou plusieurs fonctions, une fonction peut temporairement ou durablement être affectée à un ou plusieurs lieux), nous verrons plus loin (section 4.3.) dans quelle mesure la contrainte BELT peut remettre en cause cette interchangeabilité des lieux en termes d'activités qu'ils accueillent.

4.2.2.- Agencement et utilité

Dans tous les domaines et à toutes les échelles, l'agencement — qu'il soit spatial ou spatio-fonctionnel — est utilisé à des fins « utilitaires » (le dessin au service d'un dessein), depuis le façonnage des premières armes, outils et artefacts (donner une certaine forme à un silex pour lui conférer des propriétés tranchantes ou à un récipient en terre pour modifier la manière dont il laisse un liquide s'écouler) jusqu'au design industriel¹⁸³ de certains ingénieurs ou les travaux autour des nanomatériaux de certains chimistes et physiciens¹⁸⁴ (qui se sont emparés notam-

183/ Consistant pour des ingénieurs à modifier les formes des objets qu'ils conçoivent (structures mécaniques, profils aérodynamiques, antennes, composants électroniques) afin d'en améliorer certaines propriétés physiques telles que la solidité, la durabilité, l'efficacité,... (Allaire, 2007 ; Jouve et Allaire, 2016).

184/ Au cours des dernières décennies, physiciens et chimiste s'attachent à concevoir et à élaborer une grande variété de nanoparticules et de leurs agencements en nanomatériaux (nanotubes, nanopoudres, nanofibres,...) possédant des propriétés inédites aux applications nombreuses dans des domaines variés : dureté et résistance à l'usure (traitement de surfaces de matériaux), biocompatibilité (muscles artificiels, implants osseux), conductivité (stockage de l'hydrogène) et diverses propriétés électriques (microprocesseurs), propriétés filtrantes (domaines médical et environnemental), densité d'information pouvant être stockée (disques optiques), faculté désinfectante et désodorisante (vêtements), etc. (Ichbiah, D., 2015). Notons que certaines applications de ces technologies de pointe ont un « côté obscur » puisqu'elles conduisent à la production et la diffusion de « nanodéchets », générant divers risques environnementaux (Hochella Jr. *et al.*, 2019) et sanitaires ; ainsi, par inhalation, ingestion, contact

ment des objets de la nanofamille carbonée, qu'ils agencent suivant des géométries variées et qu'ils mêlent à des métaux ou à des plastiques, donnant naissance à de nouveaux matériaux).

Le domaine du bâtiment offre, à toutes les époques et dans toutes les cultures, une longue liste d'exemples d'agencements améliorant les « performances » d'une construction, parfois de manière très subtile et passant souvent inaperçue aux yeux d'une personne non initiée : par exemple, au delà de leur « fonction » d'ornementation, certaines modénatures¹⁸⁵ de façade, en répartissant et en orientant les écoulements de l'eau de pluie sur cette dernière, lui confèrent des propriétés « autonettoyantes » ; ou encore, d'innombrables illustrations de configurations astucieuses démultipliant le potentiel de défense passive des châteaux et autres places fortes émaillent la longue histoire de l'architecture militaire.

Plus en rapport avec le sujet qui nous occupe, l'architecture bioclimatique¹⁸⁶ réduit les besoins d'énergie de chauffage de ses habitants par des dispositifs dont certains relèvent de l'agencement¹⁸⁷ : caractéristiques dimensionnelles et géométriques du bâtiment et des éléments de son « enveloppe » (épaisseur des murs, dimension et répartition des baies en façade, etc) ; agencement des pièces selon leurs « fonctions » et donc leurs besoins en chaleur et en lumière ; l'orientation du bâtiment — notamment par rapport aux points cardinaux et aux vents dominants — en fonction des ouvertures de ses façades et du climat (par exemple, dans l'hémisphère nord, façades aveugles côté nord, ouvertes côté sud pour les climats plutôt froids, l'inverse pour les climats chauds) ; positionnement du bâtiment par rapport à son environnement naturel (accoler la maison à une butte, tirer parti d'écrans de protection végétaux) et artificiel (d'autres bâtiments), etc. Notons que l'architecture bioclimatique a fait l'objet de nombreux travaux et programmes de recherche et donné lieu à une abondante littérature¹⁸⁸ (en particulier autour de la question des performances énergétiques des bâtiments) et que dans un contexte de réchauffement climatique, les travaux traitant de cette question plus spécifiquement dans les pays au climat chaud apparaissent comme particulièrement pertinents¹⁸⁹.

cutané ou passage percutané, ces nanodéchets peuvent provoquer divers types de dysfonctionnements de certains organes (Houdeau et Lamas, 2019) ; leurs effets potentiels en tant que perturbateurs endocriniens sont également à souligner (Houdeau, 2015).

185/ C'est-à-dire les proportions et dispositions de l'ensemble des éléments d'ornement.

186/ Qui n'est certes pas une idée neuve dans la mesure où elle s'inscrit dans le prolongement direct de l'architecture dite vernaculaire (architecture traditionnelle typique d'une aire géographique et culturelle donnée), véritable « science du concret » et manifestation d'un savoir-faire séculaire transmis et amélioré de génération en génération depuis les débuts de la sédentarisation de l'humanité et partout dans le monde (Schittich, 2019).

L'habitat « bioclimatique » (reposant notamment sur une bonne gestion de l'air, de la chaleur et du froid : limiter les déperditions de chaleur hiver, se protéger de la chaleur en été) est un mode de construction alternatif apparu aux États-Unis après les crises pétrolières des années 1970 et qui procède d'une réflexion s'attachant à perpétuer — mais aussi enrichir et prolonger — les enseignements de la tradition séculaire. En particulier, cet habitat s'inspire de l'insertion douce des constructions vernaculaires dans le paysage, de leur adéquation entre fonction et usage ainsi que de la logique d'utilisation inhérente à chaque matériau. Il a été repris en France par des « néo-ruraux » qui ont quitté la ville pour s'installer à la campagne, dans des régions plus ou moins désertifiées. Réalisées pour la plupart en autoconstruction, avec peu de moyens et sans études thermiques, les premières maisons bioclimatiques offrent un confort d'hiver et d'été grâce à une approche pragmatique, inspirée de celle de l'habitat vernaculaire (Gauzin-Müller, 2001 ; Gauzin-Müller, 2021).

187/ L'agencement n'est qu'une des composantes conférant ses performances énergétiques au bâtiment, à côté du choix des matériaux, notamment.

188/ Destinée à des publics variés — vulgarisation, professionnels du bâtiment (Dutreix, 2010), chercheurs (Chesné, 2012) — et dont la revue dépasse le cadre de ce document.

189/ Le cas du Sénégal en est une illustration (Joffroy *et al.*, 2017).

4.2.3.- Agencement et forme urbaine

L'exemple précédent de l'architecture bioclimatique relève du champ plus vaste de la planification spatiale, dans lequel certains auteurs opèrent une distinction terminologique liée à l'échelle d'intervention : l'architecture à l'échelle du bâtiment, la composition urbaine à l'échelle l'îlot ou d'un groupe de bâtiments (mais en deçà du quartier), l'urbanisme aux échelles du quartier et de la ville, voire de l'agglomération, la planification régionale et l'aménagement du territoire aux échelles de la région et du territoire national, respectivement¹⁹⁰.

A toutes ces échelles de la planification spatiale, la question de l'agencement occupe une place importante et fait l'objet d'une terminologie spécifique, dont la **forme urbaine**, une notion difficile à cerner, tant elle est « complexe et polysémique » (Levy, 2005). Disons simplement qu'elle suppose une délimitation préalable d'un objet dans l'espace, et que certains de ses aspects relèvent du « contour » de la « tache urbaine », alors que d'autres en qualifient l'intérieur (forme des bâtiments, forme des rues, forme des réseaux,...) ; elle concerne donc bien toutes les échelles. En dépit de l'absence d'une définition consensuelle, la notion de forme urbaine est souvent mobilisée — notamment par les géographes (Allain, 2005), les architectes (Panerai *et al.*, 1980) les historiens (Noizet, 2007), les archéologues (Pichard, 2014) et même les mathématiciens (Salingaros, 2005) — et dans ces différentes disciplines, la bibliographie relative à la **morphologie urbaine**¹⁹¹ est riche et abondante¹⁹².

Tenter de rendre compte de la variété des travaux relevant de la morphologie urbaine ou d'en faire une synthèse serait ici hors de propos¹⁹³. En revanche, il est utile pour la suite de notre réflexion d'ouvrir une brève parenthèse¹⁹⁴ qui focalise sur une approche morphologique particulière — s'inscrivant dans le cadre d'une volonté de comprendre la formation des villes à partir de l'étude des formes construites *elles-mêmes* —, développée dans les années 1970 et 1980 par Alain Borie, Pierre Micheloni et Pierre Pinon¹⁹⁵. Ces derniers se situent à la charnière

190/ Merlin & Choay, 1988.

191/ La morphologie urbaine — qui est **l'étude des formes urbaines** — explore différentes facettes des tissus urbains. Par delà la simple analyse architecturale des bâtiments, elle s'attache à identifier les schémas et structures sous-jacents (Alexander, 1977). Elle étudie non seulement les caractéristiques de la ville et de ses « éléments constitutifs » (voirie, parcellaire, bâti, densité, usages,...), mais également les phénomènes qui en sont à l'origine : topographie, histoire, culture, économie, règles d'urbanisme, contexte technologique ou énergétique (Newman et Kenworthy, 1989). Elle est interdisciplinaire et mobilise différentes échelles, depuis le bâtiment jusqu'à l'agglomération. (https://fr.wikipedia.org/wiki/Morphologie_urbaine)

La variété des approches relevant de la morphologie urbaine — qui s'inscrit dans une continuité historique d'analyses morphologiques et morphogénétique remontant à Aristote — s'est traduite par l'émergence, au fil du temps, de différents courants de pensée ou « écoles » : l'école anglo-saxonne (notamment Lewis Mumford, James Vance, Peter Hall,...), l'école italienne (Saverio Muratori, Aldo Rossi, Carlo Aymonino, Gianfranco Caniggia,...), l'école française (Philippe Panerai, Jean Castex, David Mangin,...), ou encore l'école morphogénétique de Christopher Alexander et Nikos Salingaros. Relèvent également de la morphologie urbaine les analyses, plus récentes, qui s'appuient sur les outils de la géométrie fractale (et, ces dernières années, les approches multifractales), comme celles développées par Michael Batty (Center for Advanced Spatial Analysis) à Londres ou par Serge Salat (Institut des Morphologies Urbaines) en Région parisienne.

Une revue bibliographique des travaux menés dans ces différents cadres (parmi d'autres) dépasserait largement les ambitions de ce document.

192/ Un échantillon d'ouvrages de référence, à titre indicatif : Alexander, 1977 ; Allain, 2004 ; Batty et Longley, 1994 ; Panerai *et al.*, 1980 ; Salat, 2011 ; Salingaros, 2005 ;...

193/ Dans un chapitre de sa thèse, Claire Pichard donne un aperçu synthétique — qui ne prétend pas à l'exhaustivité — d'approches morphologiques dans certaines disciplines — notamment la géographie, l'histoire, l'architecture et l'archéologie — ainsi que des interrelations entre ces approches (Pichard, 2014).

194/ Cette parenthèse se réfère à certains éléments de la thèse d'Agnès Sander (Sander, 1995).

195/ Ces travaux s'inspirent de l'analyse typo-morphologique de l'école italienne, introduites en France par J.

entre des études considérant les formes urbaines comme résultat de certains déterminants sociaux, économiques, etc, et d'autres s'intéressant au domaine de l'espace perçu : il s'agit pour eux de « *saisir les formes bâties non pas à partir de leurs causes ou de leurs effets mais bien en analysant les objets eux-mêmes dans leur structure formelle.* » (Sander, 1995, p.139). Il est à noter que cette « recherche de structure » ne se résume pas à un travail sur un mode d'analyse uniquement synchronique ; au contraire, l'analyse morphologique a un véritable intérêt archéologique, en permettant, dans certains cas, une datation des constituants de l'espace urbain (Sander, 1995). Par leurs travaux, ces auteurs jettent les bases d'une méthodologie très précises pour l'étude des formes architecturales et urbaines, en analysant les relations entre site géographique et formes construites (Borie et al., 1980) et en insistant sur la notion de déformation (Borie et al., 1978). La démarche qu'ils développent repose sur l'articulation de plusieurs phases de décomposition-recomposition : le site naturel est décomposé en trois niveaux (orographie, hydrographie, couverture végétale), la forme urbaine en quatre (parcellaire, viaire, bâti, espaces libres à l'exclusion de la voirie). Les relations entre site et urbanisation ou entre bâti et formes urbaines sont alors analysées à partir du rapprochement de ces niveaux, considérés deux à deux : « *Les relations entre parcellaire et orographie, parcellaire et hydrographie, parcellaire et voirie, mais aussi bâti et bâti, parcellaire et parcellaire, etc. sont ainsi étudiées.* » (Sander, 1995, p.141). Pour qualifier ces relations, les auteurs utilisent un vocabulaire se référant à trois grands domaines, chacun de ces domaines faisant figure de « composante » de la forme :

la **dimension**, qui renvoie à la notion de « taille » et sur laquelle reposent notamment les définitions de la *densité* et de l'échelle ; la **géométrie**, qui recoupe les notions de *direction* (avec des règles « d'obéissance/désobéissance » réciproque par parallélisme, axialisation, perpendicularité, centrage,...) et de *figure* (avec des règles d'identité/différence, de similarité, de complémentarité,...) ; une notion comme la « répartition » et des oppositions telles que « allongé/compact » ou « simple/tourmenté » renvoient à cette composante géométrique ; la **topologie**, qui recoupe l'idée de *positionnement* (contiguïté, recouvrement, inclusion,...) et celle de *liaisonnement* (à laquelle renvoie l'opposition continu/discontinu).

L'intérêt de cette analyse est de fournir un cadre formalisé pour préciser la notion d'agencement : nous considérons que lorsqu'il peut être complètement caractérisé par la mobilisation des seules composantes dimensionnelle, géométrique et topologique, l'agencement est de nature exclusivement spatiale ; dans ce cas agencement est pour nous synonyme de forme. Notons toutefois que cette acception n'est pas consensuelle parmi les auteurs mobilisant la morphologie urbaine, puisque dans leurs travaux, la forme fait référence également à la notion d'usage du sol (qui, pour nous, relève de l'affectation fonctionnelle et non pas de la forme stricto sensu)¹⁹⁶.

Nous retenons donc ce triptyque « dimension-géométrie-topologie » en tant que grille de lecture pour apprécier si un caractère (d'un lieu, d'une superstructure, d'une infrastructure,...), un critère ou un indicateur est de nature exclusivement formelle¹⁹⁷ (ou « spatiale », en référence

Castex, P. Celeste et Ph. Panerai, et enrichie par les travaux de l'école française. Combinant morphologie urbaine et typologie architecturale, la **typo-morphologie** consiste à penser en termes de *rappports* la forme urbaine (trame viaire, parcellaire, limites, ...) et la typologie (c'est-à-dire les types de construction : position du bâti dans la parcelle, distribution internes, etc).

196/ Il arrive même que le « fonctionnement » soit qualifié de « forme urbaine » ; cette acception, qui « *s'écarte beaucoup d'une référence traditionnelle à des formes variées d'usage du sol* », est toutefois mobilisée par certains auteurs pour « *qualifier l'aspect stylisé des flux, de voyageurs mais pourquoi pas de marchandises, ou d'information, au sein des villes* » (Le Néchet, 2010, p. 154).

197/ L'intérêt de ce triptyque en tant que « guide » ou « aide » à la réflexion a été testé à l'occasion de plusieurs travaux ultérieurs se référant à la notion de forme : analyse des voies de circulation automobile (Stransky, 1995), des pôles d'échanges (Stransky, 2006), des circulations piétonnes (Stransky, 2011), des quartiers de gare (Stransky,

à la notion d'agencement spatial), ou si, en mettant en jeu d'autres composantes que celles relevant de la dimension, de la géométrie ou de la topologie — notamment une composante fonctionnelle —, il est par nature spatio-fonctionnel (en référence à la notion d'agencement spatio-fonctionnel).

4.2.4.- Agencement et développement durable

La morphologie urbaine qui, dès ses origines, s'attache à comprendre les mécanismes de la « fabrication » de la forme sous l'action de différents déterminants de toutes natures (topographiques, climatiques, historiques, sociaux, techniques,...), a donné lieu à la conceptualisation et à la création de cadres d'analyse de production de connaissance ou à vocation heuristique. Mais au cours des dernières décennies se sont multipliés les travaux mobilisant la forme urbaine en tant que levier d'un développement soutenable¹⁹⁸. Compte tenu du poids des transports dans la consommation énergétique et les émissions de gaz à effet de serre d'une ville, l'interaction entre forme urbaine et mobilité quotidienne figure parmi les questions les plus abordées. Partant du principe que des adresses éparpillées nécessitent davantage de déplacements pour être mises en contact, beaucoup de ces travaux focalisent sur les distances moyennes entre les habitants d'un territoire, donc la densité : « *la densité de population est le principal, sinon le seul indicateur de forme urbaine mobilisé* » (Le Néchet, 2010, p. 151).

A cet égard, la fameuse courbe des chercheurs australiens Newman et Kenworthy (**figure 8**), mettant en regard la densité (nombre d'habitants à l'hectare) en abscisse et la consommation annuelle de carburant par habitant en ordonnée, est devenue une référence incontournable (Newman et Kenworthy, 1989).

Cette étude conduit les auteurs à proposer une classification des villes en quatre types, allant des plus consommatrices en énergie aux moins consommatrices (en haut et en bas de la figure, respectivement), avec dans l'ordre les villes américaines (villes peu denses et très étalées), les villes australiennes, les villes européennes et enfin les villes asiatiques (villes denses et peu étalées).

Pour les auteurs, la conclusion est claire : la ville compacte, caractérisée par sa forte densité urbaine et son faible étalement, favorise l'émergence d'un système de transports durable. À l'inverse, les villes étalées et à faibles densités, en recourant à l'usage massif de la voiture, ont un système de transports coûteux et polluant.

L'originalité du concept de dépendance automobile employé par Newman et Kenworthy réside dans le fait qu'il s'applique non pas à des caractéristiques individuelles (les ménages) mais plutôt à des caractéristiques macroéconomiques et même morphologiques de la ville, notamment le degré d'étalement urbain (en lien avec la densité de population et d'emplois) et l'offre de transports collectifs¹⁹⁹.

2017) ou des espaces du périurbain (Stransky, 2019).

198/ Notons que la question d'éventuels « effets » de la forme urbaine a été abordée sur d'autres thèmes que le seul développement soutenable, et à d'autres échelles que l'agglomération, la ville ou le quartier. Par exemple, en lien avec la sécurité routière, des travaux ont été menés à l'échelle de la rue pour explorer le potentiel de la forme urbaine comme « modérateur » de la vitesse de circulation automobile (Stransky, 1995).

199/ D'ailleurs, conformément à leurs conclusions, Newman et Kenworthy préconisent d'agir conjointement sur la forme urbaine et le système de transports urbain pour diminuer la forte place de l'automobile dans les transports. Leurs recommandations sont les suivantes : interdire l'étalement à faible densité en périphérie des villes et encourager un développement urbain à forte densité, à l'image du centre historique de certaines villes ; réduire l'offre de stationnement et limiter la capacité du réseau routier ; développer les sites propres pour les bus, augmenter l'offre des transports collectifs (bus, tramway, métro) et encourager le développement urbain dense le long des lignes de

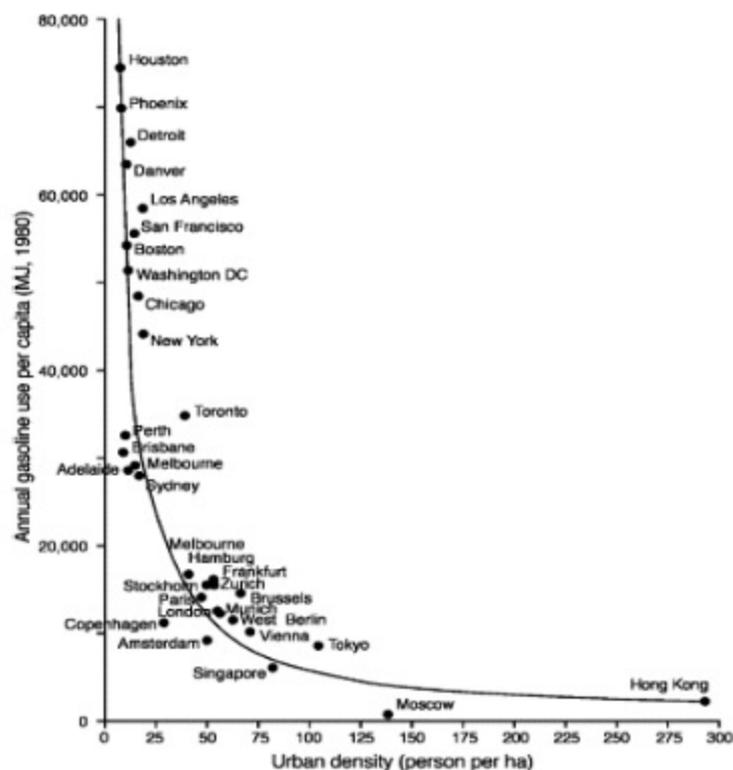


Figure 8 – Consommation d'énergie en fonction de la densité résidentielle brute.
(Newman et Kenworthy, 1989)

Cependant, la portée de ce résultat est fortement relativisée par plusieurs études qui concluent que la seule densité n'explique qu'une fraction insignifiante de la variation du nombre de kilomètres parcourus (Ewing, 2017). Dès lors, pour les chercheurs visant à approfondir la question de l'influence de la forme urbaine sur la durabilité des villes, il devient urgent d'enrichir la manière de caractériser cette dernière *via* une plus grande variété d'indicateurs pris en compte. C'est dans cette optique que s'inscrit la démarche de Serge Salat dans l'ouvrage *Les villes et les formes – Sur l'urbanisme durable* (Salat, 2011), où la morphologie urbaine (abordée à toutes les échelles, depuis le bâtiment jusqu'à la ville dans son ensemble) est présentée comme un des leviers clés de la lutte et l'adaptation des villes au changement climatique ; s'appuyant sur une littérature abondante, l'auteur y explore les qualités des tissus urbains historiques en les examinant à l'aune de plusieurs indicateurs traduisant différents aspects essentiels de la forme urbaine (intensité, connectivité, mixité, accessibilité, hiérarchie d'échelle,...).

Travaillant plus spécifiquement sur la question de l'influence de la forme urbaine sur la mobilité quotidienne, Florent le Néchet propose une revue de littérature sur un nombre important d'indicateurs relatifs à une grande diversité de thématiques à différentes échelles. Mais si « *une approche synthétique de la forme urbaine doit offrir un compromis entre le nombre d'indicateurs utilisés et la quantité d'information supplémentaire qu'ils apportent* »²⁰⁰, la nécessaire simplification qui en résulte conduit à l'élimination d'une information qui peut être

transports publics ; favoriser enfin les modes doux (vélos, marche à pied) par l'aménagement de pistes cyclables et de zones piétonnes.

200/ Le Néchet, 2011, p.164.

pertinente²⁰¹. Au final, c'est un nombre réduit de caractérisations de la forme urbaine qui se dégage : en premier lieu, l'incontournable opposition entre compacité et étalement, se traduisant, à l'échelle urbaine, par la très classique opposition « villes compactes / villes étalées » (faisant débat sur « la bonne intensité de concentration ») et, à l'échelle locale, par la question de la compacité de l'urbanisation autour des gares ferroviaires ; ensuite, l'opposition entre urbanisation continue et urbanisation diffuse, elle aussi débattue et se déclinant elle aussi à plusieurs échelles ; enfin, l'opposition — toujours à différentes échelles — entre ville monocentrique et ville polycentrique, difficile à appréhender compte tenu de la grande variété de formes urbaines envisageables selon ce critère²⁰². Mais force est de constater que diverses régions urbaines aux configurations très contrastées du point de vue de ces différentes caractérisations de la forme (par exemple, des structures présentant, à diverses échelles et selon différentes modalités, un « caractère d'archipel » plus ou moins marqué²⁰³) font état de performances assez semblables, que ce soit en termes de partage modal que de consommation d'énergie dans les déplacements. Comme le fait remarquer Jean Laterrasse en s'appuyant sur d'autres travaux (dont ceux de Florent le Néchet), l'influence de la forme urbaine — quantifiée par des indicateurs calculés « à étalement urbain, à population et à niveau de vie comparables » —, s'avère être difficile à déceler : « [...] dès que l'on compare les villes d'un même type entre elles, une multitude de mécanismes liés aux arbitrages individuels (choix de la résidence, choix du mode de transport, programme d'activité, et in fine, catégorie socioprofessionnelle et niveau de vie) tendent à « lisser » les effets des formes spatiales » (Laterrasse, 2019, p.134).

Il est impossible d'aborder la question de l'agencement spatio-fonctionnel ayant pour objectif la diminution des besoins d'énergie de transport et des émissions de gaz à effet de serre²⁰⁴ sans évoquer le Transit Oriented Development (TOD)²⁰⁵, fondé sur l'idée que pour redonner de l'attractivité aux lignes de transport collectif, il faut repenser les quartiers autour de leurs stations. En 1993, l'architecte et urbaniste Peter Calthorpe propose un modèle de croissance des villes américaines reposant non plus sur l'usage de la voiture particulière, mais sur des pratiques de mobilité durables, rendues possibles par une nouvelle forme d'urbanisation (New Urbanism). Son ouvrage de référence (Calthorpe, 1993) est considéré comme fondateur des principes du TOD. Par la suite, Robert Cervero résume ces principes (Cervero et Kockelman, 1997) avec la célèbre formule « 3D » (Density, Diversity, Design) : la densité et la mixité des fonctions urbaines rapprochent les origines et destinations pour réduire la nécessité de l'automobile et rendent les flux plus homogènes pour optimiser les taux de remplissage des transports collectifs ; et la qualité du design des espaces publics rend la marche à pied plus attractive. Si le mérite de la formalisation du TOD revient aux urbanistes américains, ceux-ci admettent eux-mêmes s'être inspirés d'exemples européens (Renne et Wells, 2004).

201/ C'est l'éternel dilemme soulevé par le célèbre adage de Paul Valéry : *Tout ce qui est simple est faux ; tout ce qui est complexe est inutilisable.*

202/ S'inspirant de travaux antérieurs (Bertaud et Malpezzi, 2003 ; Tsai, 2005), Florent le Néchet différencie six **formes d'usage du sol** de même densité qu'il illustre d'exemples concrets d'urbanisations à différentes échelles (Le Néchet, 2011, p.166-169). Sa réflexion, qui le conduit à proposer un nouvel indicateur (acentrisme), illustre par ailleurs le rôle fondamental du choix de la **maille d'étude** sur les résultats d'une analyse (Openshaw, 1984).

203/ On pourrait parler aussi de différentes déclinaisons intermédiaires entre « monocentrisme » et « polycentrisme » à plusieurs échelles.

204/ Dans un système de transport reposant majoritairement sur des véhicules individuels fonctionnant aux énergies fossiles, on peut considérer qu'en première approximation, ces deux objectifs se recoupent.

205/ Des traductions ont été proposées, comme « aménagement urbain en liaison avec le transport collectif », « urbanisme orienté vers le rail » ou encore « développement urbain orienté par les transports collectifs » (Laterrasse, 2019).

Depuis leur théorisation, les principes du TOD²⁰⁶ — qui peuvent être considérés comme une forme particulière d’agencement spatio-fonctionnel — ont été appliqués « sur le terrain » dans des contextes très variés et selon différentes déclinaisons (Curtis, Renne, Bertololini, 2009). Certaines de ces applications sont déjà suffisamment anciennes pour pouvoir faire l’objet de retours d’expérience et de travaux académiques visant à évaluer leur impact sur le nombre de véhicules.kilomètres parcourus, et donc sur l’énergie consommée et les émissions de CO₂ liées aux déplacements. Si la plupart de ces travaux concluent à l’existence d’effets positifs (IPCC, 2022), l’importance de ces derniers par rapport à d’autres facteurs fait débat ; en particulier, un récent travail de synthèse (Stevens 2017), confirmant et précisant les résultats d’études plus anciennes, indique que ces effets seraient faibles. Dit autrement, la pertinence du TOD en tant que levier de la transition énergétique est relativement consensuelle, mais sans que la configuration spatiale n’apparaisse comme un facteur déterminant, ni même de première importance. Comme le note Jean Laterrasse, « *il serait à la fois contestable et irréaliste de penser qu’il y aurait un (ou des) modèle(s) de ville durable, dont la structure pourrait faire référence* », mais en même temps, « *la difficulté à identifier des éléments plus structurants que d’autres ne doit pas conduire à négliger le rôle des structures spatiales, s’agissant notamment [...] de la répartition spatiale des fonctions urbaines.* »²⁰⁷

La difficulté à identifier le rôle des formes urbaines (comme celles orientées par les principes du TOD) dans les pratiques de mobilité des habitants (comme l’utilisation moindre de la voiture particulière) tient à la difficulté de démêler l’écheveau des mécanismes conduisant à des changements de ces pratiques²⁰⁸. En définitive, le fait que des observations *in vivo* ne permettent pas d’établir d’une manière plus marquée un lien clair entre agencement et consommation d’énergie de transport n’est guère surprenant, précisément parce que cette dernière relève des modes de vie réels. Pouvoir observer de tels liens (du moins dans un nombre suffisamment significatif de cas pour être décelables) présuppose par exemple qu’une diminution effective du recours à la voiture particulière ait eu lieu *corrélativement* à²⁰⁹ des transformations de l’agencement, en sachant que ces changements de mode de vie peuvent s’être produits en lien avec *d’autres* évolutions intervenues dans le même temps et relevant de registres variés (économique, réglementaire, politique, culturel,...)²¹⁰.

206/ Notons que quelques années plus tard, les 3D initiaux (*Density, Diversity, Design*) ont été complétés par 2D supplémentaires (Ewing & Cervero, 2001) : *Distance to transit*, qui est la distance moyenne *via* le plus court chemin entre la gare et toutes les adresses de la zone de chalandise de cette dernière, et *Destination accessibility*, qui se réfère à la proximité de la destination avec les axes les plus fréquentés (Huang et al., 2018).

Un sixième D (pour *Demand management*) a été ajouté par d’autres auteurs pour apprécier l’importance des mesures dissuasives vis à vis de l’usage de la voiture (Hurley, 2012).

Le passage de 3D à 5D (puis à 6D) ne nous apparaît pas comme une avancée fondamentale dans la mesure où, selon nous, les 3D « surajoutés » peuvent être déduits des 3D initiaux : par exemple, la distance moyenne à la gare est une conséquence de la répartition des densités (premier D) et du maillage des rues (troisième D).

207/ Laterrasse, 2019, p.135.

208/ Selon Dominique Mignot, l’isolation du facteur « forme urbaine » des autres déterminants de la mobilité compte parmi les principaux écueils auxquels se heurte une compréhension fine des interactions entre forme urbaine et caractéristiques de la mobilité (Mignot *et al.* 2004).

209/ Ce qui ne veut pas forcément dire *suite à*, puisque la mise en évidence de liens de cause à effet est rarement possible : selon Marc Wiel, il est plus approprié de parler de co-production de phénomènes que de causalité simple.

210/ Dans cet ordre d’idée — et dans un domaine étroitement lié à la consommation d’énergie, celui de l’atténuation du changement climatique — les formes d’organisation territoriales à différentes échelles (depuis l’échelle locale jusqu’à l’échelle régionale) auraient, selon beaucoup d’auteurs, moins un rôle à jouer pour réduire les émissions de gaz à effet de serre qu’une « contribution à apporter pour rendre socialement acceptable la transition énergétique » (Desjardins, 2011).

4.2.5.- L'agencement comme apport au potentiel BELT de la ville

Ce qui est vrai pour la question des mobilités l'est tout autant pour la question — plus vaste, car elle englobe la précédente — du rôle de l'agencement spatio-fonctionnel dans la capacité des habitants d'une ville à satisfaire en mode BELT leurs besoins vitaux.

Le problème est d'autant plus délicat qu'en l'absence d'une situation de pénurie grave interdisant un « recours aux machines »²¹¹ qui surdétermine largement les modes de vie, ceux-ci relèvent de choix individuels non contraints : dans un contexte (qui est encore celui d'aujourd'hui) où une telle contrainte n'est pas effective, il est vrai que même dans le cadre d'un agencement *a priori* très favorable à des pratiques relevant d'un mode de vie BELT (un écoquartier situé dans une ville rigoureusement conçue selon des principes TOD), et aussi « incitatif » que puisse être un tel cadre, tout habitant peut, si tel est son choix, pratiquer un mode de vie « peu sobre », par exemple utiliser sa voiture pour acheter son pain ou pour se rendre au travail, en dépit de la proximité de la boulangerie ou de la station d'un transport collectif performant.

Mais il est vrai aussi *a contrario* qu'un mode de vie BELT — tout au moins sous l'angle de certains de ses aspects — est rendu impossible par un agencement inadapté : impossible de ne pas utiliser l'ascenseur pour les occupants d'une tour d'habitation ; impossible de ne pas utiliser la voiture pour les habitants d'une commune dénuée de tout service et de toute infrastructure de transport alternative ; impossible pour les habitants d'une ville de se nourrir sans recourir à une importation massive et lointaine en l'absence d'une production agricole de proximité ;...

Le simple constat qu'un certain agencement conduise à de telles « impossibilités » est de nature à alimenter la conjecture qu'une autre manière d'agencer « rende possible » des modes de vie BELT. En particulier, à un moment où le risque de pénurie (notamment) énergétique généralisée est prégnant, et face à l'impossibilité de travailler sur l'observation de situations qui n'existent pas (encore ?), nous proposons un axe de réflexion complémentaire aux travaux traitant de la forme urbaine au service de la sobriété énergétique précédemment évoqués : l'exploration d'un potentiel (par définition non observable) à la place d'un effet (observable). La posture adoptée n'est donc pas celle de l'observation — qui caractérise le plus souvent la recherche académique —, mais celle de l'action : en développant un argumentaire autour de la conjecture du rôle joué par l'agencement d'une ville en tant que cadre susceptible de permettre, voire « favoriser », l'émergence de pratiques BELT liées à la satisfaction des besoins vitaux des habitants, nous proposons d'alimenter la réflexion sur le champ des possibles en explorant une piste d'action certes radicale car poussant très loin la notion de low-tech dans les modes de vie, mais ouvrant des perspectives d'orientation du devenir de la ville face à un avenir énergétiquement contraint.

L'approche retenue consiste donc non pas à essayer de mettre en évidence l'effet observé d'un agencement sur l'adoption d'un mode de vie BELT, mais le **potentiel** d'un agencement à rendre possible, en cas de pénurie, l'adoption rapide — donc sans que des transformations structurelles radicales soient nécessaires — d'un tel mode de vie.

La démarche proposée consiste à répondre successivement (1) à la question de **l'agencement fonctionnel** (« agencer quoi ? »), une question relevant à la fois de la nature (fonctions à mobiliser) et de la caractérisation des catégories d'adresses indispensables à la satisfaction des besoins vitaux selon une grille de lecture BELT, et (2) à la question de **l'agencement spatio-fonctionnel** (« agencer comment ? ») de ces adresses selon cette même grille de lecture.

211/ Faute de « nourriture pour machines » ou de matières permettant de fabriquer et d'entretenir ces machines.

L'objectif visé n'est pas de produire une « solution type », mais de concevoir un principe d'agencement (illustré par des modalités de déclinaisons possibles) et d'imaginer (« simuler ») son fonctionnement dans un contexte hypothétique particulièrement défavorable de pénurie majeure d'énergie et de matières.

Ces deux questions font l'objet des deux sections suivantes.

4.3.- Agencer quoi ?

Selon une approche au prisme de l'énergie, la satisfaction des besoins de l'être humain se résume, nous l'avons vu, à une régulation d'échanges avec son environnement, soit de manière directe (par exemple, respirer ou s'exposer au rayonnement solaire), soit à l'aide d'un artefact. Le recours à ce dernier, issu de ressources primaires transformées, rend possible (ou facilite, suivant le cas) cette régulation d'échanges basiques : confectionner un vêtement ou construire un abri, c'est créer une membrane dont la perméabilité (aux éléments, aux facteurs hostiles, aux semblables,...) peut être régulée ; confectionner un outil ou une arme, c'est augmenter la capacité à prélever sur l'environnement (couper du bois, chasser, récolter,...) donc la capacité d'échanger avec ce dernier ; créer un accès par suppression ou atténuation d'une barrière (physique, énergétique,...), c'est, là aussi, augmenter les capacités d'échanges en facilitant l'accès aux ressources (matérielles, humaines,...) plus lointaines ; etc. Façonner de tels artefacts (industrie), c'est transformer des ressources primaires (en raison de l'équivalence « transformation – énergie »), donc augmenter les besoins de ressources primaires, et ainsi de suite. L'échange avec l'environnement concerne aussi bien les ressources primaires (de plus en plus lointaines, de plus en plus rares,...) que des artefacts (ceux qu'un individu convoite mais qu'il ne sait ou ne peut fabriquer alors que d'autres savent ou peuvent) ; dit autrement, « l'environnement » inclut l'humain, et la gestion des échanges concerne aussi bien la matière et l'énergie (commerce) que l'information (transmission de savoir, mimétisme, compétition, quête du spirituel, du beau, etc) ; l'intensification de tous ces échanges favorise en retour la transformation (par exemple, échanger des biens implique avoir de quoi échanger, donc prélever et transformer davantage). La spirale ascendante des échanges (accentuation du prélèvement des ressources primaires, accélération des relations entre humains, etc) est sans fin.

Le but de l'agencement BELT est d'offrir un cadre facilitant la réduction de l'intensité et de la vitesse de certains de ces échanges, par exemple en ramenant à l'échelle humaine (marche) les distances caractérisant ceux d'entre eux qui correspondent à la satisfaction des besoins vitaux, tels que définis précédemment.

De ce qui précède, retenons deux points importants relatifs à cette satisfaction des besoins :

(1) La nécessité d'un prélèvement continu de ressources, ce qui — selon une logique BELT — présuppose l'existence de stocks qui se renouvellent à un rythme compatible avec celui des prélèvements, et sans que la manière dont s'opèrent ces derniers n'exige le recours à des énergies fossiles.

(2) La nécessité du recours à l'artefact²¹², terme désignant à l'origine « un phénomène créé de toutes pièces par les conditions expérimentales », mais également un produit ayant subi une transformation (même minime) par l'homme, ce qui le distingue d'un produit résultant d'un phénomène naturel²¹³. Cette dualité « artificiel / naturel », bien que sujette à controverses (nous

212/ Du latin *factum* (fait ou effet) et *ars* (activité qui tend à la création).

213/ Dit autrement, il s'agit d'un objet fabriqué au sens large, incluant ustensiles, infrastructures, bâtiments, etc, mais excluant « les personnes, les organismes (végétaux et animaux), les particuliers naturels non vivants (les

reviendrons sur ce point), présente l'avantage d'opérer une distinction utile dans notre approche par l'énergie : dès lors qu'il est fabriqué (donc issu d'une *transformation*) par l'homme, l'artefact suppose la mobilisation d'énergie et de matière.

Nous avons vu à la section précédente que la satisfaction de certains besoins était conditionnée par l'accès à des adresses, c'est-à-dire des lieux accueillant des activités qui assurent différentes fonctions. Parmi ces dernières, la fonction « production de ressources » — condition *sine qua non* des stocks de ressources renouvelables évoqués plus haut — est à ce point fondamentale pour la satisfaction des besoins vitaux qu'elle occupe une place à part. Ce point suggère d'opérer, parmi la multiplicité des fonctions assurées par les différentes adresses, une distinction de premier ordre entre « fonction productive » et « fonction non productive ».

Par ailleurs, s'il est vrai qu'*a priori*, un lieu peut accueillir temporairement ou durablement une ou plusieurs activités et une activité peut temporairement ou durablement être affectée à un ou plusieurs lieux, le support physique ou **substrat** du lieu est déterminant pour que la fonction qui lui est affectée puisse être assurée (par exemple, la fonction transport *via* un mode donné requiert un substrat *ad hoc*). Dit autrement, une adresse n'est pleinement fonctionnelle, donc pertinente, que si son substrat est adapté aux activités qu'elle accueille, donc à la fonction qu'elle assure.

A défaut de chercher à établir une correspondance univoque et détaillée entre *un* substrat et *une* fonction (démarche qui ne serait guère utile ici), nous proposons de raisonner en termes de *catégories d'adresses* par la mise en correspondance mutuelle de deux classifications simples distinguant des « types de substrats » et des « types de fonctions ».

Considérée au prisme de l'énergie, la distinction « artificiel/naturel » évoquée plus haut semble pertinente pour caractériser au premier ordre un substrat : en effet, selon que ce dernier relève — ou non — de la catégorie des artefacts, sa formation nécessite — ou non — un apport d'énergie par l'homme. Reste à justifier en quoi la typologie (également binaire) des fonctions (non productive *versus* productive) serait complémentaire de cette typologie des substrats dans la formalisation de « catégories d'adresses » qui soient des composantes pertinentes d'une ville BELT.

Tel est l'objet de cette section : proposer deux catégories d'adresses — **adresses naturelles** et **adresses artificielles** —, interroger leur pertinence dans le cadre d'une démarche qui vise à explorer le potentiel de leur agencement selon une logique de satisfaction des besoins vitaux en mode BELT, et préciser certaines de leurs caractéristiques nécessaires selon cette même logique.

4.3.1.- Adresses naturelles : sols vivants producteurs

Pour cerner la notion d'adresse naturelle en tant que catégorie d'éléments « à agencer » (entre eux, ainsi qu'avec ceux relevant de la catégorie des adresses artificielles), faisons un rapide détour par la biosphère. Sans entrer dans le détail de sa genèse (Deléage, 1991) ni des débats qu'elle soulève²¹⁴, la biosphère serait, pour les tenants de la géophysologie (cf. l'hypothèse Gaïa

pierres, les fleuves, les glaciers) » (Ferret, 2011).

214/ Par exemple, certains pensent que le terme serait entouré d'un « flou sémantique et conceptuel », qui se retrouve dans les débats actuels sur le « développement durable » ou la « biodiversité » ; selon eux, l'utilisation du terme *biosphère* issu du vocabulaire des géochimistes serait une conséquence de l'organisation très spécialisée de la science actuelle ; pour cette raison, ils estiment préférable d'utiliser le terme d'écosphère. (Wikipédia, *Biosphère*)

de James Lovelock²¹⁵) un système écologique global, auto-entretenu (« autocatalytique »), qui intègre « *tous les êtres vivants et les relations qu'ils tissent entre eux et avec les compartiments que sont la lithosphère (les roches), l'hydrosphère (l'eau), et l'atmosphère (air), dans un métabolisme qui transforme sans cesse la surface de la Terre en recyclant ou stockant les éléments et en créant de la complexité et néguentropie là où sans la vie, il n'y aurait que de l'entropie* »²¹⁶ (c'est nous qui soulignons). Le fonctionnement de la biosphère est la résultante du fonctionnement de tous les êtres vivants qui la composent. Il se manifeste « *par des transferts continuels de matière et d'énergie entre le milieu physico-chimique ambiant et les organismes d'une part, entre les organismes d'autre part. Ces transferts correspondent à quelques grands mécanismes qui caractérisent divers groupes fonctionnels entre lesquels se répartissent les êtres vivants.* » Différents apports énergétiques rendent ce fonctionnement possible, principalement **l'énergie de rayonnement venue du Soleil**, grâce à laquelle le dioxyde de carbone (CO₂) se combine avec l'eau (H₂O), donnant naissance à des « *précurseurs organiques à partir desquels s'élaborent, avec l'apport de divers sels minéraux (et notamment de nitrates et de phosphates), toutes les molécules complexes qui constituent la matière vivante.* » (Duvigneaud *et al.*, 2021).

On donne le nom de *producteurs* à l'ensemble des végétaux chlorophylliens qui assurent cette « matérialisation » de l'énergie du rayonnement solaire en l'énergie chimique de substances organiques ; d'une certaine manière, ce sont des « **transformateurs à énergie solaire** » de composés non organiques (en provenance principalement de l'air et de l'eau) **en matière organique**. A côté des producteurs, on trouve les autres êtres vivants (animaux, végétaux sans chlorophylle, bactéries), désignés par le terme générique de *consommateurs*, puisqu'ils ingèrent à leur profit et utilisent à la faveur des réactions couplées de leur métabolisme ces matières organiques ; il s'agit non seulement d'herbivores (consommateurs de végétaux) et de carnivores (consommateurs d'autres animaux), mais également des « décomposeurs », terme souvent réservé aux micro-organismes dont le rôle, bien que quantitativement prédominant dans le fonctionnement de la biosphère, ne diffère pas fondamentalement de celui des autres consommateurs. Dans leur ensemble, herbivores, carnivores et décomposeurs peuvent également être considérés comme des transformateurs, mais relevant d'une autre catégorie que les producteurs : ce sont des **convertisseurs de la matière organique** produite par ces derniers. Notons qu'en plus des apports énergétiques, le fonctionnement de la biosphère mobilise divers *cycles biogéochimiques* (Bolin & Cook, 1983) — cycle de l'eau, cycle du carbone, cycle du phosphore, etc —, c'est-à-dire des processus de transport et de transformation cyclique de composés chimiques²¹⁷ entre différents « réservoirs » (lithosphère, atmosphère, hydrosphère).

C'est ce même schéma fonctionnel (dont nous donnons ici un aperçu très succinct) que l'on retrouve dans tous les écosystèmes ; et « *c'est à leur échelle seule que peut être conduite l'étude du fonctionnement de la biosphère. De fait, à l'hétérogénéité de structure que traduit l'existence de biomes différents à la surface du globe répond évidemment une diversité du fonctionnement et en particulier de la production végétale.* »²¹⁸ (c'est nous qui soulignons).

215/ Lovelock, 1999.

216/ Wikipédia, *Biosphère*.

217/ Chacun de ces cycles — cycle de l'azote, cycle du carbone, cycle de l'eau, cycle de l'hydrogène, cycle de l'oxygène, cycle du phosphore, cycle du sélénium, cycle du soufre, cycle des métaux, ... pour ne citer que les plus importants — induit souvent des passages de l'état organique à l'état minéral au sein de la biosphère. L'ensemble des cycles en interaction confère à cette dernière une capacité de régulation (homéostasie), qui est à la base de la pérennité des écosystèmes (du moins en dehors des interventions humaines et certains phénomènes géoclimatiques exceptionnels). (Wikipédia, *Cycle biogéochimique*).

218/ Duvigneaud *et al.*, 2021..

Dans la mesure où elle renvoie directement à la possibilité de constituer des stocks de ressources exploitables par les humains, cette notion de production végétale est importante pour la suite de notre propos. On appelle production primaire²¹⁹ la vitesse à laquelle se synthétise (principalement par photosynthèse, à partir de matière minérale et d'un apport d'énergie) une quantité donnée de matière organique ; il s'agit donc d'un *flux* exprimé en masse de carbone assimilé par unité de temps (Frontier *et al.*, 2008). Les écologues distinguent la production primaire brute (PPB) et production primaire nette (PPN). La première est l'énergie totale assimilée par les producteurs primaires (plantes, algues), alors que la seconde est la quantité d'énergie accumulée dans la biomasse de la plante (croissance et reproduction) : il s'agit donc de l'énergie accumulée par la plante moins l'énergie utilisée par la respiration cellulaire de cette dernière. La PPN peut être appréhendée à différentes échelles (échelle d'une plante, d'un écosystème, voire de la planète entière) et permet de déterminer la quantité d'énergie disponible pour les autres organismes (tous les maillons de la chaîne alimentaire) ; c'est donc elle qui détermine, en particulier, la vitesse à laquelle peut se constituer un stock de biomasse (susceptible d'être utilisé par l'humain). A cet égard, précisons que la *productivité* primaire d'un milieu (un sol, une zone humide, une forêt, un milieu marin,...) est le rapport entre sa production primaire et sa quantité de biomasse, et que la *biodiversité* est un facteur important non seulement de cette productivité, mais également de la qualité des « services écologiques » rendus par ce milieu (Constanza *et al.*, 2006).

Les forêts sont les milieux terrestres dont la productivité primaire nette est, de loin, la plus élevée, généralement comprise entre 1000 g et 3000 g (cas des forêts équatoriales et tropicales) de matière sèche par mètre carré et par an, dont 40 à 50% de carbone (Ramade, 2009) : outre l'importance de leur productivité, les biomes forestiers jouent donc le rôle de *puits de carbone*²²⁰, ce qui présente un très grand intérêt pour compenser les émissions anthropiques de CO₂. Ce point doit néanmoins être nuancé : car s'il est vrai que les arbres jeunes ou adultes captent de grandes quantités de carbone pour leur croissance, les arbres plus âgés ont tendance à mourir et à libérer du CO₂ en se décomposant (Ramade, 2009). Dit autrement, dans les forêts matures, le bilan photosynthétique est nul (Peycru *et al.* (dir.), 2018). De nombreux écosystèmes forestiers (aussi bien en zone tempérée qu'en zone tropicale et équatoriale, à commencer par le fameux « poumon de la Terre » qu'est, selon une idée tenace, la forêt amazonienne) sont dans ce cas, de sorte que leur rôle de puits de carbone relèverait du mythe, comme semblent le confirmer certaines études récentes (Fan *et al.*, 2019)²²¹.

Au final, la biosphère peut donc être assimilée, en première approximation, à un double transformateur, alimenté, selon le cas, par une ou plusieurs sources d'énergie (la source principale étant l'énergie du rayonnement solaire, à laquelle s'ajoutent l'énergie issue de l'oxydation de

219/ La production primaire est réalisée par les « producteurs primaires » (autotrophes), principalement les plantes et les algues, alors que la production (toujours de matière vivante) secondaire est assurée par l'ensemble des consommateurs (herbivores, carnivores, décomposeurs). (Wikipédia, *Production primaire*).

220/ Un puits de carbone ou puits CO₂ est un réservoir qui absorbe du carbone depuis le cycle du carbone. Ce carbone est alors séquestré dans ce réservoir où son temps de résidence est plus long que celui dans l'atmosphère.

221/ En revanche, les biomes forestiers (et les arbres en général) restent une option intéressante non seulement en raison de leur productivité primaire élevée, mais également en tant que puits de carbone provisoire. A cet égard, l'idée de planter mille milliards d'arbres — donc de nouvelles « jeunes forêts », comme le suggère une récente étude suisse (Bastin *et al.*, 2019) qui, d'ailleurs, fait l'objet de controverses — semble intéressante à l'horizon de quelques décennies pour faire face à l'urgence de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère et « donner plus de temps » pour la transition écologique (changements de comportements, modification des agencements, nouvelles technologies).

molécules inorganiques et l'énergie géothermique, notamment) : transformateur de certains composés chimiques en matière vivante, d'une part ; transformateur de cette matière vivante en d'autres matières — qui peuvent s'accumuler sous forme de stocks (par exemple l'humus ou le bois) —, d'autre part. La nature de ces stocks peut évoluer de différentes manières ; par exemple, au bout d'un temps suffisamment long et si certaines conditions physicochimiques sont réunies, ils peuvent devenir des « combustibles fossiles », qui ne sont autre chose que de l'énergie solaire captée par les végétaux, puis transformée pendant des dizaines ou centaines de millions d'années²²². Les combustibles fossiles sont donc renouvelables, mais pas aux échelles de temps compatibles avec l'histoire de l'humanité.

Changeons d'échelle spatiale et temporelle et prenons une parcelle de sol (un fragment de cette biosphère). Un tel « capteur solaire naturel » — alimenté par une source d'énergie de rayonnement disponible sur toute la surface de la Terre (bien qu'inégalement répartie, dans l'espace comme dans le temps) et caractérisé par une production primaire nette (PPN) telle que définie plus haut — est potentiellement capable d'accumuler de manière continue (« renouvelable ») des réserves. Mais sans intervention de l'humain, c'est-à-dire « laissée à elle-même », cette adresse naturelle relève de l'univers du chasseur-cueilleur : sa production n'est pas « anthropocentrée ». Afin d'assurer l'adéquation entre production et besoins, l'action humaine — donc une transformation requérant un apport d'énergie — est indispensable. Cette action peut prendre différentes formes.

Elle peut reposer sur une mobilisation massive de ressources non renouvelables, énergies fossiles et matières : production, entretien et destruction en fin de vie de machines agricoles ; extraction, transformation et transport, parfois sur des milliers de kilomètres, de leur carburant, mais également d'engrais (notamment ceux à base de phosphore minéral) ; production de divers intrants par l'industrie chimique (insecticides, fongicides, herbicides, parasitocides) ; etc. En référence à certaines de ses caractéristiques, notamment son intégration verticale et une masse salariale plus semblables aux entreprises du secteur secondaire qu'aux exploitations agricoles à structure familiale, une telle activité est souvent qualifiée d'agriculture industrielle (à ne pas confondre avec l'agriculture intensive). Les contraintes liées à la mécanisation et à la standardisation de cette agriculture impose la pratique de la monoculture et l'élimination de tout obstacle (les haies, les bosquets, les zones humides, ...) à la circulation optimale des machines. Pour le sol, la combinaison de cette uniformisation du milieu et de l'usage des pesticides et engrais chimiques conduit à un appauvrissement radical de sa biodiversité (altération, voire disparition, de la « vie du sol » — microfaune, bactéries, champignons mycorhiziens, etc — essentielle pour le développement et la productivité des plantes), une modification profonde des cycles de son fonctionnement naturel, ainsi que son érosion par le vent et les pluies (absence de protection par un couvert végétal, altération de ses capacités d'absorption de l'eau)²²³. A terme, la production

222/ Notons que la controverse sur l'origine du pétrole n'est pas close. Selon la théorie du pétrole abiotique, celui-ci serait formé à partir de dépôts profonds du carbone, datant peut-être de la formation de la Terre. La présence de méthane sur Titan, une des lunes de Saturne, est présentée comme un élément tendant à démontrer la possibilité de la formation d'hydrocarbures en l'absence de mécanismes biologiques. Les partisans de cette hypothèse suggèrent que de larges quantités de pétrole restent à découvrir et que celui-ci migrerait depuis le manteau terrestre par le biais de fissures. Les tenants de cette théorie sont néanmoins très minoritaires dans la communauté scientifique, où la théorie de l'origine biotique des hydrocarbures reste largement dominante (Glasby, 2006).

223/ Sébastien Barot, chercheur en Ecologie, écrit à ce sujet : « *le fonctionnement d'un sol est perturbé dès que l'on porte atteinte à sa biodiversité ou que l'on modifie ses propriétés physico-chimiques. Cette situation pose un problème crucial dans le domaine de l'agriculture. Les pesticides et le labour ont en effet tendance à impacter négativement les organismes du sol : une partie importante de la production végétale (récolte) est exportée, si bien que la quantité de matière organique contenue dans la terre et riche en nutriments minéraux a tendance à*

sur un tel sol devient totalement dépendante des intrants (engrais chimiques, produits phytosanitaires de synthèse) : il n'est plus qu'un simple support, au point qu'il devient hasardeux de le qualifier encore « d'adresse naturelle ». Certains auteurs vont jusqu'à utiliser l'expression « sol mort » (Bourguignon, 2008).

D'une certaine manière, un tel sol ne relève plus de la catégorie des « substrats naturels » : il a été artificialisé *via* un apport continu (souvent sur plusieurs décennies) d'énergie par l'homme augmenté de ses exosquelettes.

Dans le cadre d'une approche où la contrainte BELT est première, c'est là un argument en faveur de la correspondance entre la typologie des fonctions (productive *vs* non productive) et celle des substrats (naturel *vs* artificiel).

Le second argument est que l'action humaine sur les sols pour adapter la production à ses besoins peut suivre d'autres modalités, compatibles à la fois avec les principes BELT et des rendements²²⁴ par unité de surface comparables, voire supérieurs, à ceux de l'agriculture industrielle. Les variantes de ces pratiques, de même que les termes utilisés, sont nombreux : agriculture biologique, agriculture durable (ou autonome, ou économe), agriculture paysanne, agroécologie, agroforesterie, agriculture intégrée, ... ; mais toutes se réfèrent explicitement ou implicitement à la « **permaculture** » (de l'anglais « *permanent agriculture* »), un terme datant de 1970 et né en Australie sous la plume de Bill Mollison et David Holmgren à l'occasion de leur théorisation d'un concept agricole inspiré par le modèle d'agriculture naturelle de Masanobu Fukuoka²²⁵. Selon l'article en ligne²²⁶ sur le site de la *Fondation Nicolas Hulot pour la Nature et l'Homme* (où sont également définis les termes précédemment cités), la permaculture, plus qu'un modèle agricole, « [...] se présente comme une éthique, une philosophie et une science. Elle regroupe un ensemble de méthodes culturelles qui permettent de maintenir la fertilité naturelle du sol, sans recours aux produits phytosanitaires. Dans une exploitation de permaculture on retrouve une grande diversité de productions, l'espace est optimisé et le recours à la mécanisation fortement réduit. Par exemple, associer les cultures de tomates, oignons, choux pommés et carottes, permet une occupation optimale du sol et de repousser les nuisibles susceptibles de s'attaquer à l'une des espèces. La permaculture s'est donc orientée vers la recherche de la mise en place d'agroécosystèmes productifs s'inspirant du fonctionnement des écosystèmes naturels. »

Il convient d'attirer l'attention sur le fait que si cette définition souligne bien, dans sa première phrase, que la permaculture ne se résume pas uniquement à une technique agricole, c'est

diminuer ; soulignons également que le labour accélère la décomposition de cette matière en mélangeant le sol de surface (plus riche en matière organique dans un écosystème naturel) et le sol de profondeur. De plus, dans les systèmes de culture annuelle labourée, il n'y a plus de litière de feuilles à la surface du sol, ce qui défavorise les organismes présents. Les engins agricoles peuvent d'autre part tasser les sols cultivés, rendant plus difficiles l'enracinement des plantes et l'infiltration de l'eau de pluie. Enfin, ces sols sont aussi fortement soumis à l'érosion du fait de la mauvaise couverture du sol par les plantes cultivées. On pense aujourd'hui que l'agriculture intensive tend à utiliser les sols de manière minière, en détériorant petit à petit leur fertilité. Une réalité qui a récemment conduit le ministre de l'environnement britannique à annoncer que les sols anglais ne pourraient plus soutenir la production agricole dans une quarantaine d'années. » (Barot, 2017).

224/ A ne pas confondre avec la productivité, qui rapporte le produit obtenu au temps de travail consacré à la production ; le rendement le rapporte à la surface de sol nécessaire.

225/ chercheur japonais en microbiologie qui, dans les années 1930, démissionne de son poste pour se retirer dans la ferme familiale où il passe le reste de sa vie à expérimenter les techniques « naturelles » qui l'amèneront à développer une méthode originale d'agriculture sauvage et à publier, en 1975, son fameux ouvrage *La révolution d'un seul brin de paille*, faisant de lui l'un des fondateurs mondialement reconnus de la permaculture.

226/ <http://www.fondation-nature-homme.org/magazine/agriculture-bio-permaculture-agroecologie-quelles-differences>

pourtant ce seul aspect qui est ensuite mis en exergue, masquant l'idée que les principes de la permaculture se déclinent dans tous les domaines, en synergie avec une planification permaculturelle : outils et technologie (énergies renouvelables, outils manuels, modes actifs,...), culture et éducation (réutilisation, recyclage,...), santé (soins préventifs, disciplines du corps et de l'esprit,...), finance et économie (systèmes d'échanges locaux, commerce équitable, banques éthiques,...), patrimoine et communauté (co-habitat, coopératives, résolution des conflits,...), environnement habité (récupération d'eau, matériaux de construction naturels, solaire passif) et, bien entendu, entretien des terres et de la nature, qui ne représente donc — répétons-le — qu'un domaine parmi d'autres « gravitant » autour d'une éthique et de principes qui en découlent. Sur le volet de l'entretien des terres (« prendre soin des terres » indissociable du « prendre soin des hommes »), l'approche permacole²²⁷, qui conduit à une agriculture riche et diversifiée nécessitant de nombreux savoirs (alternance entre cultures et élevages, écosystèmes annexes, systèmes de récupération et de transformation, techniques spécifiques,...), aide à planifier et à faire fonctionner ce système complexe. Définir la permaculture par des techniques (souvent médiatisées : culture sous *mulch*, culture sur butte, spirales aromatiques, bombes de graines, etc...), qui ne sont qu'une expression (une des facettes visibles) de ses principes fondateurs, est excessivement réducteur. Car la permaculture est avant tout un outil de conception et une philosophie reposant sur l'étude des écosystèmes naturels²²⁸ (des éléments qui les composent et de leurs interrelations) qu'elle s'attache à gérer au mieux (notamment les éléments entrants et sortants) pour préserver leur richesse, leur bonne santé et leur efficacité. Cette organisation efficace des systèmes passe par leur *design* : à la fois processus et résultat en évolution, le *design* en permaculture peut être assimilé à une étude globale et en perpétuelle réévaluation de l'histoire d'un lieu, de son présent et de son avenir, qui fait intervenir une multitude d'aspects (interdépendances, voisinage, souhaits, moyens,...). Une étude permacole mobilise diverses notions, comme par exemple le « zonage » (nous reviendrons plus en détail sur ce point — et plus largement sur le *design* — au moment d'aborder la question d'agencements à la section suivante).

Si les principes de la permaculture permettent de concevoir des systèmes agricoles, ils peuvent s'appliquer à des systèmes humains au sens large : on peut ainsi parler de permaculture humaine (vision des relations suivant les principes de la permaculture), par exemple à l'échelle d'un village ou d'une ville. Le concept des *villes en transition*²²⁹ a d'ailleurs été créé par un

227/ C'est-à-dire qui a rapport à la permaculture dans sa dimension agricole.

228/ En particulier la forêt.

229/ Le réseau des **villes en transition** (*Transition Towns*) est un mouvement apolitique né en 2006 rassemblant des groupes qui animent, chacun sur le territoire de sa commune, une « initiative de transition », notion qui peut être définie comme un processus impliquant la communauté et s'attachant à augmenter la résilience des villes face aux défis énergétiques et climatiques.

L'origine de ce mouvement est un travail d'étudiants du cours « soutenabilité appliquée » de l'université de Kinsale (Irlande) sous la direction de Rob Hopkins, docteur en Géographie humaine enseignant la permaculture. Réalisé en 2005, ce travail est mis en application l'année suivante dans la ville de Totnes (Royaume-Uni), qui devient ainsi la première « ville en transition » officielle (Hopkins, 2008). En 2007, Rob Hopkins co-fonde le *Transition Network* conçu pour soutenir les initiatives de transition qui commencent alors à émerger partout dans le monde. Le succès fulgurant du mouvement (il existe aujourd'hui presque 1500 communautés porteuses d'initiatives de transition dans plus de cinquante pays) conduit à renommer les *Transition Towns* en *Transition Initiatives*, expression plus englobante permettant de faire face à la diversité des situations.

L'influence de la **permaculture** est omniprésente dans le concept des villes en transition (Hopkins, 2008) : celles-ci reposent en effet sur l'idée de la résilience (capacité à encaisser les crises économiques et/ou écologiques) qui sont une caractéristique fondamentale des écosystèmes naturels dont elles s'inspirent. Ces derniers sont en effet stables, diversifiés et autonomes (cycles fermés), ils consomment un minimum d'énergie et ne produisent pas de « pollution », puisque grâce à la forte interconnexion de leurs éléments, les déchets de certains systèmes sont une ressource pour d'autres. Le modèle semble donc particulièrement adapté aux systèmes humains sous forte

enseignant en permaculture.

Retenons de ce très rapide aperçu que la permaculture n'est pas *stricto sensu* une technique agricole, qu'elle concentre son action sur la conception de systèmes écologiques, intensifs et résilients, et que l'agencement spatio-fonctionnel est au cœur de la réflexion permacole, qui n'est pas sans rappeler celle qui est à l'origine des principes de la démarche low-tech. C'est (aussi) à ce titre que la mobilisation des idées issues de la permaculture nous semble incontournable dans ce travail.

En raison du succès que connaît la permaculture auprès d'un public de plus en plus vaste, le terme est parfois utilisé de manière inappropriée ; il n'en reste pas moins que parmi les expériences « sur le terrain » qui en appliquent les principes (depuis des parcelles urbaines de quelques dizaines de mètres carrés jusqu'aux exploitations agricoles de plusieurs dizaines d'hectares), certaines surprennent par la quantité et la qualité de leur production, et leurs propriétaires deviennent parfois auteurs d'ouvrages. Pour illustration, évoquons quelques cas emblématiques, sur différents continents.

Outre les expériences déjà citées de Masanobu Fukuoka au Japon et de Bill Mollison en Australie, la transformation — initiée par l'action permacole de l'agriculteur autrichien Sepp Holzer²³⁰ — de quarante-cinq hectares de terre inculte et fortement pentue (entre 1100 et 1500 m d'altitude) d'une région surnommée « la petite Sibérie autrichienne »²³¹ en une sorte de « jardin d'Eden » (où poussent même des citrons) est riche d'enseignements. D'une part, sur le potentiel d'une action humaine raisonnée (une connaissance pratique, aussi bien générale que spécifique au lieu, de certains aspects du fonctionnement de la biosphère est un prérequis incontournable) ne recourant ni aux machines (mis à part les travaux de terrassement initiaux), ni aux produits de synthèse, pour transformer en vingt ans un « désert de sapin » en sol vivant accueillant une variété d'écosystèmes d'une richesse impressionnante. D'autre part, sur les possibilités de production agricole dans des environnements *a priori* hostiles : en dépit des conditions climatiques particulièrement défavorables (nombre important de jours de gel par an), le « laboratoire biologique à ciel ouvert » de Sepp Holzer assure une abondante production non seulement céréalière, maraîchère et horticole, mais également d'élevage (poissons, bétail, volailles), les animaux — évoluant en semi liberté sagement organisée — étant des auxiliaires précieux de ce système productif intégré (Holzer, 2011).

Ces deux enseignements se retrouvent sous d'autres climats. A l'issue de la grande famine des années 1980, Abo Hawi, le chef du village Abrha We Atsbha situé dans une région désertique au nord de l'Éthiopie, s'inspire des principes de la permaculture pour opérer des chan-

contrainte énergétique et devant limiter leurs émissions de polluants (dont le CO₂).

Si la permaculture offre au concept de villes en transition à la fois une base philosophique, des principes généraux et des exemples de mise en œuvre de systèmes fondés sur les caractéristiques souhaitables des systèmes naturels, le fait est — comme le fait remarquer Rob Hopkins — qu'en raison, d'une part, de sa naissance dans le contexte particulier de l'Australie (où les terres sont abondantes et le climat difficile) et, d'autre part, de la difficulté à l'expliquer dans toute sa complexité et la richesse et ses implications, la tendance des permaculteurs est de prendre de la distance par rapport à la majorité de la société (qui vit dans les villes) et à s'installer à la campagne, plutôt que de concentrer leurs efforts sur la transformation de la société. Si dans les faits, la permaculture prend donc souvent la forme d'une approche solitaire, le mouvement des villes en transition relève toujours d'une logique collective, complémentaire de la précédente (Hopkins, 2008).

230/ Surnommé « l'agriculteur rebelle d'Autriche », il est également l'auteur de plusieurs ouvrages sur la permaculture.

231/ Krameterhof, dans la région de Salzburg Lungau.

gements radicaux dans les pratiques agricoles traditionnelles. Avec l'aide des 5000 habitants du village, il creuse des centaines de puits souterrains, construit des digues pour retenir l'eau de pluie, aménage des terrasses, met en œuvre de nouvelles techniques comme le compostage, la diversification et la rotation des cultures, plante près de 3 millions d'acacias. Sous l'effet combiné de ces aménagements, le désert brûlant, sablonneux et desséché d'il y a 30 ans est aujourd'hui une vallée verte arborée, au sol vivant produisant pommes, mangues, oranges, avocats, pastèques, café, chili, choux, maïs, teff, ... (la végétation de l'ensemble de l'Ethiopie est représentée) que viennent visiter les fermiers de tout le pays pour s'inspirer de cette expérience (Sury *et al.*, 2018).

Complétant ces deux exemples volontairement choisis en raison des conditions particulières qui les caractérisent (climat respectivement « trop froid » et « trop chaud et sec » pour permettre une production agricole conséquente), la *New Forest Farm* de Mark Shepard dans le Wisconsin (Etats-Unis) est une autre illustration — cette fois en climat tempéré — du fait que « *la nature peut se guérir* »²³², même si la situation initiale est un « *paysage lunaire* » (Shepard, 2016, p.19), résultat d'une longue pratique de monoculture industrielle et intensive du maïs. Sur les 42 hectares de cette expérience permacole, la transformation en sol vivant s'opère en une quinzaine d'années grâce à « l'agriculture de régénération »²³³ (le nom est explicite) fondée sur la pratique de l'agroforesterie combinant, notamment, la sylviculture (« forêt nourricière » où arbres et plantes pérennes remplacent les plantes annuelles²³⁴ qui « gaspillent l'énergie solaire ») et le sylvopastoralisme (association de la culture d'arbres ou arbustes et de la production de cheptel et de fourrage) en un écosystème agricole complet (cultures et élevage). Les mesures effectuées par Shepard depuis plusieurs années montrent que cette polyculture pérenne et variée²³⁵ « *représente un système quasi parfait du point de vue nutritionnel* » (Shepard, 2016, p.169)²³⁶, avec une production adaptée à un régime non végétalien. Selon les calculs de Shepard, 1 acre (4000 m²) de sa ferme peut produire annuellement et de manière durable (les sols ne s'épuisent pas mais deviennent plus riches d'année en année) environ 5,7 millions de Kcalories (végétales et animales) disponibles pour l'homme, et pourrait donc satisfaire les besoins alimentaires de 6 (voire 8) personnes adultes pratiquant une activité intense.

Les trois exemples témoignent du fait qu'il est possible, en travaillant avec la nature plutôt que contre elle, de (re)constituer un sol vivant dans des conditions climatiques variées (même *a priori* défavorables) et en partant d'un substrat très dégradé (assimilable à un « sol mort »). Cela ouvre des perspectives pour la reconversion en parcelles productives des friches urbaines ou des terrains anciennement bâtis ou, de manière plus générale, « artificialisés » (infrastructures routières, parkings, ...).

Les apparents « résultats probants » des expériences permacoles réussies (dont les exemples

232/ Shepard, 2016, p.27.

233/ Le fait qu'un sol vivant puisse s'enrichir d'une année sur l'autre tout en étant productif n'a rien de mystérieux : c'est juste une question de répartition du produit de l'énergie solaire entre ce qui est prélevé et ce qui est rendu au sol ; un équilibre délicat que les permaculteurs s'attachent à atteindre et à gérer.

234/ Par exemple, la culture de châtaigniers est privilégiée par rapport à celle du maïs ou du blé, la farine de châtaignes ayant une qualité nutritionnelle équivalente, voire supérieure, à celle de la farine de céréales.

235/ Outre les féculents, les fruits et les légumes, le miel et les champignons comptent parmi les nombreux produits de la *New Forest Farm*.

236/ Il est à noter que dans son ouvrage, Mark Shepard se livre à une analyse détaillée de la valeur nutritionnelle des plantes et des viandes produites sur sa ferme.

ci-dessus ne sont qu'un petit échantillon) posent néanmoins la question de l'objectivité de leur appréciation, d'autant plus que les auteurs des ouvrages qui en rendent compte en premier lieu sont partie prenante. Et force est de constater que les publications académiques portant sur de telles expériences restent encore rares, à quelques exceptions près, comme c'est le cas pour la *Ferme du Bec Hellouin*, en Haute-Normandie. Créée en 2004 sur vingt hectares de terre peu fertile par un couple de néo-paysans improvisés n'ayant aucune formation ni expérience dans ce domaine (Perrine Hervé-Gruyer est juriste, son mari, Charles, est marin), cette ferme repose sur le principe consistant à prendre la nature pour modèle et à concevoir les installations humaines comme des écosystèmes productifs et économes en ressources. Le travail intensif du sol, exclusivement à la main et sans produits de synthèse, permet d'obtenir des récoltes abondantes et de grande qualité, tout en augmentant la biodiversité, en créant de l'humus et en stockant du carbone dans les sols vivants et les arbres (Hervé-Gruyer, 2014). Le suivi de cette expérience durant l'année 2014 dans le cadre du projet scientifique *Maraîchage biologique permaculturel et performance économique* (collaboration AgroParisTech / INRA)²³⁷, ayant donné lieu à plusieurs publications et communications scientifiques²³⁸, permet de conclure qu'« *il est possible de produire de façon importante sur une petite surface maraîchère cultivée essentiellement à la main et de dégager ainsi un bénéfice suffisant pour assurer un revenu correct à une personne ayant un statut agricole.* » (Léger et al., 2016, p.38). Cependant, il est bien précisé que les 1000 m² cultivés de manière intensive ayant fait l'objet de l'étude ne doivent pas être considérés comme « se suffisant à eux mêmes » : ils sont « *en interaction permanente avec leur environnement, conçu et aménagé pour apporter les services écosystémiques nécessaires au bon fonctionnement du système. Ces interactions sont essentielles pour garantir la fertilité, grâce aux transferts de matières collectées sur la ferme ou dans son entourage immédiat [...]. Les arbres, les haies, les pâtures qui entourent la partie que nous avons étudiée constituent autant d'habitats pour des espèces diverses qui contribuent à la régulation des ravageurs des cultures. Avec les mares, la rivière, les bâtiments, ils contribuent à installer un microclimat plus favorable à la production maraîchère. Il est primordial que cet environnement existe, que ces liens soient créés, que ce soit au sein de la ferme elle-même ou en interaction avec le territoire proche. [...] Les 1000 m² cultivés sont le cœur du système, ils en sont la partie la plus soignée [...], mais ils n'en sont que le cœur.* »²³⁹

Cette nuance relative au rôle de l'environnement n'est pas anodine et est de nature à susciter la controverse, comme le fait d'ailleurs remarquer l'une des conclusions du rapport de recherche : « *L'étude conduite à et par la ferme biologique du Bec Hellouin a suscité de nombreux débats et polémiques et continuera sans doute à le faire. Sa fonction était justement de les provoquer et de les alimenter. Elle n'était certainement pas de les trancher.* » (Léger et al., 2016, p.41)²⁴⁰.

Il se pourrait donc que les rendements élevés (sans recours aux produits phytosanitaires de

237/ Léger et al., 2016.

238/ Morel et al., 2017, Morel et al., 2018, Léger, 2018.

239/ Léger et al., 2016, p. 39.

240/ Une des critiques que l'on pourrait formuler porte sur la viabilité économique de telles fermes permaculturelles. Sans nier l'immense intérêt de l'expérience, la vision idyllique présentée par une communication savamment étudiée de certains reportages ou études sur la ferme du Bec Hellouin serait ainsi à relativiser en raison de l'omission (ou, en tout cas, de l'absence de mise en exergue) d'informations pourtant essentielles pour qui voudrait se lancer à son tour dans la permaculture : la ferme est en effet aussi un centre de formation (*Archipel*, nom de la structure juridique) dont les stagiaires travaillent sur l'exploitation, et profite donc d'une main d'œuvre bon marché, voire gratuite. D'autres microfermes, non médiatisées et dépourvues de telles activités « annexes », permettent sans doute à leurs exploitants de gagner leur vie, mais très probablement en raison de la passion qui anime ces derniers et du nombre « d'heures supplémentaires non rémunérées » qu'ils sont prêts à y consacrer.

synthèse) dont peuvent se prévaloir — à juste titre — de nombreux permaculteurs soient dus, au moins en partie, au voisinage d'écosystèmes « naturels » et aux multiples interactions avec ces derniers (réseaux mycorhiziens souterrains, microfaune des sols, prédateurs de « nuisibles », matière carbonée des feuilles mortes apportées par le vent, etc). Ce point est particulièrement important dans un contexte urbain : une parcelle cultivée de 1000 m² en ville aurait-elle le même rendement que cette même parcelle au milieu d'une forêt d'un hectare ? La réponse à cette question est loin d'être consensuelle : si, de prime abord, l'impact des externalités positives que procure la proximité d'écosystèmes « naturels » apparaît comme un argument impaire, comment expliquer que Masanobu Fukuoka ait pu maintenir, jusqu'à sa mort en 2008, les hauts rendements de sa ferme, pourtant progressivement « rattrapée » par l'urbanisation galopante ? Il en est de même, par exemple, pour de nombreux micro-jardins du type de celui de Joseph Chauffrey, avec sa production annuelle de 300 kg de légumes (en plus des fruits) sur seulement 150 m² (Chauffrey, 2017) ou de la « jungle urbaine » des Fraternités Ouvrières à Mouscron (Dubrulle, 2018), deux exemples « d'îlots de verdure » de faible superficie enchâssés dans un environnement urbain dense.

La controverse n'est pas close. Elle l'est d'ailleurs d'autant moins que la connaissance du fonctionnement des sols vivants est encore lacunaire²⁴¹. Mélanges de matière organique et minérale, ces derniers contiennent une biodiversité abondante et variée de différentes tailles²⁴², au sein de laquelle les micro-organismes, notamment, occupent une place importante ; or l'étude de ces micro-organismes nécessite des méthodes de biologie moléculaire développées depuis seulement une vingtaine d'années (selon certaines sources, 1% des bactéries du sol seraient identifiées à ce jour). De plus, étudier le fonctionnement des sols reste compliqué car « *il faut à la fois prendre en compte leur fonctionnement physico-chimique (comme la circulation de l'eau ou la mise en solution de nutriments minéraux), leur biodiversité et les interactions écologiques qui en découlent (citons ces protozoaires qui mangent des bactéries et ces bactéries qui mangent de la matière organique morte). Sachant que ces interactions peuvent avoir lieu entre des organismes très différents : les vers de terre facilitent ainsi la croissance des plantes, des champignons sont en symbiose avec les plantes, des bactéries produisent des hormones végétales qui modifient la croissance des plantes, etc.* » (Barot, 2017). C'est à l'écologie des sols — une discipline en plein essor depuis le début des années 2000 — qu'il appartient d'étudier ces interactions et leurs conséquences ; mais en raison de la complexité du fonctionnement physico-chimique du sol, d'une part, des mécanismes permettant aux plantes d'interagir avec les organismes du sol, d'autre part, de nombreuses recherches sont encore nécessaires.

La multiplication des expériences permacoles dans le monde au cours des dernières années n'en est que plus précieuses pour contribuer à une meilleure connaissance des sols vivants.

Leur connaissance est d'autant plus indispensable qu'outre la production de nourriture, ceux-ci **rendent bien d'autres services**.

Par leurs facultés d'absorption et de stockage, ils facilitent la gestion des eaux de pluie : d'une part, en jouant le rôle de régulateur en cas de phénomène météorologique extrême ; d'autre part, en mettant à disposition l'eau absorbée aux racines des plantes, qui se développent mieux²⁴³.

241/ Ce dont témoigne, par exemple, l'échec de l'expérience *Biosphère II* au début des années 1990 (Dempster, 2008).

242/ la macrofaune (vers de terre, termites, fourmis, larves d'insectes...), la mésofaune (acariens, collembolés...), la microfaune (protozoaires, nématodes...) et la microflore (bactéries, virus, champignons...).

243/ Pour reprendre la formule de Bruno Barocca : « *Refaire les stocks lors des périodes d'abondance permet de passer plus facilement les périodes de rareté* » (Barocca, 2020).

C'est sur cette faculté des sols vivants que repose le programme *Sponge cities* (villes éponges), lancé en 2014 par le gouvernement chinois²⁴⁴ et comptant aujourd'hui 30 projets pilotes. Destiné à surmonter les défis aquatiques — inondations et sécheresses — auxquels sont confrontées les villes, le principe d'aménagement des *sponge cities* consiste à accompagner les cycles naturels plutôt que de lutter contre, notamment en s'inspirant du fonctionnement des marécages. Ce principe, qui a déjà fait ses preuves (par exemple, le parc de Yanweizhou à Jinhua, en Chine, a absorbé le surplus d'eau déversé par une mousson centennale, protégeant la ville d'une inondation), cumule les avantages en nettoyant les eaux, en favorisant la biodiversité et en rapprochant les citoyens de la nature, gage d'une meilleure santé mentale (Gies, 2021). D'ailleurs, à l'échelle internationale, cette approche bénéficie du soutien de l'ONU, comme en témoigne le rapport intitulé « Les solutions fondées sur la nature pour la gestion de l'eau » (UN WWDR, 2018). Le dernier rapport du GIEC met également en exergue la pertinence de ces solutions (IPCC, 2022).

Ils constituent un très grand stock de carbone par la matière organique morte qu'ils contiennent et par les espèces végétales qu'ils accueillent, ce qui peut contribuer à diminuer la teneur atmosphérique en CO₂ et ainsi atténuer le changement climatique (le dernier rapport du GIEC²⁴⁵ propose une abondante revue de littérature sur ce thème). A cet égard, le rôle des arbres est mis en exergue dans certains travaux de recherche récents. Ainsi, selon les auteurs²⁴⁶ d'un article publié en 2019 dans la revue *Science*, 1000 milliards d'arbres plantés pourraient absorber, durant leur croissance, 200 milliards de tonnes de CO₂, soit les deux-tiers des émissions d'origine humaine depuis la Révolution industrielle. L'étude dresse une liste de pays qui pourraient se répartir les 9 millions de kilomètres carrés nécessaires (les terres agricoles étant exclues des surfaces considérées comme disponibles) en précisant, d'une part, qu'il ne s'agirait pas à proprement parler de planter des arbres mais d'aider les forêts à se développer et, d'autre part, que cette option est proposée non pas comme une solution du problème des émissions, mais comme une manière de gagner le temps nécessaire pour opérer les transformations de notre société (Bastin *et al.*, 2019).

Par les différentes espèces végétales qu'ils accueillent, ils jouent un rôle très significatif dans la lutte contre le phénomène d'îlot de chaleur urbain (évapotranspiration, effet d'ombre), dans la diminution de la consommation énergétique du bâtiment, ainsi que dans l'amélioration de la qualité de l'air (Mussy *et al.*, 2014). Le dernier rapport du GIEC offre un aperçu de l'abondante littérature scientifique qui traite de cette question (IPCC, 2022). Nous précisons qu'il est question ici des végétaux sur sols vivants : la végétation artificialisée des toitures et des façades ne relève pas forcément d'une approche BELT en raison de l'intense consommation d'eau domestique nécessaire pour la garder en vie (Pesty, 2020).

La capacité à recycler des déchets humains en nourriture et à purifier l'eau constitue une autre facette des services rendus par les sols vivants, un service particulièrement bienvenu dans un contexte où à côté des pénuries annoncées bénéficiant d'un écho médiatique important (combustibles fossiles, eau, certains métaux,...), il en est une qui reste largement méconnue du public, alors même qu'elle touche directement à notre survie pure et simple : celles de l'azote et du phosphore. Composants essentiels du métabolisme humain, l'un et l'autre sont vitaux pour l'agriculture et, dans le cas de l'agriculture industrielle, dépendants de ressources fossiles

244/ Notamment suite à l'inondation catastrophique qui a touché Pékin en 2012, faisant 79 morts.

245/ IPCC, 2022.

246/ Equipe de chercheurs de l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETH), de la FAO et du Cirad.

importées²⁴⁷.

Or si, d'un côté, l'approvisionnement dans la durée en azote et en phosphore est un enjeu vital pour produire les aliments que nous consommons, de l'autre, ces deux composés sont présents dans les excréta²⁴⁸ humains. La solution du recyclage apparaît, dès lors, comme une évidence. Mais face à cette évidence, force est de constater que « le système alimentation-excrétion actuel est linéaire, gaspilleur et polluant. »²⁴⁹ Cette « linéarité » — à l'opposé de la « circularité »²⁵⁰ — est due à l'important développement de l'urbanisation tout au long du XX^e siècle, s'accompagnant de la généralisation d'un système d'assainissement reposant sur le triptyque « toilettes à chasse d'eau – tout-à-l'égout – station d'épuration » qui, par jour et par habitant (en France), produit 150 litres d'eaux usées domestiques composées d'urines et de matières fécales diluées dans environ 30 litres de chasses d'eau et mélangées aux eaux usées ménagères. Il s'ensuit un rejet d'importantes quantités de phosphore et d'azote qui apporte une contribution significative à l'eutrophisation des milieux aquatiques, mais également à la pollution de l'eau (qui devient impropre à de nombreux usages, dont sa consommation) et de l'atmosphère (protoxyde d'azote, azote ammoniacal,...). Certes, la construction de stations d'épuration permet, en partie, de résoudre ces problèmes par extraction ou destruction de certains composants des eaux usées (germes, bactéries, phosphore et azote,...) avant leur retour au milieu naturel ; mais il s'agit de solutions très énergivores, coûteuses (réactifs chimiques, équipements,...) et polluantes (rejet de protoxyde d'azote, qui est un gaz à effet de serre), sans compter que leur efficacité à protéger les milieux aquatiques n'est que partielle (Pruvost-Bouvattier *et al.*, 2020).

L'exploration des modalités pour passer de cette linéarité — qui, à l'échelle historique, constitue plutôt l'exception des seules 150 dernières années et qui, géographiquement, concerne seulement certaines régions du monde — à la circularité du système alimentation-excrétion fait l'objet d'un nombre croissant de travaux, notamment au cours des deux dernières décennies²⁵¹. Parmi les travaux récents autour de cette idée de circularité, ceux de Renaud de Looze sont particulièrement aboutis. Menées depuis 25 ans à la *Palmeraie des Alpes*²⁵² (créée en Isère en 1995) — souvent en lien ou en collaboration avec divers organismes, professionnels, équipes

247/ Les engrais azotés auxquels recourt l'agriculture industrielle sont produits à partir d'ammoniac (dont la synthèse requiert des hydrocarbures) selon un procédé coûteux en énergie (le procédé nécessite des températures et des pressions élevées, de l'ordre de 180°C et de 150 bar, respectivement) et fortement émetteur de gaz à effet de serre ; or en Île-de-France, par exemple, plus de la moitié des apports azotés nécessaires à la production de la nourriture des Franciliens provient d'engrais de synthèse (Pruvost-Bouvattier *et al.*, 2020). Le phosphore est quant à lui extrait de mines fossiles, principalement en Chine (aujourd'hui premier producteur) et au Maroc (détenteur des trois-quarts des ressources mondiales connues) ; outre l'énergie nécessaire à son transport, l'approvisionnement soulève de manière prégnante le même problème — et amène le même diagnostic — que toute ressource non renouvelable : pic de production mondiale (vraisemblablement dans un avenir proche) suivi de l'épuisement.

248/ De manière large, le terme *excreta* désigne toutes les substances rejetées hors de l'organisme, qui résultent principalement de la nutrition et du métabolisme : fèces, urines, matière sébacée, gaz carbonique, etc. Ici, seules les deux premières sont concernées.

249/ Pruvost-Bouvattier *et al.*, 2020, p. 2

250/ Dans sa thèse intitulée *Le système alimentation/excrétion des territoires urbains : régimes et transitions socio-écologiques*, Fabien Esculier définit la circularité comme le taux de retour de l'azote des excréta sur des sols agricoles (Esculier, 2018).

251/ Cette montée en puissance s'accompagne de la publications d'ouvrages de vulgarisation de bonne qualité ; l'incontournable *Un petit coin pour soulager la planète* de Christophe Elain — qui aborde de manière très documentée la question du traitement des excréta humain par une grande variété de pratiques sobres (en eau et en énergie) reposant sur diverses techniques de compostage — en est une illustration.

252/ <http://www.palmeriaiedesalpes.com/>

ou programmes de recherche (dont le programme OCAPI²⁵³ du LEESU²⁵⁴) —, les expériences en agronomie de cet ingénieur de l'École polytechnique de Bruxelles portent principalement sur la **nutrition en boucle des écosystèmes**. Dans un récent ouvrage²⁵⁵ qui reprend certains de ses résultats (dont quelques uns sont brièvement résumés ci-après car ils sont importants pour la suite de notre propos sur les agencement spatiaux), Renaud de Looze montre comment l'association de ce qu'il appelle les « trois ors » — l'or liquide (l'urine, un engrais naturel), l'or bleu (l'eau) et l'or noir (le compost, pouvant être produit à partir de fèces humaines) — permet une abondante production alimentaire, sans polluer, sans risque de résidus médicamenteux ou de pathogènes²⁵⁶, sans odeurs et sans dommages pour les sols. Selon lui, le recyclage de la biomasse produite par un mètre carré de sol vivant permet (sous nos latitudes) la production de la même quantité de biomasse l'année suivante sur ce même mètre carré, en une boucle sans fin qui intègre les besoins (nourriture et excréta) de l'être humain. De Looze résume ce résultat par l'équation « $1 + 1 = 1 + 1$ » qui signifie que 1 litre d'or liquide (urine) + 1 litre d'or noir (compost) permettent de produire 1 kg de récolte utile (nourriture) + 1 kg de résidus végétaux recyclables. A condition d'injecter dans cette équation une quantité suffisante de cet or bleu qu'est l'eau (ce qui ne pose, pour l'instant, pas de problèmes insurmontables sous nos climats), le processus fonctionne en boucle reproductible d'une année sur l'autre, la récolte utile (nourriture) et les résidus végétaux redevenant (si correctement gérés) à nouveau or liquide et or noir. En dépit de son caractère trivial et simplificateur à l'extrême (toutes les plantes n'ont pas les mêmes besoins ni la même productivité par unité de surface, toutes les parcelles ne bénéficient pas des mêmes conditions climatiques, etc), cette vision présente l'intérêt d'attirer l'attention de manière lapidaire sur le potentiel d'autonomie alimentaire d'une activité agricole reposant sur un recyclage bien maîtrisé des excréta humains.

Dans ses travaux — en plus de détailler les besoins (et donc la « capacité à recycler les excréta ») d'une grande variété de plantes potagères, les précautions à prendre, les dosages, etc... —, Renaud de Looze se livre à un exercice de quantification non seulement de la « production » annuelle d'une personne en termes « d'or noir » et « d'or liquide », mais également de la surface nécessaire à l'autonomie alimentaire dans l'hypothèse d'un régime végétarien (mais pas végétalien) équilibré²⁵⁷ et consensuel, élaboré par ses soins. Afin d'éviter toute carence (protéines, calcium, vitamines B12, etc), ce régime comporte des œufs (en plus de céréales, d'oléagineux et d'une grande variété de légumes et de fruits, pour un total de 2000 kcal par jour), mais pas de produits carnés, par souci d'économie d'espace dont l'élevage est particulièrement consommateur²⁵⁸.

253/ OCAPI (Opération de Collecte Agricole des Phytos Inutilisés) est un programme de recherche & action du laboratoire LEESU sur les systèmes alimentation/excrétion urbains et la séparation à la source des eaux usées (<https://www.leesu.fr/ocapi/>)

254/ Le LEESU (Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains) est un laboratoire commun de l'École des Ponts ParisTech et à l'Université Paris-Est Créteil (Unité de recherche 200920634U).

255/ *L'urine - de l'or liquide au jardin*, considéré comme « le premier ouvrage argumenté consacré à l'urine, ce véritable or liquide permettant de recycler et produire dans le même temps » (De Looze, 2018).

256/ Pour répondre à la question des risques de résidus médicamenteux, R. de Looze se réfère aux travaux (auxquels il a participé) des chercheurs suisses de l'institut *Eawag* de Zürich.

257/ « *Que ta nourriture soit ton médicament et ton médicament ta nourriture.* » (Hippocrate)

258/ Certes, une poule pondeuse mobilise 40 m² pour la production de sa nourriture et le recyclage de ses déjections ; mais ses œufs apportant des compléments de nutriments indispensables par rapport aux seuls végétaux, son élevage fait partie du système alimentation/excrétion proposé, d'autant plus qu'il entre en symbiose avec le verger : pour la poule, les arbres fruitiers sont un refuge (elle peut dormir dans les arbres), une protection contre les rapaces et une source de nourriture (elle consomme les fruits avariés) ; en retour, elle déparasite les sols (en

Les résultats de ces quantifications sont édifiants :

— d'un côté, 1 m² de cultures accepte annuellement, sans le moindre impact nuisible environnemental, les 1,5 litre d'urine et 0,15 kg de fèces²⁵⁹ produits quotidiennement par une personne (valeurs moyennes et arrondies), ce qui signifie que la surface nécessaire de sol vivant pour recycler les excréta annuels de cette personne est de 365 mètres carrés ;

— de l'autre, la surface de culture requise pour nourrir une personne (avec le régime alimentaire « équilibré et consensuel » proposé) est de 370 mètres carrés²⁶⁰.

Autant dire que l'équilibre entre « gisement » et « valorisation » des ors liquide et noir semble parfait (c'est de ces calculs qu'est issue la fameuse équation « 1+1 = 1+1 » évoquée plus haut²⁶¹).

Bien que menés selon un protocole expérimental rigoureux, les travaux de Renaud de Looze sont récents et nécessiteraient d'être validés par d'autres études. Néanmoins, les résultats quantitatifs proposés sont en accord, en ordre de grandeur, avec ceux avancés par d'autres auteurs (par exemple, s'il est vrai que les calculs de Mark Shepard aboutissent à une superficie par personne deux fois plus élevée, le régime alimentaire proposé par cet auteur comporte des produits carnés) ; ils ne semblent pas non plus en contradiction avec des exemples historiques avérés, comme celui des jardiniers-maraîchers parisiens du XIX^e siècle : « *En 1845, les cultures vivrières dans l'enceinte de Paris couvraient 1378 hectares, divisés en 1800 jardins – chaque jardin mesurait donc environ 7650 mètres carrés. Ils employaient 9000 personnes, soit 5 personnes en moyenne par jardin [...]. Le travail de ces 9000 jardiniers-maraîchers suffisait à alimenter la capitale en légumes.* » (Hervé-Gruyer, 2014, p. 140). Sachant que la population parisienne en 1845 atteignait le million d'habitants, une surface de 13 ou 14 m²/hab. — culti-

éliminant notamment les « vers blancs » — nom générique de diverses larves de coléoptères très nuisibles pour les arbres et arbustes fruitiers) qu'elle enrichit par ses déjections.

259/ Ces dernières devant passer par l'étape de compostage avant de pouvoir être utilisées.

260/ Selon l'auteur, cette surface peut d'ailleurs être diminuée très significativement si les 150 m² prévus pour la culture de céréales sont alloués à celle de la pomme de terre aux rendements énergétiques par mètre carré bien supérieurs (De Looze, 2018, p. 107).

Par ailleurs, il est à noter qu'à propos de la capacité de « traitement par les sols vivants », certains chercheurs avancent des valeurs nettement supérieures : ainsi, selon Jan-Olof Drangert, chercheur au département « Traitement de l'eau et environnement » de l'université de Linköping en Suède (De Looze, 2018, p. 112), il est possible de recycler les 500 litres d'urine produits annuellement par une personne sur seulement 50 m² (soit 10 litres/an.m²), sans polluer ou détruire les sols ni brûler les plantes. Cette culture très intensive, qui permet d'atteindre des récoltes annuelles de fruits et légumes de 5 à 10 kg par mètre carré, requiert une réelle expérience, une connaissance précise des besoins en nutriments des espèces et variétés cultivées, un matériel approprié (serre tunnel, voiles de forçage, ...), un timing très précis (puisque les cultures s'enchaînent tous les 3 ou 4 mois selon un programme soigneusement élaboré), une très grande rigueur, de la compétence pour calculer les apports, une capacité à être préventif et, compte tenu de la densité, une vigilance permanente pour surveiller l'arrivée des « nuisibles », des maladies et des adventices (« mauvaises herbes »). Moyennant tout cela, une culture permanente très intensive de 50 m² (à comparer au résultat de Renaud de Looze : 370 m² cultivés de manière extensive par un non spécialiste) pourrait sans doute, sous certaines conditions, suffire à nourrir une personne tout en recyclant ses déchets.

261/ Il est à noter que dans le « 1 litre d'or noir » — soit environ 0,5 kg — de cette équation, les 150 grammes de fèces quotidiennes ne représentent qu'environ un tiers de la matière nécessaire pour produire ce fameux litre ; les deux tiers restants sont des matières végétales diverses produites localement : résidus de récoltes, déchets de cuisine, broyats d'égagages, etc. Par ailleurs, bien que 80% des minéraux éliminés par l'organisme soient présents dans « l'or liquide », de surcroît sous une forme directement assimilable par les plantes, « l'or noir » n'est pas à négliger en tant que source de minéraux car en plus des 20% restants que contiennent fèces, il permet également de recycler celles des matières végétales (tous les « déchets » végétaux produits localement mais non consommés par l'homme : fanes, feuilles mortes, paille, foin, ...) qui constituent l'essentiel de sa masse et qui, de plus, contribuent à maintenir vivants les sols en favorisant un bon équilibre carbone/azote.

vée, il est vrai, de main de maître et d'une manière très intensive par une élite de véritables « orfèvres du sol » capables de produire trois à quatre récoltes par an même en hiver — suffisait pour assurer l'autosuffisance en légumes de la capitale. Cet exemple illustre les possibilités de substitution de la high-tech (agriculture industrielle) par la low-tech, moyennant une main d'œuvre plus abondante et très qualifiée (possédant savoir, savoir-faire et expérience) pour des productivités équivalentes, voire supérieures.

L'intérêt de ces travaux est de fournir un ordre de grandeur de surface nécessaire de sol vivant pour assurer, en théorie, l'autosuffisance alimentaire des habitants d'une ville. Cette surface requiert néanmoins une majoration pour tenir compte d'autres besoins vitaux que celui de se nourrir. Par exemple, selon Christophe Elain, le compostage des excreta (sur 3 ans, pour éliminer tout risque sanitaire) occupe environ 1 m² de surface au sol par équivalent habitant ; le recyclage des eaux usées par microphytes, environ 11 m² (mais seulement 2 à 5 m² dans le cas d'un filtre planté) par équivalent habitant (Elain, 2007). Quelques mètres carrés supplémentaires sont à prévoir pour le lagunage à macrophyte pour affiner l'épuration, de même que pour d'éventuelles mares écologiques (voire de pisciculture), qui sont de puissants facteurs de biodiversité et sources de production alimentaire complémentaire. Chemins d'accès, culture de plantes médicinales et mellifères (apiculture), quelques « arbres têtards » pour assurer un minimum de bois de cuisson, ... Le cumul de tout cela nous amène à majorer de 25 % la surface de production alimentaire pour un total de **450 m² de sol vivant par habitant**, qui est une estimation sommaire de la surface nécessaire pour satisfaire aux besoins vitaux, tels que définis précédemment. Rappelons que ce strict minimum ne concerne que les seuls besoins du quotidien (fréquence élevée) et hors situation exceptionnelle. Notons aussi que la question du chauffage au sens où nous l'entendons habituellement n'est pas concernée²⁶². Non pas en raison d'une anticipation abusive d'un réchauffement climatique (qui, de toute façon, n'exclut pas des épisodes de froid), mais du fait qu'il existe des solutions alternatives d'urgence au maintien de la température corporelle : alternatives individuelles (vêtements), ou collectives « par mutualisation » (dans certaines sociétés anciennes scandinaves, plusieurs familles dormaient dans une seule pièce, ce qui limitait de manière radicale la quantité de combustible de chauffage par personne ; le recours à des dortoirs improvisés fait partie des solutions d'urgence en cas de pénurie énergétique majeure).

Le résultat précédent peut être mis en regard avec la découverte récente sur le territoire de l'actuelle Ukraine de traces de « métropoles préhistoriques » datant de 4000 ans avant J.C. (Müller et al., 2021). Celles-ci présentent des densités de population comparables à celles des métropoles modernes (500 hab/km²) et sont toutes regroupées sur seulement une soixantaine de kilomètres carrés de « steppe cultivée » qui, selon les archéologues, subvenait confortablement à l'ensemble des besoins des habitants (y compris le bois pour leurs constructions, leurs feux, leurs fours à poterie, leurs bûchers funéraires, ...) sans que la qualité du sol ni le couvert forestier n'aient été dégradés. Cette découverte illustre le potentiel d'approvisionnement — de proximité et de manière durable — qu'offrent les sols vivants. Certes, les 2000 m² par habitant dont atteste cet exemple excèdent largement la surface évoquée plus haut (450 m²/hab), mais celle-ci correspond à une valeur limite pensée pour ne permettre de répondre qu'*a minima* (et hors bois de chauffage) à l'essentiel des besoins vitaux dans une situation critique ; de plus, elle est calculée en tenant compte de techniques intensives issues de travaux empiriques et d'expériences de

262/ Dans la mesure où l'on estime qu'un hectare de forêt géré correctement peut produire de manière durable les 10 m³ de bois de chauffage annuel nécessaire pour chauffer une maison, un recours massif à cette ressource par l'ensemble des habitants d'une ville est impossible.

terrain aux productivités très élevées. Rappelons également que si, par construction, le modèle de la ville BELT est conçu de manière à rendre possible la survie de ses habitants dans le pire des scénarios (pénurie énergétique totale), le fonctionnement de la ville intègre le recours à des superstructures dont ne bénéficiaient pas les habitants des « métropoles préhistoriques » et qui permettraient, même utilisées en mode BELT, l'accès à des adresses plus lointaines, notamment celles ne correspondant pas à des besoins « au quotidien » ; sans parler des autres réseaux que ceux du transport, notamment les réseaux d'énergie qui, associés à des façons « aussi low-tech que possible » de production d'électricité (micro centrales hydrauliques ou petites éoliennes low-tech), de gaz (fabrication de biogaz par fermentation de déchets végétaux) ou d'eau chaude (chauffe-eau solaire low-tech), permettraient de maintenir un minimum de confort thermique tout en préservant la ressource du bois à des fins plus patrimoniales que leur combustion.

Dit autrement, une ville BELT en mode énergétiquement contraint n'est pas un retour à la préhistoire.

L'exercice auquel nous nous sommes livrés pour établir une correspondance, dans l'hypothèse du primat de la contrainte BELT, entre le substrat *sol vivant* et la fonction *production* permet à la fois de justifier la pertinence de la catégorie *adresses naturelles* et de préciser la « place » qu'elle occupe dans le modèle de la ville BELT, aussi bien par sa fonction que par son emprise spatiale. Mais il repose, nous l'avons vu, sur des travaux relevant de la permaculture, donc d'une « discipline à part » qui, bien que poussant très loin les principes de la systémique et de l'écologie, reste toujours en devenir ; en particulier, elle n'est pas enseignée en tant que telle à l'université et n'a pas de label (à la différence de l'agriculture bio, par exemple). Autant dire que le raisonnement repose sur des bases encore fragiles.

Cependant, en dépit de la nécessité de consolider par des travaux académiques portant aussi bien sur le « fonctionnement » du sol vivant que sur le caractère généralisable et les rendements élevés des pratiques permacoles (qui, par ailleurs, contribuent à renouveler, voire à améliorer ce sol), nous considérons dans le cadre de ce travail que le faisceau d'indices convergents mis en évidence par nos recherches bibliographiques²⁶³ — et, dans une certaine mesure, par nos propres expérimentations de portée très limitée — suffisent à prendre position en retenant la catégorie « **sol vivant** géré et entretenu *via* des pratiques permacoles » **comme élément constitutif pertinent et fondamental de la ville BELT**.

4.3.2.- Adresses artificielles : exosquelettes consommateurs

Rappelons que dans certains de ses ouvrages et communications, Jean-Marc Jancovici qualifie d'exosquelette les machines « se nourrissant » de combustibles fossiles et démultipliant le potentiel de l'humain à transformer son environnement. Nous empruntons ce terme en l'élargissant à l'ensemble des artefacts ainsi qu'aux lieux qu'ils occupent (« adresses artificielles »). Outre les machines dont parle Jancovici, fait ainsi partie de l'exosquelette aussi bien un outil²⁶⁴, qu'un vêtement, un bâtiment, une infrastructure de transport (qui permettent de réguler certains type d'échanges)... ou une ville.

Tel qu'utilisé ici, le terme *ville* doit être compris selon une acception élargie, proche de ce que

263/ en dépit du biais lié au fait que les expériences ratées ou mitigées sont probablement moins médiatisées et font l'objet d'un nombre de publications moins important que les expériences réussies.

264/ Un marteau ou une hache « concentrent » l'énergie cinétique sur une surface réduite

les anglophones appellent *human settlement* (littéralement « établissement humain »²⁶⁵), une notion que l'architecte Philippe Madec définit comme « *l'ensemble des bâtiments, infrastructures et services nécessaires à la communauté humaine pour accomplir ses fonctions en tant qu'organisme social* » et qui permet de « *mettre fin à ces oppositions stériles entre urbain, périurbain et rural, notamment* » (Madec, 2020).

Selon une approche énergétique, la distinction fondamentale entre la catégorie des adresses naturelles et celle des adresses artificielles est fonctionnelle. Les premières ont le potentiel de produire des ressources, alors que les secondes, dénuées de cette faculté, accueillent d'autres fonctions (parmi lesquelles le prélèvement et la transformation de ces ressources). En raison de cette complémentarité, et sans qu'il soit nécessaire d'ouvrir la boîte noire de chacune des ces deux catégories, il est possible d'affirmer que la satisfaction des besoins vitaux des habitants passe par leur agencement fonctionnel. C'est ce qui justifie, d'une certaine manière, la caractérisation « en creux » d'une catégorie fonctionnelle (*non productive*) par une catégorie de substrat (*artificiel*), le sol vivant étant bien trop précieux pour *ne pas* lui affecter une fonction autre que *productive*.

Si nous laissons provisoirement de côté le rôle de l'agencement spatio-fonctionnel qui fera l'objet de la section suivante, la **nature de la contribution** de chacune des deux catégories **au potentiel de satisfaire à ces besoins en mode BELT** est donc différente. Pour la première catégorie, elle relève de la fonction de « transformateur BELT à énergie solaire » et, pour rappel (cf. le développement relatif aux adresses naturelles au paragraphe 4.3.1.), elle est conditionnée par certaines caractéristiques des adresses de cette catégorie — caractéristiques qualitatives (sols vivants gérés selon le modèle permacole) et quantitatives (estimation d'une surface par habitant).

La contribution est forcément d'une autre nature pour la seconde catégorie, dont l'une des spécificités est relative au substrat des adresses qui la composent et renvoie à la distinction entre « naturel » et « artificiel ». Considérée au prisme de l'énergie, cette opposition fait intervenir, comme nous l'avons souligné plus haut, le critère de la « quantité de transformation » apportée par l'homme (augmenté de ses exosquelettes) pour aménager ce substrat (ce terme est entendu ici au sens de « support physique » ou, dans le cas du bâti, « d'enveloppe »). En effet, selon ce critère, la formation du substrat « sol vivant » ne requiert aucun apport énergétique autre que celui du rayonnement solaire²⁶⁶. En revanche, le propre des adresses artificielles est le nécessaire complément d'énergie (sous quelque forme que ce soit) apporté par l'homme pour former leur substrat, qu'il s'agisse d'une chaussée en dalles de pierre (qu'il faut extraire et transporter depuis une carrière), d'un revêtement bitumineux (à base d'hydrocarbures fossiles importés souvent de loin), d'une maison en briques (qu'il faut cuire moyennant un combustible), des rails de chemin de fer ou de la structure porteuse d'un gratte-ciel (dont l'acier est issu de procédés coûteux en énergie, depuis l'extraction et le transport du minerai jusqu'au façonnage en lami-

265/ Bien qu'utilisé le plus souvent au pluriel (les établissements humains), « [...] *l'établissement humain est unique, même si sa réalité est plurielle. Il est divers, tout autant territoires, métropoles, villes, villages, bourgs, hameaux, bâtiments que bancs, tout aussi urbain, rural, périurbain que montagnard, littoral ou de plaine [...]* » (Madec, 2020), p.54.

266/ Si la formation du sol vivant ne nécessite pas l'intervention de l'homme, ce dernier peut accélérer le processus moyennant énergie — qui peut être musculaire — en « nourrissant » le sol vivant de matières (azotées, carbonées, eau, ...).

Il est vrai que dans certains cas, cette intervention peut être indispensable pour créer des conditions favorables à la formation des sols vivants qui, autrement, n'aurait pas lieu. C'est le cas par exemple des sites en pente où l'érosion par ruissellement entrave ce processus de (ré)génération, qui peut néanmoins être « réactivé » par une opération de remodelage du paysage (mise en place de terrasses, par exemple).

noir, en passant par la transformation dans un haut-fourneau) ou d'un bâtiment en béton armé (dont le ciment est, lui aussi, issu de procédés particulièrement énergivores²⁶⁷). La contribution des adresses artificielles à la ville BELT tient au choix des matériaux de leur substrat.

A cet égard, le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2022) fait état du potentiel de l'utilisation du bois d'œuvre en remplacement du béton armé et de l'acier (les matériaux de construction aujourd'hui les plus couramment utilisés), en soulignant qu'une transition allant dans ce sens nécessiterait la mise en place de politiques de reforestation et de sylviculture de très grande ampleur. Mais de notre point de vue, le recours massif à ce matériau n'est pas envisageable durablement en raison d'une double concurrence : d'une part, entre différents usages du bois (qui est aussi une alternative aux combustibles fossiles) ; d'autre part, entre différentes affectations des sols vivants (non extensibles), notamment à la production de nourriture.

En revanche, la combinaison entre divers matériaux biosourcés autres que le bois (pailles, fibres et laines végétales,...) et, surtout, géosourcés, offre une alternative crédible. Depuis le début des années 1970, le laboratoire CRAterre²⁶⁸ s'attache à étudier l'utilisation de la terre crue sous ses multiples déclinaisons, non seulement dans l'architecture traditionnelle (qui offre de nombreux exemples d'application de grande ampleur²⁶⁹), mais surtout comme un ensemble de matériaux d'avenir (Dethier, 2019), appréhendés dans la globalité de la chaîne de leurs productions et de leurs utilisations (analyse du potentiel du territoire où la matière première peut être extraite et étapes successives de la production des matériaux, des structures, des édifices et des villes). Non seulement les propriétés physico-chimiques font de la terre crue un véritable « béton naturel » bien adapté à la construction (Anger et Fontaine, 2009), mais la pertinence de ce matériau dans une démarche globale est désormais avérée par de nombreux travaux (Guillaud et al., 1989). Depuis quelques années, la construction en terre crue connaît d'ailleurs un succès croissant (Gauzin-Müller, 2020), la filière se renforce (Alglave, 2020), et les réalisations se multiplient partout dans le monde, offrant une grande variété d'exemples d'architectures innovantes²⁷⁰. S'il est vrai que la composition des sols est très variable et que leur usage dépend fortement des minéraux qui les constituent (Isambert et Hernandez, 2020), la multiplicité des techniques de sa préparation permet d'envisager sérieusement la généralisation de son utilisation grâce aux nombreuses modalités de sa mise en œuvre²⁷¹ et aux innovations de ces dernières

267/ Le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2022) pointe l'importance des émissions de CO₂ — directement corrélée à la consommation d'énergies fossiles — de l'industrie du ciment. La part des cimenteries dans les émissions anthropiques de gaz à effet de serre est estimée à 7 % des émissions totales.

268/ Centre international de la construction en terre fondé en 1979 et œuvrant à la reconnaissance du matériau « terre » comme réponse aux défis environnementaux, le CRAterre est devenu un laboratoire de recherche de l'ENSAG (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble) ; depuis 2010, il forme l'Unité de recherche AE&CC après son rapprochement du Laboratoire « Cultures constructives ». Il rassemble chercheurs, enseignants et professionnels travaillant en collaboration avec de nombreux partenaires internationaux en vue d'établir des synergies créatives entre recherche, diffusion des connaissances, formation et actions de terrain. Ses activités relèvent donc à la fois du domaine scientifique et du domaine associatif (il se présente d'ailleurs comme Association et Laboratoire de recherche).

269/ Grande mosquée de Djenné au Mali (1907), l'Alhambra de Grenade (réalisé en pisé au XIII^e siècle), la ville de Shibam surnommée « Manhattan du désert » avec ses « gratte-ciels » de 30 m de haut (7 étages), etc. (Dethier, 2019).

270/ Des architectes contemporains dans différents pays se sont saisis de ces matériaux dans le cadre de réalisations variées (Anger et Fontaine, 2009), dont certains de grande ampleur (centres de formation, hôpitaux, écoles,...). En France, un quartier (OPAC de l'Isère comptant 65 logements répartis en 11 îlots) a été entièrement construit en terre dès les années 1980, mettant en œuvre différentes techniques (pisé, terre-paille, terre comprimée,...) ; depuis sa construction, il a fait l'objet de plusieurs études d'acceptabilité auprès des habitants, avec des retours plutôt positifs.

271/ Par exemple, sous forme d'adobe (briques de terre crue) ou de pisé (coffrage), ou par association à divers

années dans le domaine de la stabilisation de ce matériau par l'ajout de biopolymères (Vissac et al., 2017)²⁷².

Le recours préférentiel (sinon systématique) aux matériaux géosourcés (et accessoirement biosourcés) pour accueillir celles des adresses artificielles dont la fonction est compatible avec ces derniers nous apparaît comme une caractéristique essentielle de la catégorie « adresses artificielles » des composantes d'une ville BELT, pour plusieurs raisons : (1) par définition, ces matériaux ne font l'objet d'aucune transformation nécessitant un apport énergétique (cuisson, par exemple) ; (2) leur mise en œuvre est possible en mode BELT : recours à la seule énergie musculaire ; (3) ils sont disponibles en quantités importantes : contrairement au bois, le risque de pénurie est inexistant ; (4) ils sont disponibles partout (sauf exception), sous la couche de sol vivant : les dépenses énergétiques en transport sont faibles ; (5) transformées en mares écologiques (voire étangs de pisciculture), les excavations résultant du prélèvement participent à l'enrichissement des écosystèmes de la catégorie « sols vivants » et contribuent à sa productivité alimentaire ; (6) ils peuvent être recyclés à l'infini et sur place : le processus de recyclage (qui ne produit aucun déchet dangereux) n'exige aucun apport d'énergie de transformation ou de transport ; (7) ils présentent de bonnes qualités en termes d'inertie thermique, et les qualités isolantes de certaines de leurs déclinaisons (notamment sous forme de mélange à des laines de fibres végétales) améliorent le bilan énergétique des bâtiments.

Certes, la nécessaire limitation du nombre d'étages (5 ou 6 semble être un maximum) peut apparaître comme une contrainte, mais ne constitue pas un inconvénient dans le contexte d'une ville dont le fonctionnement en mode BELT (en période de pénurie grave) limite fortement les possibilités de recours à l'ascenseur.

Comme signalé plus haut, le substrat en matériaux géosourcés peut ne pas convenir à la fonction de certaines adresses artificielles. C'est le cas, en particulier, de celles des infrastructures de transport qui nécessitent des supports spécifiques adaptées aux caractéristiques techniques des véhicules qu'elles accueillent (rails, certaines voies automobiles,...). Nous appellerons **sites propres** ces infrastructures dédiées au transport mécanique, qui se distinguent aussi bien par leur caractère monofonctionnel (des rails accueillent uniquement la fonction transport) que par la spécificité de leur substrat : s'il est effectivement difficile de ne pas faire appel à des matériaux dont la production est contraire à une approche BELT, du moins est-il possible de limiter leur quantité (surface au sol) en privilégiant des agencements favorables à la **mutualisation** (transport collectif) et en allouant moins d'espace aux modes mécanisés individuels. A cet égard, le rapport des pourcentages de surface occupée par les infrastructures dédiées aux transports entre une ville conçue pour (et par) l'automobile (le cas de Houston est emblématique) et une ville (hypothétique) conçue presque exclusivement autour d'un mode ferre²⁷³ est supérieur à 100 : 50% de la surface totale de la ville (en tenant compte des aires de stationnement) dans le premier cas, moins de 0,5% dans le second (Maupu, 2006).

L'économie d'énergie (effective et potentielle) que peut entraîner une diminution du pourcentage de surface allouée aux transports mécanisés tient, d'une part, à la limitation (effective)

matériaux locaux biosourcés (bois, paille, laine de fibres végétales, chènevotte, roseau,...) selon différentes modalités (torchis-colombage ou « terre-paille », bauge, bétons de lin, de chanvre,...), etc. Pour illustrer les principaux modes d'utilisation de la terre crue, une « roue des techniques » a été élaborée par le laboratoire CRAterre (Guillaud et al., 1989) et mise en ligne en 2020 (<https://craterre.hypotheses.org/3917>).

272/ Construire en terre n'est pas synonyme de « retour à la bougie ».

273/ Moyennant un agencement approprié des adresses ; cette question est abordée à la section suivante.

de la quantité de matériaux issus d'un processus de production et de mise en œuvre énergivore et, d'autre part, à la limitation (potentielle) des modes ayant une forte consommation énergétique par personne transportée²⁷⁴, puisqu'un tel partage des espaces leur est défavorable.

De plus, par rapport aux infrastructures dédiées aux modes routiers qui artificialisent les sols²⁷⁵, les rails présentent l'avantage d'être compatibles avec le substrat « sol vivant » — comme en témoigne la richesse des écosystèmes sur certaines friches ferroviaires ou même sur certaines lignes de tramway moderne en site propre — qui pourrait d'ailleurs être délibérément mis à contribution dans la production, alimentaire (variétés de plantes couvre-sol comestibles) ou autre (plantes mellifères, fibres végétales,...)²⁷⁶.

Au regard de la contrainte BELT, la caractéristique qui nous semble la plus significative pour la catégorie des adresses artificielles tient à la nature et à la quantité de la matière utilisée pour réaliser leurs substrats : recours aux matériaux géosourcés pour celles des adresses dont la fonction s'y prête, minimisation de la quantité de matière — donc de l'importance de l'emprise au sol — pour les autres.

Ce dernier point soulève d'ailleurs la question d'une tentative de quantification, à l'image de celle qui a été faite pour les sols vivants.

Il est difficile d'estimer la surface totale de substrat nécessaire pour accueillir l'ensemble des adresses artificielles liées à la satisfaction en mode BELT des besoins vitaux d'une personne. Les densités observées de villes existantes où les sols vivants sont relativement peu présents peut en donner une idée. Celle de Paris intra-muros est intéressante, car elle compte parmi les plus élevées au monde, tout en offrant la possibilité de se déplacer sans bannir la voiture particulière, dont la part modale n'est pas marginale. La valeur de cette densité — un peu plus de 200 habitants à l'hectare, soit 50 m² de surface au sol de substrat inerte par habitant — intègre aussi les infrastructures de transport d'échelle supérieure (les grandes gares notamment). C'est cet ordre de grandeur²⁷⁷ — 50 m² par habitant — que nous retenons comme hypothèse de travail.

274/ Dans une ville hypothétique conçue autour du tramway, la consommation par an et par habitant d'énergie de transport de voyageurs pourrait être de l'ordre de 0,25 GJ (milliards de Joules), alors qu'elle est de plus de 80 GJ à Houston, soit un rapport de plus de 1 à 300 (Maupu, 2006).

Le potentiel de sobriété énergétique de la mutualisation est illustré également au travers de la comparaison du service transport pouvant être rendu par différents systèmes à puissance installée donnée. Ainsi, en ville, 20 000 kW de puissance installée sur des voitures électriques individuelles (soit un parc de 400 véhicules, chacun d'une puissance de 50 kW, pesant 1,3 t, coûtant 23 k€ et renouvelés tous les 15 ans) « produisent » de l'ordre de 10 millions de voyages. Installés sur des vélos à assistance électrique (soit 80 000 vélos développant 0,25 kW, pesant à 0,02 t, coûtant 1 k€ et renouvelés tous les 15 ans), ces 20 000 kW produiraient, en ordre de grandeur, 500 millions de voyages. Installés sur des rames de tramway (40 rames de 500 kW, 40 t, coûtant 2 000 k€ et renouvelées tous les 30 ans), ces mêmes 20 000 kW peuvent produire environ 2000 millions de voyages (dans des conditions raisonnables de remplissage). L'ordre de grandeur du rapport du nombre de voyages produits par un kilowatt est de **1 à 200**, selon que ce kilowatt est installé sur une voiture électrique ou sur une rame de tramway (Maupu et Stransky, 2017).

275/ Il est à noter que l'objectif ZAN (zéro artificialisation nette à échéance 2050) était au nombre des « enjeux centraux de l'agenda politique gouvernemental » (Bariol-Matahais, 2020). Votée le 20 juillet 2021, la Loi Climat et résilience affiche pour objectif la réduction de 50% de l'artificialisation des sols sur les dix prochaines années.

276/ Les infrastructures ferrées peuvent servir de source d'inspiration pour réduire la surface de la chaussée, surtout pour les voies secondaires ; par exemple en remplaçant la chaussée « toute largeur » par deux bandes roulantes étroites entre lesquelles pourrait prendre place un sol vivant.

277/ C'est bien d'ordre de grandeur qu'il est question ici, tant cette estimation repose sur un calcul simpliste. Par exemple, les adresses artificielles intramuros correspondent aussi à des emplois ne concernant pas les seuls parisiens ; à l'inverse, l'ensemble des « surfaces artificialisées » d'Ile-de-France — réseau autoroutier, plateformes logistiques ou aéroports parisiens (qui à eux seuls représentent environ 45% de la surface de Paris intra-muros) — peuvent être considérées comme étant au service des parisiens (mais en sachant que tous les franciliens sont également concernés par ces services) ; par ailleurs, le calcul devrait exclure les espaces verts parisiens, relevant

4.3.3.- Conclusion : forêt civilisée ou ville végétalisée ?

L'objet de cette section était de préciser les composantes d'une ville qui offre à ses habitants un cadre leur permettant, en cas de besoin, de satisfaire leurs besoins vitaux en mode BELT. En première approximation, les deux éléments constitutifs pertinents d'une telle ville (ville BELT) correspondent à deux catégories d'adresses d'importance inégale en termes de surface au sol occupée par leurs substrats respectifs. Pour que les habitants aient la possibilité de faire face durablement à une crise énergétique majeure, chacun d'eux doit ainsi disposer de 450 m² « d'adresses naturelles » dont le substrat est un sol vivant géré selon des principes permacoles, et de 50 m² « d'adresses artificielles » au substrat constitué pour l'essentiel de matériaux géosourcés et biosourcés. La densité moyenne d'une telle ville serait donc de l'ordre de 20 habitants à l'hectare.

Un établissement humain de cette densité peut-il être qualifié de ville ? Ville à la campagne ou plutôt campagne urbaine ? Vaste question, qui fait écho aux idées développées dans l'ouvrage *Territoire frugal. La France des campagnes à l'heure des métropoles*²⁷⁸ proposant une déconstruction d'une certaine vision « urbaine » (relative aussi bien à l'extension des villes qu'aux campagnes) qui s'est imposée en France sous forme de « catégories d'analyse » et qui a sous-tendu des politiques d'aménagement reposant sur l'opposition entre, d'un côté, la ville compacte avec ses « densités vertueuses » et, de l'autre, un espace faiblement peuplé avec son « étalement urbain répréhensible ». En décalage avec ce cliché de l'opposition « urbain *versus* rural », l'ouvrage met en exergue l'idée d'un « urbain généralisé » avec une granulométrie spécifique d'espaces qui seraient comme « saupoudrés d'un peu de ville » à divers degrés, et qui pourraient être plus durables que ne laisse penser l'image qui en est habituellement donnée.

Que l'expression soit appropriée ou non, la « ville BELT » est caractérisée non seulement par l'importance de l'emprise spatiale de ses adresses naturelles, mais également par le caractère patrimonial de ces dernières. Car un sol vivant met du temps à se mettre en place, bien davantage que la construction d'un immeuble, et certaines des « adresses » qu'il accueille (comme les arbres) également : l'unité de temps pertinente est la décennie. A ce titre, et en raison de son rôle de producteur de ressources et de recycleur indispensable à la satisfaction des besoins vitaux des habitants, c'est lui qui est premier et mérite de faire office d'élément stable de la ville (dans le temps et dans l'espace), donc de réserve²⁷⁹. Un projet d'aménagement urbain selon une logique BELT ne saurait en faire une variable d'ajustement : ce sont les adresses artificielles qui s'articulent autour des adresses naturelles et s'y adaptent, éventuellement leur cèdent la place ; pas l'inverse.

Cette idée de « nature dans la ville »²⁸⁰ — qui connaît un succès croissant durant ces dernières années, au point que les NBS (*Nature-Based Solutions*²⁸¹) tiennent une place importante dans

de la catégorie des sols vivants ; etc. Nous estimons néanmoins que la prise en compte de tous ces éléments (parmi d'autres) ne remettrait pas radicalement en cause l'ordre de grandeur proposé.

278/ Ouvrage collectif dirigé par Antoine Brès, Francis Beaucaire et Béatrice Mariolle

279/ A la différence des « réserves » constituées (plus exactement : stock) — localisées et statiques — que sont les mines et gisements (d'énergies fossiles, par exemple), les réserves dynamiques que sont les sols (potentiellement) vivants ont le don d'ubiquité, de même que l'énergie de rayonnement solaire qui les forme et les fait fonctionner.

280/ Cf. Blanc & Clergeau, 2013.

281/ La notion de SFN (Solutions Fondées sur la Nature, traduction française de NBS) a été proposée par l'*Union internationale pour la conservation de la nature* en 2009 à Copenhague lors de la Conférence des parties de la CCNUCC ; sa définition a été formalisée par la Commission Européenne, qui indique que ces solutions sont « ins-

le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2022) — est porteuse d'un flou terminologique (laissé en suspens tout au long de cette section) au niveau de la distinction entre « le naturel » et « l'artificiel », souvent considérée comme allant de soi, notamment en parlant des sols. Pourtant, depuis l'apparition de l'homme, tout sol (ou presque) n'a t-il pas subi, à un moment ou à un autre et d'une manière ou d'une autre, l'intervention de ce dernier ? La plupart des espaces dits « naturels » n'ont-ils pas été façonnés par l'humanité au cours de l'histoire²⁸² ? Par ailleurs, une ruine médiévale colonisée par la végétation et la faune n'est-elle pas plus « naturelle » que le « paysage lunaire » (Shepard, 2016) d'un champ de maïs que toute vie a déserté et dont la productivité tient aux engrais venus de l'autre bout de la planète, à l'eau pompée depuis la nappe phréatique, à l'industrie de la chimie organique, aux machines nourries aux énergies fossiles ? Les travaux d'écologie historique de l'archéologue Stephen Rostain sur les « forêts civilisées » au sein de l'Amazonie précolombienne (Rostain, 2016 ; Rostain, 2017) sont particulièrement éclairants sur le caractère relatif de l'opposition précédemment évoquée, où la distinction entre naturel et artificiel renvoie implicitement à l'opposition entre « sauvage » et « civilisé ». En particulier, ils rappellent que si en Europe, à partir du Moyen Âge, on a divisé le territoire en trois — la ville, la campagne et la forêt — c'est qu'il y a une étape intermédiaire entre la civilisation et le monde sauvage : celui de la campagne, dominée par l'homme mais pas urbaine pour autant. Or si notre civilisation tend à extraire et exploiter jusqu'à la stérilité, les trois mondes coexistent chez les amérindiens, pour qui la forêt amazonienne était vue comme un lieu domestique, n'ayant rien de « naturel » ni de « sauvage » : pour eux, elle était « urbanisée », à la fois grande ville et grand jardin. Avec l'écologie historique, on observe donc que si l'activité humaine entraîne des changements dans les paysages qui peuvent subsister pendant des siècles, l'humain n'en est pas pour autant qu'un simple destructeur : il peut s'avérer un excellent gestionnaire, notamment de la **biodiversité**. Certaines espèces cultivées se sont intégrées et ont **transformé les écosystèmes**. Il subsiste des grandes buttes en terre, construites il y a mille ans à l'ouest du Surinam, sur lesquelles on trouve aujourd'hui 30% d'espèces utiles à l'homme, contre 10% dans les forêts alentours (Rostain, 2016 ; Rostain, 2017 ; Usbek & Rica, 2021).

Cette relation différente peut-elle inspirer les manières d'aménager d'aujourd'hui ?

Quels que soient le terme utilisé (campagne ? jardin ?...), l'idée à retenir est que selon une approche BELT, la « nature » est un « élément structurant du projet urbain, pas un objet décoratif » (Barra, 2020).

Il s'agit maintenant de s'interroger sur les manières d'articuler adresses naturelles et adresses artificielles (90 % et 10 % en surface au sol, respectivement) pour permettre à une telle « ville » de fonctionner, et plus précisément, sur la contribution de l'agencement au potentiel des habitants à satisfaire en mode BELT leurs besoins vitaux.

pirées et soutenues par la nature, sont rentables, fournissent simultanément des avantages environnementaux, sociaux et économiques et contribuent à renforcer la résilience. Ces solutions apportent davantage de nature et de caractéristiques et processus naturels, et plus diversifiés, dans les villes, les paysages et les écosystèmes marins, par le biais d'interventions systémiques, efficaces en termes de ressources et adaptées aux conditions locales » (European Commission, 2010). Depuis, elle fait l'objet de travaux d'expertise (Wild, 2020) et d'une abondante littérature dans des revues aussi bien académiques (Nesshöver *et al.*, 2017) que de vulgarisation (Barra, 2020).

282/ « [...] il n'existe pas d'écosystème non influencé par l'être humain et inversement [...] » (Torres, 2017, p.24).

4.4.- Agencer comment ?

« *Ja, das möchtest :*

*Eine Villa im Grünen mit großer Terrasse,
vorn die Ostsee, hinten die Friedrichstraße ;
mit schöner Aussicht, ländlich-mondän,
vom Badezimmer ist die Zugspitze zu sehn –
aber abends zum Kino hast du nicht weit.*

[...] »

(Tucholsky, 1927)

Oui, c'est bien cela que tu voudrais :

Une villa entourée de verdure avec une grande terrasse,
la mer Baltique à l'avant, la *Friedrichstraße*²⁸³ à l'arrière,
un site à la fois rural et mondain, offrant des vues magnifiques,
on verrait la *Zugspitze*²⁸⁴ depuis la salle de bain,
mais la soir venu, il n'y aurait pas à marcher loin pour aller au cinéma.

[...]

(C'est nous qui traduisons.)

Intitulé *Das Ideal* (L'idéal), le poème satirique de l'écrivain allemand Kurt Tucholsky résume parfaitement, dès les premiers vers, le rêve d'un « en même temps » aussi alléchant qu'impossible, « [...] *traduction spatiale de désirs constants et contradictoires d'une majorité de personnes : vivre en même temps « dans la ville » et « hors la ville » et donc à la frontière entre aires bâtie et non bâtie, entre animation citadine et calme campagnard. Se garder l'accès tout en s'isolant, s'inclure tout en s'excluant.* »²⁸⁵

S'il serait vain de vouloir atteindre un idéal qui concilie l'inconciliable par le biais d'un agencement, aussi ingénieux soit-il, ce dernier n'en reste pas moins un outil de recherche de compromis face à des contraintes contradictoires et pas forcément hiérarchisées de manière unanime. Sous contrainte énergétique, **bien agencer**, c'est d'abord « *concevoir, avec un minimum de ressources, des lieux sûrs, reliés, mesurés, polyvalents, durables et résilients, pour des composantes diverses, interactives, changeantes et pas toujours compatibles entre elles* » ; bien agencer, c'est aussi imaginer un « *ensemble de portes et de canaux —structurés comme il convient— et de frontières (ou membranes) —poreuses juste ce qu'il faut— [qui] contient, contrôle et ordonne les flux matériels —en quantité judicieuse— à seule fin, pour nos territoires, de distiller un flux immatériel : la joie de vivre.* » ; bien agencer consiste à « *bien situer et relier les composantes selon leurs besoins ou désirs ou fonctions malgré leur incompatibilités ou conflits* » ; bien agencer, c'est donc « *réduire des contradictions physiques, techniques ou opérationnelles : agrandir sans prendre plus d'espace, relier sans nuire, séparer sans éloigner, aérer sans disperser, protéger sans isoler, associer sans soumettre,...* » et ce, avec quelques principes : « *mixer et intégrer aux bonnes échelles et bons rythmes en privilégiant petite taille et lenteur ; soigner toutes les interfaces ; définir des zones en fonction de leurs degrés*

283/ Rue animée des quartiers commerçants chic de Berlin.

284/ Sommet situé dans les Alpes bavaroises (point culminant de l'Allemagne).

285/ (Maupu et Stransky, à paraître).

de fréquentation pour minimiser le besoin de mobilité ; diversifier les fonctions d'un lieu et les lieux d'une fonction, pour mieux construire les autonomies locales ; valoriser toutes les bordures. Alors, sans bouger, le simple mur de terre ou de pierre devient tout à la fois réserve de matériaux, limite de parcelle, enveloppe et structure d'un local, capteur, inertie et barrière thermiques, écran acoustique, régulateur d'humidité, paravent, appui, soutien ou guide, décor, support de lianes comestibles, hôtel d'insectes et d'oiseaux, expression d'une culture, support d'enseigne, de message ou d'œuvre d'art, mémoire des siècles, ... » (Maupu et Stransky, 2018).

C'est cette question du « bien agencer » que nous nous attachons à développer dans cette section, en répétant qu'il ne s'agit pas ici de défendre l'idée d'un lien de causalité entre une organisation d'adresses et des pratiques, c'est-à-dire l'idée qu'il existerait une « organisation idéale » se traduisant automatiquement par des modes de vie « énergétiquement sobres ». Notre objectif est simplement d'explorer le *potentiel* des agencements à *rendre possibles* de tels modes de vie et à essayer d'en apprécier la portée par confrontation à une situation extrême de pénurie énergétique grave ; notre hypothèse est que dans une telle situation, la survie serait une motivation suffisamment forte pour que ce potentiel soit effectivement exploité ou, dit autrement, que le « fonctionnement de la ville en mode BELT » serait activé par ses habitants.

C'est dans cette logique qu'à la section précédente, après avoir identifié deux catégories d'adresses selon la nature de leurs fonctions (producteur *versus* consommateur) qui s'accompagne d'une distinction relative à la matière de leurs substrats respectifs (vivant *versus* inerte), nous avons proposé pour chacune d'entre elles une caractéristique qui **contribue au potentiel des adresses qu'il accueille à satisfaire en mode BELT les besoins vitaux des habitants** : pour rappel, dans le cas des sols vivants, cette caractéristique relève du choix du mode de production (recours à l'approche permacole) ; dans le cas des substrats artificiels, elle relève de la nature et de la quantité des matériaux utilisés (biosourcés lorsque c'est possible, en minimisant la quantité dans le cas contraire).

C'est dans cette même logique que nous focalisons maintenant sur la contribution de l'agencement des adresses des deux catégories à ce potentiel : en somme, après la question « agencer quoi » vient la question « agencer comment ».

Pour structurer notre propos, nous proposons une grille de lecture à trois dimensions : (1) l'échelle, (2) le domaine d'action et (3) la catégorie cible.

(1) *L'échelle*, en conformité avec la logique qui sous-tend l'ensemble de ce document, renvoie à une distinction binaire entre échelle *humaine* et échelle *mécanique* selon la source d'énergie mobilisée pour assurer les échanges — déplacements de personnes et de biens entre adresses — nécessaires à la satisfaction des besoins vitaux des habitants : un déplacement est « d'échelle humaine » lorsqu'il est « normalement réalisable » (hors cas exceptionnels) en recourant à la seule énergie musculaire (marche à pied)²⁸⁶ ; il est d'échelle mécanique dans le cas contraire.

L'inconvénient de cette distinction tient à son caractère subjectif et donc à la difficulté de préciser, par une valeur seuil consensuelle, la notion de « normalement réalisable » : car même si l'OMS²⁸⁷ recommande fortement la pratique de la marche à pied jusqu'à préconiser un minimum de 10 000 pas par jour pour rester en bonne santé, cette notion ne saurait faire l'objet

286/ Cette distinction soulève la question du statut de la bicyclette, qui élargit le « champ des possibles » en termes d'accessibilité via l'énergie humaine. Car si ce mode respecte bien le critère « basse énergie », sa conformité avec le critère « low-tech » est plus discutable, compte tenu des caractéristiques actuelles de l'industrie du vélo et de ses chaînes de commercialisation. Si nous considérons la bicyclette comme un élément de confort appréciable, le parti (radical) retenu est de ne pas considérer ce mode comme un élément structurant d'une ville BELT.

287/ Organisation mondiale de la Santé

d'aucune norme chiffrée universelle, tant il est vrai que l'âge, la maladie, le handicap, le climat, la topographie, le moment de la journée, la saison, les conditions météorologiques, l'environnement social, l'environnement technique, la « marchabilité »²⁸⁸ des espaces publics, ... constituent autant d'éléments, parmi bien d'autres²⁸⁹, qui déplacent la frontière subjective entre les distances jugées « normalement réalisables » à pied et celles qui ne le sont pas.

Une manière de trancher en vue de proposer un ordre de grandeur « suffisamment consensuel » consiste à se référer aux valeurs utilisées par les professionnels des transports pour définir les zones de chalandise piétonnes des stations de transport collectif urbain. Dans la plupart des cas, il s'agit de disques d'un rayon variable selon le mode : généralement 300 m pour un arrêt de bus, 500 m pour une station de tramway, 800 m (parfois 1 km) pour une gare de RER. Ces valeurs sont d'ailleurs en accord avec celle retenue dans l'ouvrage de référence considéré comme fondateur des principes du TOD (Calthorpe, 1993) où l'auteur propose son fameux schéma théorique d'aménagement urbain d'une zone (semi-)circulaire comprenant logements, commerces et activités, dont le centre est occupé par une station de transport collectif, et dont le rayon est fixé à 600 m afin de rendre « aisément accessible à pied », au sein de cette zone, toute destination depuis toute origine. De manière générale, il semble ainsi y avoir un consensus à cet égard, puisque pour la plupart des auteurs, la zone de chalandise piétonne d'une station de transport collectif excède rarement 1 km² (Stransky, 2017).

En première approximation, l'unité pertinente caractérisant l'échelle humaine serait l'hectomètre ou, dit autrement, le kilomètre constituerait la limite entre les échanges « normalement réalisables » à pied²⁹⁰ et ceux qui, ne l'étant pas, relèveraient de l'échelle mécanique ; tout au moins, *hors situation de crise*.

Cette dernière précision est évidemment fondamentale dans le cadre d'une réflexion sur le potentiel de satisfaction des besoins vitaux des habitants d'une ville dans un contexte de risque d'une situation critique d'approvisionnement. Par construction, l'agencement BELT est pensé dans l'optique de cette éventualité qui, en réduisant les possibilités de recours aux déplacements mécanisés, modifierait la valeur précédente : en cas de pénurie énergétique grave, la satisfaction des besoins vitaux pourrait faire passer l'unité de mesure pertinente des déplacements d'échelle humaine de l'hectomètre au kilomètre. Il est difficile d'estimer où se situerait alors la frontière entre les deux échelles ; une valeur comprise entre deux et quatre kilomètres nous semble être un ordre de grandeur raisonnable.

(2) *Le domaine d'action* se réfère à la distinction entre les deux catégories d'adresses définies à la section précédente — adresses naturelles et adresses artificielles — en tant que deux composantes fondamentales d'une ville BELT. Une réflexion sur l'agencement de composantes si radicalement différentes, à la fois opposées et complémentaires, justifie la nécessité d'un double regard, à l'image de celui des amérindiens vis-à-vis de la forêt amazonienne qui, à leurs yeux, tient simultanément de la grande ville végétalisée et du grand jardin urbanisé. Une telle vision globale étant (encore ?) peu commune dans la culture européenne, nous proposons d'adopter successivement — et non pas simultanément — d'une part le point de vue de l'agronome-agri-

288/ Nous reviendrons sur cette notion dans la suite du développement.

289/ Divers éléments culturels, les habitudes prises au cours de la période de recours massif aux énergies fossiles, le sentiment d'insécurité faisant préférer la voiture particulière en tant qu'abri contre les agressions d'un environnement hostile (les transports collectifs étant parfois synonyme d'agression potentielle), etc.

290/ Il est à noter qu'en ville, la marche à pied est le moyen de déplacement « de porte à porte » le plus rapide pour les distances inférieures à 1 km. Un argument supplémentaire pour choisir cette distance comme valeur seuil entre l'échelle humaine et l'échelle mécanique.

culteur, dont le domaine d'action est la « campagne » (catégorie des adresses naturelles) alors que la « ville » (catégorie des adresses artificielles) fait partie de « l'environnement » (qui peut éventuellement être source de désordres ou d'opportunités) et, d'autre part, le point de vue de l'urbaniste qui, à l'inverse, agit sur la « ville » et considère la campagne comme une « toile de fond ». Chacun à sa manière et selon son point de vue, l'agronome-agriculteur comme l'urbaniste sont des aménageurs du territoire : tous deux agencent des (éco)systèmes, potentiellement avec les mêmes principes de mixité vertueuse, à toutes les échelles. Le double regard que nous proposons s'inscrit dans une démarche visant à ne pas dissocier les deux, à gérer les interfaces entre catégories, à faire figurer les éléments du système urbain parmi les écosystèmes, et les éléments des écosystèmes parmi les éléments de la ville. Ces deux regards — correspondant à deux domaines d'action — nous semblent d'autant plus nécessaires et pertinents qu'ils pointent les deux faces d'une même réalité.

(3) La dimension de la *catégorie cible* fait intervenir la même distinction que celle du *domaine d'action* — adresses naturelles *versus* adresses artificielles — mais selon une logique différente, à vocation opérationnelle. Dans le cadre d'un domaine d'action donné (celui de l'agriculteur ou celui de l'urbaniste), l'aménageur du territoire est amené à concevoir des agencements entre adresses relevant d'une même catégorie ou — compte tenu de l'approche globale évoquée plus haut et tendant à supprimer les frontières entre domaines — entre adresses relevant des deux catégories, auquel cas l'aménageur sort de son domaine d'action traditionnel : l'urbaniste invente la ville à partir des champs, l'agronome-agriculteur conçoit la campagne à partir de la ville. C'est cette opposition entre agencements d'adresses « intra-catégorie » et « inter-catégories » que traduit la dimension *catégorie cible*.

Ces trois dimensions à caractère binaire définissent une grille à huit « cases » (ou une typologie à *huit familles*) que nous mobilisons pour structurer la suite de notre propos, où chacune des huit familles d'agencements est interrogée sous l'angle de sa contribution (ou apport) au potentiel d'une ville à fonctionner en mode BELT.

Il est important de préciser que les apports de chaque famille peuvent être multiples, voire parfois se décliner sous différents registres, et que l'exercice de « remplissage des cases » auquel nous nous livrons ne prétend pas à l'exhaustivité ; d'ailleurs, les exemples que nous proposons n'ont d'autre vocation qu'illustrative ; à ce titre, ils n'ont pas le statut de solutions idéales et transposables. Au travers de ces huit paragraphes — un par famille — notre objectif est avant tout d'alimenter une réflexion sur la richesse des contributions de différentes facettes de l'agencement — considéré comme un « levier low-tech » — au potentiel de sobriété énergétique des villes.

Notons enfin que comme toute typologie, celle proposée a un caractère réducteur, le monde réel ne se laissant pas enfermer dans des cases strictement cloisonnées ; les contours de ces dernières s'avèrent parfois flous et leurs frontières perméables.

L'ordre de présentation des huit familles privilégie le critère de l'échelle, de sorte que les familles 1 à 4 concernent les agencements d'échelle humaine. Dans la mesure où à cette échelle, le propre de l'agencement BELT est de rendre possible la satisfaction des besoins vitaux sans recours à une énergie autre que musculaire, les quatre premières familles ne font pas intervenir (ou seulement de manière marginale) les sites propres, c'est-à-dire les adresses artificielles dédiées à la fonction du transport mécanique.

4.4.1.- Agencements de famille 1

(apport à la ville BELT²⁹¹ des agencements d'échelle humaine entre adresses naturelles, du point de vue de l'agronome).

A l'échelle humaine, la contribution à la ville BELT d'un agencement entre adresses naturelles relève de sa faculté à augmenter le potentiel de production locale de ressources indispensables à la satisfaction des besoins vitaux des habitants et ce, aussi bien en termes de quantité que de diversité²⁹² des produits.

Rappelons que les adresses naturelles de la ville BELT correspondent à des sols vivants exploités selon les principes de la permaculture, dont l'un des fondements est la recherche de l'efficacité énergétique, que ce soit en faisant d'un déchet une ressource, en réduisant les déplacements et les consommations, en évitant un travail inutile ou en valorisant les services gratuits rendus par les écosystèmes.

Or l'un des principaux outils de cette efficacité énergétique est le « design » qui, en permaculture, est sans rapport avec l'esthétique ou la décoration, mais signifie à la fois conception, aménagement, planification et *organisation* (synonyme d'agencement). Sous cette acception²⁹³, le **design est le concept opérationnel fondamental en permaculture**²⁹⁴. Il n'est pas excessif d'affirmer que les rendements élevés des sols gérés selon les principes permacoles tiennent précisément à différentes catégories d'agencements, dont celui d'adresses naturelles. Nous en donnons ici quelques illustrations.

L'agencement entre strates compte parmi les plus emblématiques. Commençons par rappeler qu'en faisant pousser des plantes, le fermier utilise le soleil pour produire des nutriments utiles à l'homme ; il est donc avant tout un « *entrepreneur en collecte d'énergie solaire* » (Shepard, 2016). A ce titre, par souci de valorisation de cette source d'énergie gratuite, son intérêt est de concevoir des systèmes qui présentent la plus grande surface possible de captage. Or de ce point de vue, une surface cultivée en monoculture (les grandes exploitations céréalières en sont un exemple) a un potentiel limité : toutes les tiges d'une variété donnée ayant la même hauteur, le cultivateur d'un hectare de blé dispose, en première approximation, d'une surface d'un hectare exposée au soleil, car le capteur est bidimensionnel, comme une feuille de papier posée sur une table. En revanche, trois feuilles de papier de même taille pliées en deux et posées sur cette dernière à la manière de trois « tentes canadiennes » triangulaires jointives triple la surface exposée au soleil sans changer la surface au sol ; le capteur initialement bidimensionnel (feuille posée à plat) devient tridimensionnel. La démarche peut être poursuivie avec trois feuilles de papier

291/ L'expression « apports à la ville BELT » signifie « contribution au potentiel de fonctionnement en mode BELT de la ville ».

292/ La diversité de la production est importante car elle participe à une alimentation équilibrée, donc au besoin des habitants de se maintenir en bonne santé. Par ailleurs, produire localement un certain aliment (ou un substitut acceptable) habituellement importé de l'autre bout de la planète permet de ne pas s'en priver tout en évitant des dépenses énergétiques liées à leur transport. Les expériences menées par un nombre croissant de permaculteurs pour produire des variétés inhabituelles sous nos climats (par exemple, la culture en Corrèze d'une variété de bananes originaires des contreforts de l'Himalaya) relèvent de cette logique.

293/ S'apparentant, par certains aspects, au 3^{ème} D du *Transit Oriented Development*.

294/ Patrick Whitefield opère d'ailleurs une distinction entre la « permaculture originelle » (agriculture permanente) et la « **permaculture de design** » qui s'attache à déduire de l'étude du fonctionnement des écosystèmes des principes d'efficacité énergétique applicables à tous types de systèmes humains, dont l'agriculture. Dit autrement, la permaculture de design relève d'une démarche de conception qui développe des systèmes d'agencements efficaces à partir de l'observation des énergies naturelles (Whitefield, 2004).

supplémentaires identiques aux précédentes mais pliées en quatre pour former trois « tentes » plus petites glissées à l'intérieur des trois tentes déjà en place : par rapport à la feuille de papier initiale, la surface exposée au soleil est maintenant multipliée par 4,5. Certes, trois des « tentes » sont dans l'ombre ; mais différentes plantes peuvent s'épanouir avec des intensités lumineuses différentes. S'il est vrai que la plupart des annuelles (le blé, le maïs, le soja,...) ne prospèrent qu'en plein soleil, de nombreuses plantes nourricières de la savane se sont adaptées pour vivre dans une ombre modérée ou profonde. C'est sur ce raisonnement (Shepard, 2016) que repose l'idée de la « savane nourricière »²⁹⁵ (ou « forêt comestible »), composée de plusieurs strates de végétaux de hauteurs différentes assurant tous une production comestible. Les strates terrestres sont au nombre de neuf²⁹⁶ (auxquelles s'ajoutent deux strates aquatiques). Différentes combinaisons entre tout ou partie de ces strates permettent d'obtenir une grande variété d'agencements végétaux adaptés à différents contextes (nature des sols, climat, etc), correspondant chacun à un capteur tridimensionnel d'une surface utile fortement démultipliée par rapport au modèle monoculturel.

Mettant à profit les connaissances issues de travaux dans le domaine de la phytosociologie²⁹⁷, l'association culturelle entre végétaux de différentes espèces est un autre grand classique d'agencement en permaculture, dont les adeptes sont en recherche permanente de compagnonnages de plantes (certains auteurs utilisent le terme de « guildes ») qui tirent le meilleur parti des complémentarités, synergies et effets positifs croisés : fertilisation par fixation d'azote, protection contre les nuisibles, utilisation optimale de l'espace racinaires, etc. Comptant parmi les associations culturelles les plus médiatisées en raison de son efficacité reconnue et de sa pratique courante, la technique agricole dite « des trois sœurs » (ou Milpa) consiste à planter sur une surface réduite le haricot (qui fertilise le sol en fixant l'azote de l'air par des bactéries — rhizobiums — vivant en symbiose avec ses racines), le maïs (qui sert de tuteur au précédent) et la courge (dont les feuilles couvrent le sol et en conservent l'humidité).

Des associations beaucoup plus complexes, regroupant au sein d'une même guilda végétale des dizaines d'espèces appartenant à différentes strates — depuis la canopée jusqu'au couvre sol et, bien sûr, la strate souterraine mycélienne qui joue un rôle fondamental dans la mise en relation des racines des membres d'une guilda *via* un réseau mycorhizien (Newman, 1988) — font l'objet de nombreux travaux expérimentaux pour augmenter les rendements.

Dans le domaine de la lutte contre les nuisibles, la technique *push-pull* (pousser-piéger) mise au point par l'entomologiste indien Zeyaur R. Khan consiste à repousser les insectes ravageurs

295/ D'autres termes, tels que « jardin-forêt », « agroforesterie », « forêt comestible » sont également utilisés.

296/ (1) la canopée (plus de 15m de haut : châtaignier, cerisier, robinier, chêne, hêtre, noyer, marronnier, cornier,...) ; (2) les petits arbres (entre 7 et 15m : arbres fruitiers, pommier, pêcher, prunier, poirier, mûrier,...) ; (3) les grimpantes (lianes nécessitant un support : vigne, kiwi, kiwaï, passiflore, chèvrefeuille, glycine tubéreuse, houblon...) ; (4) les arbustes (1 à 7m : noisetier, amandier, groseillier, cassissier, myrtille, sureau,...) ; (5) les herbacées hautes (graminées de plus de 50 cm, dont beaucoup sont vivaces : rhubarbe, chou Daubenton, fenouil, lupin, tomate cerise,...) ; (6) les herbacées basses (moins de 50 cm, non ligneuse : souci, plantain, chou marin, oseille,...) ; (7) la strate couvre sol (proche du sol, vivace se propageant horizontalement : fraise, origan, trèfle, sauge, ail des ours, roquette perpétuelle,...) ; (8) la rhizosphère (strate racinaire, développe des bulbes : topinambours, panais, yacon, crosne, noisette de terre, asphodèle,...) ; (9) la strate mycélienne (champignons, au dessus ou en dessous du sol : pleurote, shiitake, champignons noirs,...).

A l'objection qu'un menu issu d'une telle savane comestible manque cruellement de céréales il est possible de répondre, d'une part, que sur le plan nutritionnel, la farine de châtaignes est équivalente à la farine de blé ou de maïs (Shepard, 2016) et, d'autre part, que certains permaculteurs expérimentent avec succès la culture de variétés de blés adaptées à un milieu de type « forêt comestible » (Holzer, 2011).

297/ Discipline botanique qui étudie les communautés végétales

d'une culture principale et à les attirer vers la lisière du champ (Khan et Pickett, 2004) au moyen d'un agencement raisonné de plantes dotées de certaines propriétés (capacité biologique ou chimique de repousser, attirer, piéger, ... des insectes), qui permet d'éviter l'utilisation d'insecticides de synthèse ou de d'OGM, donc de techniques high-tech²⁹⁸.

L'agencement entre différents écosystèmes est également symptomatique des pratiques permacoles, notamment en raison de l'intérêt que présente, en termes de biodiversité, la zone de transition, ou écotone, qui est un milieu à fort potentiel productif²⁹⁹. C'est la raison pour laquelle les permaculteurs cherchent à maximiser le nombre d'écosystèmes et la longueur des frontières communes en leur donnant des formes ondulantes et « tourmentées ». Cela explique aussi l'importance accordée, dans les projets de permaculture, aux plans d'eau (qui offrent une interface entre milieu terrestre et milieu aquatique), aux amas de pierres accumulateurs de chaleur (interface entre un milieu chaud et sec et un sol vivant), aux haies (interface entre parcelle cultivée et forêt), etc.

Les caractéristiques de diverses espèces de plantes, se prêtant à jouer différents rôles (pare-vent, pare-soleil, réflecteur de rayonnement, etc), sont mises à profit au sein d'agencements spatiaux permettant de créer localement des conditions particulières, par exemple climatiques, favorables à certaines cultures. C'est le cas des diverses variantes de « pièges à chaleur », dispositifs plus ou moins en forme de U ouverts du côté sud (dans l'hémisphère nord) et dont les parois végétales, complémentaires à leur production alimentaire, font office à la fois de pare-vent et de réflecteur, faisant de la partie centrale un véritable îlot de chaleur. C'est ce type de dispositif (amélioré par des amas de pierres de couleur sombre jouant le rôle d'accumulateurs de chaleur et par une mare placée coté sud dont la surface réfléchit les rayons solaires vers l'intérieur du U) qui permet à Sepp Holzer de cultiver des citrons en pleine « petite Sibérie autrichienne » sans recourir à une serre.

Le maintien ou l'établissement de connexions entre adresses naturelles — essentiel à la bonne santé des écosystèmes donc à leur potentiel productif — fait également partie de cette famille d'agencements. La notion de « coulée verte », qui désigne habituellement un espace vert et protégé dans le cadre d'un plan d'urbanisation, relève de cette logique ; selon notre approche, la nécessité de son traitement en « sol vivant » doit néanmoins être mise en exergue, de même que sa vocation de maillon d'un réseau écologique d'échelle supérieure. La question de l'importance des corridors écologiques entre adresses naturelles — en lien avec les notions de « trame verte et bleue » et de « trame brune » — fait l'objet d'un développement au paragraphe 4.4.7. (Famille 7).

298/ Ce point est particulièrement important pour les agriculteurs n'ayant pas les moyens de recourir à ces « solutions » coûteuses, notamment dans certains pays africains. C'est d'ailleurs au Kenya que la méthode « push-pull » a fait ses preuves dans la lutte contre une variété de papillons de nuit dont les chenilles creusent des galeries dans les tiges de maïs. Des légumineuses d'une variété particulière (*Desmodium*) sont plantées entre les rangs de maïs, dont elles ne perturbent pas la croissance en raison de leur faible hauteur ; outre le fait de dégager des substances chimiques répulsives, elles améliorent la fertilité du sol en fixant l'azote de l'air, et sont de surcroît un aliment très nutritif pour le bétail. Des graminées indigènes plantées autour du champ « charment » les papillons par les substances chimiques émises. Des cultures d'herbe à éléphants piégeant le parasite par un liquide collant complètent le dispositif (Khan et Pickett, 2004).

299/ « L'effet de lisière est un facteur important. Il est reconnu par les écologistes que l'interface entre deux écosystèmes constitue un troisième système plus complexe, qui combine les deux. Sur cet interface, des espèces des deux systèmes peuvent coexister, et le milieu de lisière possède aussi ses formes de vie propres, spécifiques, dans de nombreux cas. » (Mollison, 1981, p.27)

Pour clore ce rapide aperçu d'exemples d'agencements destinés à accroître la production des adresses naturelles, soulignons, au risque de nous répéter, qu'en dépit de la multiplication d'expériences permacoles probantes, la question de leur caractère généralisable et de leur transposabilité reste ouverte³⁰⁰, tant il est vrai que chacune est ancrée dans un contexte précis, dont la connaissance *via* une observation minutieuse et inscrite dans le temps long constitue l'une des clés de succès. En d'autres termes, la réussite d'une expérience repose en grande partie sur un lien intime entre un terrain spécifique et le permaculteur qui en prend soin. Le caractère patrimonial des adresses naturelles n'en apparaît que plus prégnant.

4.4.2.- Agencements de famille 2

(apports à la ville BELT des agencements d'échelle humaine entre adresses naturelles et adresses artificielles, du point de vue de l'agronome).

Dans la continuité des exemples du paragraphe précédent, il convient de souligner qu'en raison de leur capacité à faire obstacle au vent, à réfléchir le rayonnement solaire, à accumuler la chaleur, à récupérer l'eau de pluie par les toitures, etc, les unités bâties des adresses artificielles sont susceptibles de modifier localement les conditions climatiques et de créer des effets de lisière, offrant au permaculteur de nouveaux éléments de contexte valorisables à des fins alimentaires ; par exemple, une façade orientée au sud devient le support privilégié de plantes thermophiles grimpantes comestibles (passiflore, kiwis, diverses variétés de vignes,...) augmentant le potentiel de la production alimentaire de proximité, en quantité et en diversité, et contribuant à l'enrichissement des écosystèmes.

En permaculture, le rôle du design dans l'augmentation de l'efficacité énergétique ne relève pas uniquement de la production proprement dite des adresses naturelles. D'autres registres sont concernés, en particulier la diminution de l'énergie des déplacements liés aux activités agricoles au travers d'une « optimisation par le design », qui renvoie au *zonage*, une notion fondamentale en permaculture. « *Le zonage réalisé depuis l'intérieur de la maison [...] est possible, un peu comme une bonne disposition ou agencement d'une cuisine obéit au principe directeur du moindre effort pour un résultat maximum. Ainsi, les zones représentent les valeurs ou catégories énergétiques inhérentes au système envisagé de l'intérieur, l'attention, les soins ou le contrôle qu'exige chaque plante ou groupe de plantes, les besoins domestiques en rapport avec chaque plante particulière, l'énergie ou le produit essentiel fourni par la ou les plantes, ou l'unité considérée* » (Mollison et Holmgren, 1986, p.70). Le zonage relève donc de l'agencement entre adresses artificielles (ici, la maison, donc une unité bâtie) et adresses naturelles.

D'une certaine manière, ce concept est apparenté au modèle d'économie spatiale de J.H. von Thünen, reposant sur une organisation théorique de l'espace en cercles concentriques autour d'une ville. Dans ce modèle, la mise en valeur d'une zone dépend de sa distance au centre : plus elle en est éloignée, plus la viabilité économique de certaines productions est faible. C'est ce même schéma qui est retenu en permaculture, à cette différence près que la ville (le centre des cercles) est remplacée par une unité bâtie (la maison, l'immeuble) et que le principe d'organisation de l'espace n'est pas la viabilité économique, mais la moindre utilisation d'énergie, puisque « *Le découpage en zones (distance du centre) est décidé par deux facteurs : (a) le nombre de fois que vous avez besoin de rendre visite à la plante, à l'animal ou à la structure ;*

300/ L'une des raisons de cette impossibilité à généraliser sous forme de recettes simples est la connaissance encore lacunaire du fonctionnement des sols vivants, invitant à un développement de la recherche académique dans ce domaine.

(b) le nombre de fois que la plante, l'animal ou la structure a besoin que vous lui rendiez visite. » Par exemple, un poulailler peut nécessiter un nombre de visites annuelles compris entre 400 et 500, alors que « l'on ne rendrait visite à un chêne que deux ou trois fois, pour ramasser des glands. » (Mollison, 1981, p.14).

Sans qu'il y ait de règle absolue dans ce domaine, six « zones de fréquence de visite » sont généralement définies, depuis les zones 0 (l'unité bâtie elle-même, maison ou immeuble) et 1 (le jardin potager et les éléments nécessitant une attention quotidienne et soutenue) jusqu'à la zone 5 (espace « sauvage » où l'intervention humaine se limite à la récolte des plantes utiles). Selon le contexte, l'étendue et la forme de chaque zone peuvent être très variables, de même que la manière dont elles sont organisées les unes par rapport aux autres. Par exemple, lorsque la pénibilité d'accès n'est pas proportionnelle à la distance à vol d'oiseau, le schéma des cercles concentriques n'a pas lieu d'être ; si la superficie du terrain est modeste, certaines zones peuvent se fondre avec d'autres ; des contraintes de voisinage, climatiques, topographiques, ... peuvent surdéterminer le zonage ; et ainsi de suite. La signification concrète de chaque zone est elle aussi variable : qu'est-ce que la zone 5 (« espace sauvage ») du jardin d'une maison de ville ou d'un pavillon ? A cet égard, de nombreux permaculteurs soulignent l'importance de préserver, à l'endroit le moins fréquenté du terrain, un espace « à l'abandon » (ne serait-ce que quelques mètres carrés) que le processus naturel de la succession écologique se chargera d'aménager et qui peut devenir un réservoir de biodiversité d'une richesse insoupçonnée.

Rappelons pour finir que les habitants des adresses artificielles sont une source de minéraux en voie de raréfaction (notamment le phosphore et l'azote³⁰¹) indispensable aux plantes. La gestion des proximités pour faciliter la circularité du système alimentation-excrétion est donc également du ressort des agencements de famille 2.

4.4.3.- Agencements de famille 3

(apports à la ville BELT des agencements d'échelle humaine entre adresses artificielles, du point de vue de l'urbaniste).

Au niveau des unités bâties, nous avons déjà évoqué, à la section 4.2., la contribution énergétique de l'agencement des volumes par la recherche d'un équilibre entre minimisation des déperditions thermiques et maximisation des apports du rayonnement solaire, tant sous l'angle de la chaleur que de l'éclairage naturel (ménager des puits de lumière évite le recours à l'éclairage artificiel). La référence à des formes historiques d'avant l'avènement de l'électricité est, à cet égard, une précieuse source d'inspiration. Par exemple, l'immeuble haussmannien ressemble à un bon compromis d'agencement qui intègre ces différentes contraintes (chaleur et lumière) : avec une valeur de près de 90 %, le taux de volume passif³⁰² des bâtiments parisiens de la seconde moitié du XIX^e siècle, leur permet de bénéficier dans une large mesure d'apports énergétiques passifs (Salat, 2011).

301/ L'azote n'est pas « rare », mais sa transformation en engrais assimilable par les plantes requiert des procédés énergétiquement coûteux, alors que l'urine humaine est utilisable directement moyennant quelques précautions relevant des low-tech.

302/ Part de volume bâti qui se trouve à moins de 6 mètres d'une fenêtre, qui permet de connaître le pourcentage de volume bâti qui peut bénéficier d'éclairage et de ventilation naturels. « Connaître cette proportion permet d'estimer le potentiel bioclimatique de la texture urbaine, et les besoins d'éclairage artificiel et de ventilation mécanique. Plus le volume passif sera important, moins d'équipements seront nécessaires pour éclairer et ventiler, et moins d'énergie sera dépensée à cela. » (Salat, 2011), p.506.

Toujours dans le domaine du bâti, rappelons que conformément à la typologie binaire retenue, les adresses artificielles accueillent toutes les activités des habitants non directement liées à la fonction « production », ce qui signifie que les échanges entre ces adresses répondent à ceux des besoins ne pouvant être satisfaits par les échanges avec les adresses naturelles. Mais contrairement à celles-ci, dont la fonction générique est de « produire », les adresses artificielles accueillent des fonctions variées.³⁰³ Comment, dans ces conditions, parler d'agencement spatio-fonctionnel sans entrer dans le détail de cette variété ? La réponse est à rechercher dans la mobilité des fonctions : car contrairement à celle (*production*) spécifique aux sols vivants, elles ne sont pas structurellement liées à une adresse fixe (sauf cas particulier, notamment la fonction « transport mécanique », prisonnière d'un site propre pérenne ; nous reviendrons plus loin sur cette question). De ce fait, elles sont potentiellement mobiles, si toutefois les unités bâties (le substrat) sont conçues (agencées) de manière à pouvoir les accueillir sinon toutes, du moins la plupart d'entre elles. Nous appelons **mutabilité**³⁰⁴ cette faculté du substrat artificiel à accueillir (moyennant adaptations limitées et, surtout, énergétiquement sobres) une grande diversité de fonctions. L'intérêt de cette caractéristique est qu'en cas de pénurie énergétique grave — éventualité servant de prétexte à la ville BELT —, la réduction forcée de la quantité et/ou de la portée des déplacements mécaniques pourrait nécessiter une réaffectation rapide de certaines fonctions de manière à permettre la satisfaction d'un maximum de besoins vitaux des habitants, selon une logique d'économie de proximité. D'une certaine manière, l'activation du « mode BELT » de fonctionnement de la ville est conditionnée par la mutabilité de ses composantes bâties³⁰⁵.

Le recours à l'agencement spatial à l'échelle du bâtiment est une manière de parvenir à cette mutabilité. L'immeuble haussmannien illustre bien cette idée, comme le montre un récent ouvrage consacré à ce modèle (Jallon, Napolitano, Boutté, 2017). Il s'agit d'un « immeuble de rapport à façade imposée » (c'est-à-dire que la fonction doit s'adapter à « l'enveloppe »³⁰⁶) d'une grande polyvalence, au sens où une même structure peut accueillir aussi bien des logements que des commerces, des bureaux, des hôpitaux, etc. Ce potentiel de variété d'affectation est dû à son caractère *généreux* : générosité des volumes (en particulier, la diversité des hauteurs sous plafond d'un étage à l'autre fait que toute affectation y trouve sa place) et générosité en matériaux de construction (car en raison de leur hyperstaticité, les murs peuvent servir de

303/ Rappelons que le regroupement de cette multitude de fonctions au sein d'une même catégorie est la conséquence du caractère à la fois générique et moins contraint en termes de fréquence de ce que nous avons appelé le « besoin de contacts humains ». Par exemple, la satisfaction du besoin de se soigner, de s'abriter ou de manger peut nécessiter, épisodiquement, le contact impératif avec un détenteur de savoir-faire : un médecin, un bâtisseur, un producteur d'outils agricoles. Cet exemple renvoie à la notion de division du travail, qui relève de l'une des multiples facettes de ce registre générique des « besoins de contacts humains ».

304/ Terme emprunté à l'architecte Jacques Lucan qui, dans son ouvrage *Où va la ville aujourd'hui ? Formes urbaines et mixités*, s'interroge sur l'ampleur de l'intervention nécessaire sur un bâtiment en cas de changement d'affectation, en lien avec le principe constructif (Lucan, 2012).

305/ Notons que d'autres approches peuvent être imaginées pour permettre des changements rapides de la répartition spatiale des fonctions en temps de crise. Par exemple, une approche « nomadiste » mènerait à la suppression pure et simple de toute infrastructure et superstructure fixe. Mais une ville conçue à partir d'éléments habituellement considérés comme « provisoires » ou « de fortune » (structures légères modulaires préfabriquées, voire des tentes, reliées par des dispositifs amovibles en guise de VRD : bandes de roulage posées sur le sol, canalisations et fils aériens, etc) obligerait les habitants à vivre en permanence — et simplement en prévision de l'éventualité d'une situation de pénurie — dans un cadre qui n'est pas celui d'une société sédentaire ; une option sans doute inacceptable... à supposer qu'elle soit souhaitable et, surtout, compatible avec une approche BELT (la fabrication de tels composants modulaires a de fortes chances de relever plutôt de la high-tech).

306/ Cette caractéristique offre par ailleurs un rapport intéressant entre l'individuel (puisque le projet adapté aux besoins du commanditaire) et le collectif (puisque la façade, standardisée, définit les rues qui sont des espaces collectifs).

support à d'éventuelles structures intérieures ajoutées *a posteriori*, permettant de modifier radicalement les volumes intérieurs en fonction des besoins)³⁰⁷.

La contrepartie de cette générosité dimensionnelle et statique³⁰⁸ est la profusion de matériaux de construction utilisés, en contradiction avec les principes de sobriété défendus par Philippe Bihoux en matière d'architecture, principes qui figurent parmi les idées fondatrices de la ville BELT. Cette contradiction peut néanmoins être levée par le recours systématique aux matériaux géosourcés (cette question a été développée à la section 4.3.) dont la disponibilité et la sobriété énergétique d'utilisation autorise le « surdimensionnement vertueux » nécessaire à la mutabilité des éléments du bâti, qui en est, répétons-le, une caractéristique fondamentale.

Car en diversifiant l'offre par sa structure même à l'échelle de l'immeuble et de l'îlot, cette mutabilité augmente le potentiel de *mixité*³⁰⁹ à l'échelle du quartier, donc les possibilités d'accéder à pied à un maximum d'adresses aux fonctions complémentaires. Par ailleurs, en permettant une réaffectation fonctionnelle sans modifications conséquentes (et énergivores) du bâti, elle facilite le passage en mode BELT des activités destinées à satisfaire les besoins vitaux des habitants dans l'éventualité d'une pénurie énergétique.

De manière analogue à ce qui a été dit à propos des unités bâties, certaines caractéristiques des infrastructures-supports des déplacements — et plus précisément des déplacements à pied dans le cas présent (échelle humaine) — peuvent elles aussi contribuer au fonctionnement en mode BELT de la ville. C'est en tout cas ce que suggèrent certains des travaux autour de la notion de « marchabilité », dont ceux dans la mouvance du *Transit Oriented Development* : le *Design*³¹⁰ des espaces publics rendant la marche à pied plus attractive, celle-ci se développe au détriment des modes mécanisés et les déplacements deviennent ainsi énergétiquement plus sobres. Cela suppose néanmoins que l'impact incitatif du *design* soit avéré. Il est vrai que la connaissance dans ce domaine reste encore lacunaire, comme le montrent Ann Forsyth et Kevin Krizek dans un article s'attachant à analyser un important corpus de plus de 300 études de cas (menées dans différentes régions du monde — Amérique, Europe, Océanie,...) en vue d'en dégager les principaux enseignements relatifs aux stratégies pouvant être mobilisées afin d'encourager la pratique de la marche à pied et du vélo (Forsyth, Krizek, 2010). L'un des résultats est le constat d'absence d'effets reconnus de l'infrastructure³¹¹ — c'est-à-dire de caractéristiques (relevant du *design*) de cette dernière et des équipements afférents — sur l'attractivité pour le piéton (ou le cycliste). Malgré cela, une abondante littérature³¹² — reposant aussi bien sur des travaux aca-

307/ Il est à noter que cette générosité permet d'expliquer le caractère générique de ce modèle d'immeuble standardisé, qui est l'unique « brique » de base de tout le Paris haussmannien.

308/ Qui est à l'opposé d'une logique de « dimensionnement au plus juste », en volumes et en matériaux. C'est de cette logique que relève le **macro-lot** (pour reprendre le terme inventé par l'architecte Jean-Louis Subileau), une solution spatiale sous-tendue par l'idée de rassembler un maximum de mixité dans un espace aussi réduit que possible, sorte de quartier fermé (« isolat à la manière d'un Mont-Saint-Michel »), certes sobre en énergie de chauffage (en mixant logements et bureaux, par exemple, il permet des échanges thermiques intéressants), mais dont la mutabilité est quasi inexistante en raison d'une imbrication de volumes dont chacun est optimisé selon la fonction qui lui est affectée (Lucan, 2012).

309/ Qui correspond au deuxième « D » du triptyque « *Density-Diversity-Design* » résumant les principes d'aménagement du TOD.

310/ Troisième D du triptyque *Density-Diversity-Design*.

311/ « [...] *infrastructure has unclear utility* » (Forsyth, Krizek, 2010, p. 435).

312/ Depuis plusieurs décennies, un certain nombre de guides, de recueils de savoir-faire et d'ouvrages destinés aux responsables, professionnels, techniciens et projecteurs de la voirie urbaine, ont été édités notamment par le CETUR (puis le CERTU). Le document intitulé « Bonnes pratiques... : à pied, à vélo... », publié par le GART en avril 2000, offre un bon aperçu synthétique dans ce domaine. Depuis cette date, il est d'ailleurs cité dans la

démiques que sur des retours d'expériences *in situ* et des avis de professionnels — s'attache à présenter un choix de bonnes pratiques en termes d'aménagement des espaces publics urbains en vue de répondre aux besoins de la marche à pied (*pedestrian-oriented infrastructures*). S'il est vrai que certains des éléments mis en avant relèvent encore de la conjecture, l'étude de ces publications permet de mettre en évidence, par recoupements, un certain nombre d'éléments consensuels censés contribuer — du moins potentiellement — à l'attractivité pour le piéton (*walkability* ou « marchabilité ») de ces espaces (Stransky, 2011)³¹³. Bien qu'elle soit difficile à saisir sous ses multiples facettes et qu'elle fasse l'objet de débats aussi bien dans les milieux académiques que professionnels (Forsyth, 2015), la marchabilité n'en reste pas moins susceptible d'être appréhendée, selon nombre d'auteurs, par des caractéristiques mesurables. Parmi elles, certaines relèvent de l'agencement des infrastructures-supports des déplacements, comme leur maillage (Salat, 2011³¹⁴), qui est une manière de quantifier la « perméabilité des quartiers aux modes actifs », une caractéristique promue par différents auteurs (Mangin, 2008 ; Héran, 2011a ;...) et professionnels³¹⁵.

Diminution des besoins énergétiques de chauffage et d'éclairage des bâtiments par des volumes judicieusement emboîtés, orientés et évidés ; développement du potentiel de mixité, donc d'accès à une grande variété de fonctions, par des bâtiments rendus « mutables » grâce à leurs configurations et dimensionnements généreux ; accroissement de l'accessibilité piétonne par des espaces publics rendus « marchables » grâce à leur maillage et à certains éléments de leur design : trois exemples de contribution de cette famille d'agencement au fonctionnement BELT d'une ville.

A ces trois exemples s'en ajoute nécessairement un quatrième (laissé pour la fin car, d'une certaine manière, il opère la transition avec la famille d'agencements suivante) : l'apport de la *densité*. Correspondant au premier « D » du *Transit Oriented Development*, son importance est considérée comme première par la plupart des auteurs s'intéressant à l'influence de la forme urbaine sur la durabilité des villes, en référence à la célèbre courbe de Newman et Kenworthy³¹⁶. De ce fait, une densité aussi élevée que possible apparaît de prime abord comme une caractéristique évidente d'une ville BELT. Ce serait oublier que la spécificité de cette dernière est l'impératif d'agencer, à l'échelle humaine, adresses naturelles et adresses artificielles, question traitée au paragraphe suivant.

bibliographie de nombre de publications ayant trait à la mobilité durable : fiches synthétiques (CERTU, 2006), publications de l'IAURIF (IAU-IDF, 2009), rapports réalisés à l'occasion d'études dans le cadre de la mise en place de PDU, etc.

313/ Dans le cadre de cette étude de quartiers de gare est proposé un regroupement de ces différents éléments en cinq familles (fluidité, sécurité, lisibilité, services, ambiance) considérés comme autant de critères de marchabilité.

314/ Serge Salat fait figurer des indicateurs issus de la Théorie des graphes (connectivité) parmi les mesures pertinentes de l'accessibilité piétonne : en effet, la multiplication des chemins possibles au sein d'un quartier permet souvent de réduire les distances à parcourir par « effet diagonale » et rend davantage de lieux accessibles facilement aux piétons (Salat, 2011, p.501).

315/ Qui sont de plus en plus nombreux à accorder une grande importance à cette caractéristique. Par exemple, dans ses projets urbains, l'architecte Philippe Madec multiplie systématiquement venelles et passages pour perméabiliser la ville aux piétons. Nécessitant des acquisitions foncières limitées, cette perméabilisation permet de raccourcir les cheminements pédestres et cyclistes.

316/ (Newman & Kenworthy, 1989).

4.4.4.- Agencements de famille 4

(apports à la ville BELT des agencements d'échelle humaine entre adresses naturelles et adresses artificielles, du point de vue de l'urbaniste).

L'un des enjeux des agencements de cette famille est de permettre aux habitants d'accéder (idéalement sans recours aux transports mécanisés) depuis les adresses artificielles aux adresses naturelles. Ces dernières sont ici considérées sous l'angle du potentiel à leur fournir, de manière renouvelable, les ressources nécessaires à la satisfaction de certains de leurs besoins vitaux. Des ordres de grandeur de surfaces nécessaires ont été proposés en conclusion de la section 4.3. : 450 m² d'adresses naturelles pour 50 m² d'adresses artificielles par habitant. Ces valeurs donnent une idée de la densité d'une ville BELT — 20 habitants à l'hectare — qui correspond aux configurations étalées et peu denses des villes américaines de la courbe de Newman et Kenworthy, caractérisées par des énergies élevées de déplacements.

Cette densité faible est cependant inhérente au principe même de la ville BELT et n'est donc pas négociable³¹⁷. Il ne s'agit pas ici de la remettre en question, mais de s'interroger sur différentes manières de la répartir. Dit autrement, nous nous proposons de questionner la pertinence, en termes d'apport au fonctionnement BELT de la ville, de diverses configurations urbaines à densité moyenne d'habitants donnée (20 hab/ha), en sachant que chaque configuration étant une manière de répartir les adresses artificielles (notamment le bâti), elle est aussi une manière de « répartir cette densité »³¹⁸.

Notre démarche consiste à raisonner en termes de *potentiel* d'un agencement à rendre possible, en cas de pénurie énergétique grave, l'adoption rapide (et sans transformations structurelles) de modes de vie sobres. C'est donc dans l'hypothèse d'une situation extrême que nous commençons par mener notre réflexion, avant de nous interroger sur la compatibilité des principes d'agencement qui en découlent avec un fonctionnement dans un contexte plus « normal », hors situation critique.

Pour rappel, dans la définition de l'échelle humaine proposée en début de section, la conjecture retenue est qu'en cas de pénurie, la portée des déplacements « normalement réalisables à pied » par la plupart des habitants en vue de satisfaire à leurs besoins vitaux pourrait être de quelques kilomètres (3 à 4 km ?). Une superficie comprise entre 5 et 10 km² semble alors être un bon ordre de grandeur pour une zone d'accessibilité piétonne circulaire dans un contexte énergétiquement contraint³¹⁹. Dans cette hypothèse, la « bonne » manière d'imbriquer les adresses artificielles et les adresses naturelles au sein de cette zone ne dépend que de la hiérarchie des priorités individuelles des habitants en termes de proximités souhaitées, arbitrages qui se tra-

317/ Cette idée est à rapprocher de la question soulevée par l'ouvrage collectif *Densifier/dédensifier, penser les campagnes urbaines* (sous la direction de Jean-Michel Léger et Béatrice Mariolle) à propos de la menace que représente la pression démographique et urbaine pour le potentiel durable des « campagnes urbaines », ces territoires qui ne sont « ni ville ni campagne » et qui connaissent une forte croissance démographique depuis trois décennies (Léger & Mariolle, dir., 2018).

318/ Le terme générique de densité recouvre plusieurs réalités différentes : la densité de population (habitants ou emplois à l'hectare), la densité de logements (à l'hectare) et la densité du bâti (Salat, 2011, p.490). C'est cette dernière (surface de planchers divisée par la surface de la parcelle) qui est retenue ici pour qualifier la capacité d'une adresse artificielle à accueillir des activités humaines (au sens large). Bien qu'il soit faux de l'assimiler à une densité de population, elle constitue néanmoins, au premier ordre, une estimation de cette dernière. En première approximation, la répartition des densités du bâti (« configuration urbaine ») traduit la répartition des densités de population.

319/ C'est d'ailleurs, sans surprise, l'ordre de grandeur correspondant aux villes médiévales augmentées de leurs faubourgs.

duisent notamment par différents choix du niveau de mutualisation des activités liées à la gestion des sols vivants : à un extrême (absence de mutualisation), on trouve des maisons individuelles isolées, chacune au milieu de « son » lot de sol vivant producteur, dont la proximité est privilégiée par rapport à celle d'adresses artificielles ; l'autre extrême correspond à un regroupement de toutes les adresses artificielles en un « bloc » compact et dense, privilégiant les proximités immédiates entre ces dernières au détriment de celles avec les adresses naturelles (cette option est plus en accord avec une mutualisation et/ou une division du travail d'exploitation des sols vivants, sous forme, par exemple, d'un système d'approvisionnement et de recyclage fondé sur des fermes et microfermes dans un rayon de quelques kilomètres autour de la zone dense bâtie). Entre ces deux extrêmes prennent place des agencements intermédiaires³²⁰, chacun résultant d'une combinaison, à différents degrés, de préférences individuelles, sans qu'il soit possible d'affirmer lequel est le plus sobre en énergie de déplacement, surtout dans un contexte où ces derniers sont supposés être essentiellement réalisés à pied.

La diversité de l'offre est une manière de répondre à cette diversité de préférences individuelles, et donc de renforcer l'acceptabilité d'une configuration par les habitants. Dit autrement, « satisfaire tout le monde » peut consister à faire se côtoyer, en les articulant, un nombre important de densités du bâti.

Un exemple de « principe » conciliant la coprésence (cohabitation) des extrêmes et de toute une gamme de configurations intermédiaires est celui de la dilution spatiale du bâti selon un processus fractal, une piste explorée dans les domaines de la géographie et de l'urbanisme depuis plusieurs décennies³²¹. Ces dernières années, des travaux de ce type — notamment ceux mettant en œuvre des approches multi-fractales (« fractalité par morceaux ») — ont donné lieu à un développement de nouveaux outils informatiques proposant des fractales « *qui pourraient satisfaire beaucoup de nos exigences actuelles : TOD, ville durable, résilience, liaison architecture/urbanisme.* » (Dupuy, 2021). Une récente étude réalisée dans le cadre d'un travail collectif³²² illustre l'intérêt que pourrait présenter un modèle de type fractal comme fondement d'un parti d'aménagement dont l'une des priorités serait (en lien avec le présent document) la circularité du processus alimentation/excrétion dans un contexte urbain : « *En préservant et en créant des aires non bâties de sols vivants³²³ spatialement hiérarchisés, ce modèle crée en effet de potentielles « niches écologiques » offrant des opportunités multiples (aux particuliers, aux associations, aux professionnels,...), adaptées à un maximum de goûts, de besoins et de contraintes, pour développer des activités de recyclage des excréta par diverses formes*

320/ Par analogie (mais à une autre échelle), on peut rapprocher cette variété d'agencements à celle que Florent le Néchet illustre par les 6 formes d'usage du sol pour une même densité de population (Le Néchet, 2010, p.166-167).

321/ L'intérêt d'une organisation de type fractal d'une ville est souligné par différents auteurs. Selon Serge Salat, par exemple, le respect de ce type d'organisation est une manière d'assurer une diversité de taille des parcelles dans la ville « *pour faciliter les différentes fonctions et activités* » (Salat, 2011), p.501.

322/ Bonin *et al.*, 2020.

323/ Cette précision est importante, car le caractère « non bâti » seul ne suffit pas, tant il est vrai qu'il faut du temps à un sol vivant de se constituer. Des sols vivants intimement imbriqués entre les surfaces bâties est la condition *sine qua non* pour qu'il soit possible, en cas de besoin, de prendre du jour au lendemain la décision de planter des cultures alimentaires. Ce mélange intime multiscalair d'espaces bâtis et de sols vivants pourrait utilement être complété par la préconisation, chaque fois qu'un arbre ou un arbuste est planté dans les espaces publics, d'opter systématiquement pour un fruitier, d'essence adaptée aux conditions locales. Cette mesure serait d'autant plus pertinente que les écosystèmes les plus productifs sont les savanes (forêts clairsemées avec étagement en strates) qui optimisent la captation par les plantes de l'énergie solaire, donc la transformation de cette dernière en biomasse / nourriture (Shepard, 2016). La plantation systématique de fruitiers, qui ne deviennent productifs qu'au bout de plusieurs années, serait une manière d'anticiper l'éventualité d'avoir à transformer rapidement les espaces publics en « savanes comestibles ».

d'agriculture urbaine (pouvant, en cas de besoin, s'orienter vers une production alimentaire intensive) à différents « degrés de proximité », depuis la cour d'immeuble (voire le balcon ou la façade³²⁴) jusqu'à l'exploitation agricole d'envergure régionale, en passant par toute la gamme des échelles intermédiaires — îlot, quartier, commune, ... Et, en prime, de nombreux bénéfices collatéraux : car l'apport « en continu » du produit du compostage des excréments, et donc l'augmentation progressive — au sein de tous ces « vides » qui irriguent la ville à toutes les échelles — de la couche d'humus agissant comme une éponge, conduit, lors des périodes de fortes pluies, à la limitation des excès d'eau (donc du risque d'inondation), de l'effet des lessivages et d'érosion du sol, et à l'inverse, en période de sécheresse, à la restitution lente de l'humidité absorbée et à la réduction de l'évaporation (d'où économies importantes « d'or bleu »). Donc au final, à l'augmentation de la résilience face à la grande inconnue des effets du changement climatique. » (Stransky, 2020, p.97).

Cette conclusion sur l'intérêt de la diversité de l'offre rejoint celle menée à propos de la mutabilité des unités bâties au paragraphe 4.4.3. (Famille 3) : une offre variée démultiplie les possibilités de relocalisations (sans nécessiter de modifications structurelles) en cas de changement radical du contexte énergétique. Elle est donc une manière d'anticiper de tels changements. C'est à ce titre qu'elle apporte une contribution au potentiel de fonctionnement BELT d'une ville.

Mais d'autres apports de cette même famille d'agencements peuvent être évoqués.

L'architecture bio-climatique en est un exemple : l'élément végétal (adresses naturelles) peut être agencé de différentes manières avec l'élément minéral (adresses artificielles), par exemple de manière à jouer un rôle d'écran de protection saisonnier (arbres à feuilles caduques faisant ombrage aux façades sud en été et laissant passer le rayonnement solaire en hiver) ou permanents (végétaux à feuilles persistantes faisant office de paravent protégeant les bâtiments du côté des vents dominants).

Ces dernières années, des travaux de plus en plus nombreux s'attachent à mettre en évidence les apports de tels agencements³²⁵. Certains soulignent le potentiel qu'offre la végétalisation des toits et des murs en termes de régulation de leur température, et donc de l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur, mais également d'amélioration du confort thermique et de diminution des besoins énergétiques des bâtiments. Ainsi : la réduction de la température des toits par leur végétalisation pourrait être de l'ordre de 12°C en été (Bevilacqua *et al.*, 2016) ; la différence entre les deux côtés d'un écran végétalisé pourrait atteindre 10°C, la différence moyenne étant de 5°C dans les pays européens méditerranéens (Perini *et al.*, 2017) ; selon ces mêmes auteurs, le potentiel des façades végétalisées en termes d'économie d'énergie de climatisation serait de l'ordre de 26% durant les mois d'été ; concernant les toits, leur végétalisation réduirait la consommation d'énergie de climatisation des bâtiments d'un pourcentage compris entre 60 et 70%, ou entre 45 et 60%, selon que la couleur du toit est foncée ou claire (Silva *et al.*, 2016) ; par ailleurs, elle pourrait réduire leurs besoins de chauffage de 10% à 30% (Besir et Cuce, 2018) ; etc.

L'intégration de l'élément végétal aux itinéraires piétons et cyclistes (« voies vertes »)

324/ Cf. par exemple l'ouvrage *Mon petit jardin en permaculture : durable, esthétique et productif* de Joseph Chauffrey, où l'auteur explique comment transformer un minuscule jardin en un lieu vivant et ultra-productif en optimisant les moindres espaces disponibles : toit du garage, bottes de paille sur la terrasse, cultures verticales...

325/ Une tendance confirmée par le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2022) qui, de manière plus générale, fait état d'un nombre croissant de publications relatives aux NBS (*nature-based solutions*) face au changement climatique.

— donc une forme d'imbrication entre adresses inertes (chaussée) et vivantes (végétaux) — aurait, selon certains auteurs, un effet incitatif pour la pratique des modes actifs, s'accompagnant d'économies d'énergie de transport par effet de report depuis les modes motorisés. Bien que nécessitant une confirmation par des travaux complémentaires (IPCC, 2022), des résultats de ce type n'en sont pas moins considérés par un nombre croissant de villes comme un élément important de leur stratégie d'aménagement (Nieuwenhuijsen & Khreis, 2016 ; Nieuwenhuijsen, 2020).

4.4.5.- Agencements de famille 5

(apports à la ville BELT des agencements d'échelle mécanique entre adresses artificielles, du point de vue de l'urbaniste).

Contrairement aux agencements d'échelle humaine dont traitent les quatre familles précédentes, ceux relatifs à l'échelle mécanique mobilisent, par construction, les adresses des sites propres aux transports motorisés. L'enjeu de l'agencement à cette échelle n'est plus de contribuer à satisfaire aux besoins vitaux des habitants sans recours à l'énergie autre que musculaire, mais de minimiser celle-ci lorsqu'il est indispensable d'y avoir recours, notamment pour les déplacements. Dit autrement, à l'échelle mécanique, un agencement d'adresses est conforme à la logique BELT s'il favorise leur mise en contact *via* des modes certes motorisés, mais aussi low-tech que possible.

Pour rappel, les réseaux les plus lourds — les plus structurants, les plus consommateurs de ressources et producteurs de déchets, de nuisances ou de désordres — sont ceux des transports de biens et de personnes. Leurs lourdeurs dépendent des modes choisis : marche, vélo, bus, tramway, métro, train, voiture ou camion. Les modes dits actifs (marche, vélo, roller,...) sont par nature les plus frugaux. Parmi les modes motorisés, les transports collectifs, en particulier les systèmes guidés, sont les plus sobres parce qu'ils font converger davantage les trajectoires ou trajets, en s'alliant aux modes actifs, et font mettre en commun des moyens réduits (nombre de véhicules, puissance installée et kilomètres de voie) qui de plus peuvent profiter de techniques de roulement et de traction fiables, sobres et propres, en particulier grâce au guidage mécanique³²⁶.

Minimiser l'énergie liée aux déplacements motorisés au sein d'une ville revient, d'une part, à la doter d'un mode sobre et, d'autre part, à minimiser l'énergie nécessaire pour accéder à ce mode depuis n'importe quelle adresse artificielle.

Sur le premier point, un argumentaire en faveur des modes collectifs ferrés a été proposé à la section 4.3. (paragraphe 4.3.2.) : outre sa frugalité énergétique par unité transportée³²⁷, la faible emprise au sol des rails comparée à celle des espaces de circulation des modes routiers motorisés³²⁸ est une caractéristique essentielle dans le cadre d'une ville où la préservation des

326/ (Soulas & Wahl, 2010), p. 203-215. Plus vite signifie plus de puissance et d'énergie ; pourtant, grâce au guidage ferroviaire, le TGV consomme bien moins que la voiture par passager et par kilomètre.

327/ Conditionnée néanmoins par un taux de remplissage correct.

328/ Plusieurs études mettant en œuvre différentes approches par le débit font apparaître la voiture individuelle comme le mode le plus consommateur d'espace de circulation : « *Selon ces sources et leurs hypothèses, pour une même superficie, la voiture transporte 12 à 33 fois moins de personnes que les transports publics lourds* » (Héran et Ravalet, 2008, p.26). Par exemple, l'UITP rappelle ainsi que pour transporter 50 000 personnes par heure et par direction, il faut 175 m de largeur pour les voitures, alors qu'une emprise de 9 m de large pour un métro ou

sols vivants (beaucoup trop précieux pour être artificialisés) fait office de priorité absolue. De même que nous avons souligné l'importance d'une certaine *générosité dimensionnelle* des unités bâties pour leur garantir la mutabilité (paragraphe 4.4.3.), de même nous insistons ici sur l'importance de la *parcimonie surfacique* des réseaux de transport.

C'est donc sur les modes ferrés de surface que repose essentiellement le système de transport motorisé d'une ville BELT, plus précisément sur le tramway (« et assimilé », pour le fret), notamment en raison de sa compatibilité avec la logique low-tech, aussi bien pour les infrastructures (énergétiquement moins coûteuses que celle du métro, par exemple, et nécessitant peu d'entretien du fait des faibles vitesses d'exploitation) et de matériel roulant (ne requérant pas forcément un « contenu technologique » élevé pour être fonctionnel). Ce choix est d'autant plus en accord avec la démarche BELT qu'en cas de pénurie énergétique particulièrement grave qui interdirait temporairement toute circulation de véhicules motorisés, les rails offrent la possibilité de mettre en place un système de transport performant à traction animale. Si les modes routiers motorisés (y compris la voiture particulière) ne sont pas bannis, la surface qui leur est allouée dans les espaces publics³²⁹ est limitée³³⁰ de manière radicale, toujours dans une logique de parcimonie, tant énergétique que spatiale.

Concernant le second point — l'accès aux « portes d'entrée des réseaux » depuis l'ensemble des adresses à desservir — rappelons que si l'amélioration de l'offre de transports collectifs, pour que le citoyen abandonne sa voiture, constitue l'un des outils de l'urbanisme durable, les aménagements choisis depuis plusieurs décennies donnent la priorité à l'automobile, dont la vitesse et le besoin d'espace ont radicalement transformé les formes urbaines, les ayant « éparpillées par petits bouts, façon puzzle »³³¹. Or dans une ville modelée par et pour la voiture particulière, le transport collectif ne peut être efficace : pour assurer la desserte de fonctions urbaines dispersées et viser un taux de remplissage rentable de ses véhicules, ses lignes suivent des tracés sinueux et fourchus et ses fréquences sont faibles. De plus la congestion automobile le ralentit aux heures de pointe. Au final, l'attente, la lenteur et l'inconfort le rendent peu attrayant et non compétitif face à l'automobile.

Comme le montrent de nombreux travaux³³² — apparentés à ceux évoqués au paragraphe 4.4.3. (famille 3) mais qui, à la différence de ces derniers, abordent la marchabilité (et la cyclabilité) non pas « en général », mais plus spécifiquement sous l'angle de la complémentarité entre modes actifs et transports collectifs³³³ —, une manière de redonner de l'attractivité aux lignes de transport collectif est de repenser les quartiers autour de leurs stations, conçues comme des pôles d'échanges (Menerault, *dir.*, 2006).

un RER suffit (selon cette étude, le rapport est donc de 1 à 20). Et encore, ces approches par le débit ne tiennent pas compte de l'emprise réelle d'une voirie qui, pour les modes non guidés, est bien plus large quand les vitesses autorisées sont élevées.

Il est à noter que l'argument du « gaspillage d'espace » occasionné par un système de transport accordant une large place aux voitures particulières **reste valable même dans le cas d'une motorisation électrique.**

329/ OÙ, d'ailleurs, « l'effet repoussoir » vis-à-vis des modes actifs (notamment la bicyclette) d'une présence massive de la voiture particulière est désormais un fait solidement établi par une abondante littérature (Dusong, 2016).

330/ Y compris au travers de dispositifs visant à réduire leur impact imperméabilisant (par exemple, recours à des matériaux de revêtement poreux, remplacement de la chaussée par des bandes de roulage entre lesquels peut prendre place un ruban de sols vivants, etc).

331/ (Wiel, 2002)

332/ (Consortium Bahn.Ville, 2005); (Collectif Bahn.Ville 2, 2009); (Stransky, 2011); (Stransky, 2017); (Vivre en ville, 2013); (Maulat & Krauss, 2014); (Zelezny, 2016) ;...

333/ Par exemple dans le cadre d'un « quartier de gare », d'un pôle d'échanges, etc. (Menerault, *dir.*, 2006).

C'est cette logique qui sous-tend le concept de *Transit Oriented Development* (auquel nous avons déjà abondamment fait référence).

C'est sur elle que repose également la *Ville Creuse* (Maupu, 2006), utopie urbaine ayant alimenté une réflexion — et donné lieu à un certain nombre de travaux auxquels j'ai apporté ma contribution³³⁴ — autour des grands potentiels de réduction des contradictions et des besoins qu'offre l'organisation des espaces aux systèmes dynamiques. Dans la mesure où, d'une part, cette réflexion repose sur la même logique « d'exploration de potentiels » que nous avons retenue dans le cadre de ce travail et, d'autre part, le mode principal du système de transport motorisé de cette ville imaginaire est également le tramway, nous reprenons ici le modèle en tant qu'illustration d'agencements BELT de famille 5.

Un renversement radical de paradigme est à la base de l'organisation spatiale de la Ville Creuse : au lieu d'adapter le tracé des lignes du transport collectif à une forme urbaine transformée par l'automobile, il s'agit d'adapter la forme urbaine à un tracé « au potentiel efficace », autrement dit de la subordonner aux critères objectifs et globaux d'optimisation des transports les plus sobres : critères physiques, techniques, économiques, sociaux, écologiques... et non à ceux des acteurs ou opérateurs, plus souvent subjectifs et réducteurs. Des réflexions voisines concernent la circulation des biens.

Les *trois principes* fondateurs du modèle relèvent tous du seul agencement spatial ou spatio-fonctionnel. Chacun d'eux correspond à un type d'espace (ligne, surface et volume), un niveau d'intégration dans l'organisation spatiale (ville, quartier et bâtiment) ou une échelle de la planification (urbanisme, aménagement et architecture).

A l'échelle de la ville, le *premier principe* (**figure 9**) consiste à *planifier les transports collectifs et de fret selon un tracé en boucle(s)* de taille et forme appropriées. Pour justifier le choix de ce tracé, commençons par rappeler que l'efficacité d'une ligne de transport collectif étant directement liée à la distance à pied entre, d'une part, une origine ou une destination et, d'autre part, une station de cette ligne, la seule forme urbaine où toute origine et toute destination est correctement desservie est une forme linéaire (pas forcément continue). Cette idée n'est pas nouvelle : au XIX^e siècle déjà, Arturo Soria y Mata l'a exploitée pour sa *Ciudad linéal* étirée le long d'un chemin de fer. Mais comparée à une ligne possédant deux extrémités, la boucle présente un certain nombre d'avantages (Maupu et Stransky, à paraître) :

- Du point de vue topologique, la ligne ouverte s'apparente à un réseau arborescent, la boucle à un réseau maillé ; une seule coupure (accident grave, par exemple) suffit pour séparer en deux la première, contrairement à la seconde. La boucle est plus robuste que la ligne.

- Du point de vue de la localisation, tous les points de la boucle ont les mêmes potentiels d'accès au (et du) reste de la boucle et les mêmes chances d'être traversées par les trajets ; et tout tronçon unitaire participe de la même manière à la fermeture de la boucle. La boucle est plus équitable.

- Du point de vue de l'exploitant, la partie centrale d'une ligne voit un trafic plus intense que ses extrémités alors que le trafic peut être mieux réparti tout au long du tracé d'une boucle, sous réserve d'une bonne distribution des générateurs de trafic (de biens ou de personnes). La boucle abolit « l'effet terminus », elle homogénéise le taux de remplissage des véhicules et augmente la fréquentation.

334/ Entre 2008 et 2017, cette utopie a fait l'objet d'une dizaine de travaux d'étudiants (mémoires de master) et a suscité des collaborations ayant donné lieu à plusieurs communications (colloques internationaux) et publications (Stransky et Maupu, 2011 ; Stransky, 2014 ; Maupu et Stransky, 2015 ; Maupu et Stransky, 2017 ; Maupu et Stransky, à paraître).

- Enfin, du point de vue de l'utilisateur, les véhicules se déplaçant dans les deux sens, chaque point de la boucle peut être atteint par deux chemins différents (bien que ceux-ci ne soient pas équivalents en temps de transport, sauf lorsqu'origine et destination sont diamétralement opposées) ; et par rapport à la ligne, la boucle double la fréquence de desserte.

Ce premier principe se réfère à une *espace à une dimension*, celle, dite longitudinale, du tracé commun des boucles, le long duquel est autorisée une bonne **vitesse** des mouvements motorisés des personnes et des biens (chaque boucle de transport ferré est doublée d'une boucle routière). La grande rareté des carrefours (en vertu du principe 2, cf. plus loin) fluidifie ces flux longitudinaux.

Ces quelques éléments illustrent l'apport d'un type particulier d'agencement spatial d'une infrastructure de transport — le tracé proprement dit de l'infrastructure du mode principal et son articulation avec celles des autres modes — à l'optimisation de son exploitation, et donc au *potentiel de réduction de consommation d'énergie de déplacement par unité transportée*. Notons que ce qui est vrai pour les transports l'est également pour les autres réseaux techniques : une boucle avec des ramifications de faible longueur suffit pour assurer la distribution d'eau, d'électricité, de gaz, de chaleur, de marchandises, de courrier ou d'information, ainsi que la collecte de déchets et d'eaux usées. Il est plus facile d'imaginer de nouvelles solutions, de nouveaux services, un meilleur taux de recyclage,...

Les potentiels de sobriété d'un agencement en boucle à l'échelle mécanique semblent donc multiples.

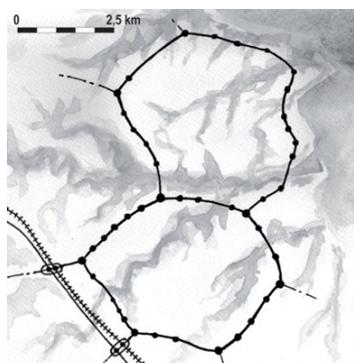


Figure 9

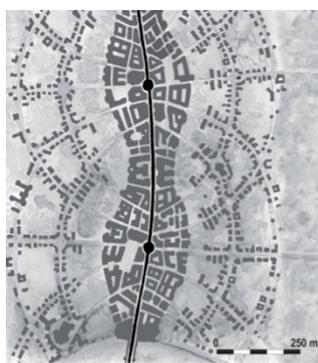


Figure 10

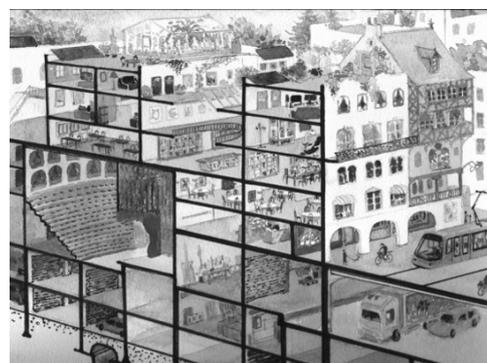


Figure 11

(Maupu et Stransky, à paraître)

Les deux autres principes du modèle (figures 10 et 11) s'apparentent à la réflexion menée aux paragraphes *Famille 3* et *Famille 4*, mais à deux différences près : d'une part, l'abandon de l'hypothèse que nous y avons explorée — celle d'une contrainte énergétique rendant impossible le recours au transport motorisé³³⁵ ; d'autre part, la prise en considération d'une adresse particulière — la « porte d'entrée » au réseau de transport.

335/ Pour rappel, le présupposé dans une telle éventualité est l'extension « par nécessité » la zone d'accessibilité piétonne. En l'absence d'une telle contrainte (situation considérée aujourd'hui comme « normale »), la frontière entre les déplacements d'échelle humaine et d'échelle mécanique est inférieure au kilomètre), et l'enjeu du fonctionnement BELT de la ville relève du registre de la minimisation (et non plus de l'élimination) de l'énergie nécessaire aux déplacements mécaniques.

Le *deuxième principe* (**figure 10**) concerne l'échelle du quartier. Il consiste à favoriser la densité du bâti au voisinage de chaque station de transport collectif et le long de la boucle (densité qui peut décroître avec la distance à ces dernières, une décroissance qui fait écho à l'idée de la dilution spatiale selon un processus fractal débattue au paragraphe 4.4.4.) et à planifier un réseau serré de rues, places et passages facilitant l'accessibilité à la station, de préférence en modes actifs (marche, vélo, etc), donc en accord avec les notions de marchabilité et de cyclabilité évoquée plus haut (paragraphe 4.4.3.). En tout point d'un cœur dense, pour rejoindre une station, il existe un itinéraire piéton qui n'excède guère 250 m. De part et d'autre de ce cœur, prennent place des franges périphériques avec un habitat plus individuel qui reste toujours à des distances de la station compatibles avec la marche (moins de 500 m pour la cohésion du quartier) et qui peut représenter la majorité des logements : habitat intermédiaire, maison de ville, pavillon. L'ensemble des quartiers forme un anneau, ou chapelet, entourant un grand « creux » de verdure. Ce principe se réfère à un espace à *deux dimensions*. Il y règne la **lenteur**, y compris dans les espaces non bâtis, dont le quadrillage par des voies piétonnes et des pistes cyclables permet de relier sans détours tout couple de lieux situés sur l'anneau. Les déplacements motorisés peuvent être limités aux véhicules utilitaires ou de services : ambulances, pompiers, police, éboueurs, taxis, livraisons, engins agricoles, ... Sinon la limitation de vitesse³³⁶ dissuade de l'usage quotidien de la voiture et rend la marche et le vélo attractifs, sûrs et confortables, de façon plus efficace que certains aménagements dits piétonniers ou cyclables (Héran, 2014). A l'échelle du quartier, la sinuosité, la profusion, la variété et la variation contrastent avec la raideur fonctionnelle, simple et pérenne des boucles qui le traversent (cf. premier principe).

A l'échelle *locale*, le *troisième principe* (**figure 11**) est celui des *proximités* (ou *voisinages*), de la *diversité fonctionnelle* et de l'*intégration*. Il se réfère à un espace à *trois dimensions*, celui de l'architecture qui crée et organise les volumes en fonction des proximités nécessaires ou désirées : celles d'autres locaux, de la lumière du jour, de lieux calmes ou de l'animation, des fonctions urbaines diverses ou de la verdure, du tramway ou de la voie routière qui desservent l'ensemble de la ville. L'interface statique l'emporte sur le mouvement.

Bien évidemment, nous retrouvons dans l'énoncé de ces principes les idées de densité, de mixité fonctionnelle et de design chers au TOD, et dont nous avons déjà souligné précédemment l'importance en termes de contribution au potentiel d'un fonctionnement sobre d'une ville.

Le chiffrage que propose Jean-Louis Maupu de son modèle a été réalisé dans l'hypothèse d'une ville creuse imaginaire de 60 000 habitants et 30 000 emplois dont l'épine dorsale est une ligne de tramway de 15 km formant une boucle (anneau d'environ 5 km de diamètre comportant une station tous les 500 m) ; six rames — douze en heure de pointe — parcourent en continu la ligne dans chaque sens à une vitesse moyenne de 25 km/h (soit une rame toutes les 3 minutes en heure de pointe) et permettent environ 60 000 déplacements en transport collectif par jour, en plus des déplacements en modes actifs. L'auteur envisage une densité de 100 habitants à l'hectare³³⁷ dans les zones denses (où toute habitation, tout emploi, tout commerce et tout service de la zone dense est situé à une distance inférieure à 250 m à vol d'oiseau d'une station) et de 25 habitants à l'hectare dans les franges. En tenant compte de sa partie centrale non bâtie, la Ville Creuse affiche une densité moyenne d'environ 20 habitants à l'hectare.

Il est important de souligner que cette valeur résulte d'hypothèses de calcul d'un spécialiste

336/ Marc Wiel montre bien dans plusieurs de ses ouvrages l'importance de la vitesse comme facteur d'organisation de l'espace urbain.

337/ Avec des surfaces moyennes disponibles de 80 m² par emploi et de 60 m² par habitant pour le logement.

des modes de transport guidés, dont l'exploitation impose certaines contraintes quant à la longueur maximale des lignes (une quinzaine de kilomètres pour le tramway ; une illustration en sont les lignes T3a et T3b de la ceinture de Paris) : elle est donc la conséquence d'un choix de structuration de la ville par un système de transport motorisé donné.

En revanche, pour la ville BELT telle que nous l'entendons, la densité moyenne (également de l'ordre de 20 habitants à l'hectare) résulte de contraintes liées à la satisfaction des besoins vitaux des habitants en cas de restriction sévère (voire d'impossibilité) d'utilisation de ce même système de transport dans l'éventualité d'une pénurie énergétique grave.

La convergence des valeurs est donc fortuite³³⁸. Mais elle est surtout utile pour aider à caractériser la ville BELT en l'illustrant par l'exemple : l'agencement que propose le modèle de la Ville Creuse montre en effet qu'une densité moyenne de 20 hab/ha n'est pas incompatible avec des configurations de type « centre urbain dense » (distribué ici le long d'un lien unique, à la manière d'un boulevard urbain) qui, en même temps, ménagent suffisamment de proximités pédestres à des adresses naturelles potentiellement productives (accès de tout habitant à 450 m² de sol vivant nourricier) pour permettre, en cas de nécessité, un fonctionnement « en mode pénurie », puisque le centre du « creux » est à une distance inférieure à 3 km de n'importe quel endroit de la boucle.

De ce fait, la Ville Creuse fait office d'exemple d'une déclinaison possible de la ville BELT.

4.4.6.- Agencements de famille 6

(apports à la ville BELT des agencements d'échelle mécanique entre adresses naturelles et adresses artificielles, du point de vue de l'urbaniste).

Par construction, les idées développées au paragraphe précédent (*Famille 5*) autour de la contribution des agencements à la sobriété énergétique des transports privilégient un certain type de proximité aux entrées du réseau structurant : celui des adresses artificielles. Dans ces conditions, les configurations « optimales » ne peuvent qu'être apparentées à celles conformes aux principes du TOD.

Mais l'une des spécificités de la ville BELT au sens où nous l'entendons est la place privilégiée qu'elle accorde à la proximité aux adresses naturelles, qui en sont une composante fondamentale. C'est cette spécificité qui, à l'échelle humaine, relativise le rôle central habituellement dévolu à la densité lors de la recherche de solutions répondant à un souci d'économie d'énergie de transport.

Ce même raisonnement peut être étendu à l'échelle mécanique. Dans certains cas, par exemple celui d'un milieu particulièrement productif en ressources rares en raison de conditions spécifiques locales, une logique sous-tendue par l'optimisation — selon des critères BELT — de l'accès à cette ressource en recourant au transport mécanisé de fret justifie pleinement une réflexion sur l'ordre des priorités : un arbitrage en faveur de la proximité de ces adresses naturelles à l'entrée du réseau structurant peut alors s'avérer pertinent. Dit autrement, la « gare au milieu de nulle-part » — ou, pour reprendre une expression consacrée, la « gare-betterave » —, loin d'être une absurdité, peut au contraire, dans certains cas, davantage contribuer au fonctionnement BELT de la ville qu'un classique « quartier de gare » dense.

Ce point méritait d'être souligné pour nuancer le propos du paragraphe 4.4.5. (*Famille 5*) : l'optimisation « par l'agencement » de l'énergie de transport peut mener à des configurations variées dépendant du contexte ; aucune recette ou solution-type ne saurait présenter un carac-

338/ Cette convergence est évidemment tributaire de la fourchette retenue pour la distance maximale « raisonnablement » réalisable à pied en situation de crise.

tère absolu et généralisable.

Dans le domaine de l'énergie de maintien du confort thermique, un exemple d'apport à la frugalité de l'articulation des adresses artificielles et des adresses naturelles est l'atténuation, voire la suppression, d'îlots de chaleur à l'échelle de la ville (qui relève de l'échelle mécanique) par canalisation des masses d'air en mouvement à travers cette dernière au moyen de la trame verte et bleue (dont nous évoquerons l'intérêt du point de vue d'autres apports au paragraphe 4.4.7.), ou TVB. Le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2022) en souligne l'importance, en se référant à des travaux qui montrent, notamment, le fort pouvoir refroidissant des adresses naturelles, pas tant, d'ailleurs des parcs et autres espaces verts urbains, que des forêts s'emboîtant parmi les adresses artificielles des espaces urbanisés, et dont l'effet croît avec la taille (Jaganmohan *et al.*, 2015).

Enfin, en complément à ce qui a été dit précédemment sur la Ville Creuse, nous pouvons évoquer ici la contribution de l'agencement linéaire de ce modèle à la préservation des milieux naturels³³⁹. L'urbanisation en ruban étroit (ou chapelet) impacte en effet plus faiblement les paysages et les territoires que celle « en tache d'huile » : un écart de tracé du réseau structurant permet d'éviter non seulement un site remarquable, historique ou archéologique, mais également un écosystème précieux ou des terres agricoles de qualité. Un village peut devenir partie intégrante d'une frange de la ville sans modifications notables et une part de ses terres agricoles trouvent place dans les espaces libres de son « creux ». Pour respecter un corridor écologique, comme une rivière, le ruban urbanisé s'interrompt, tandis que continuent le tramway et la route avec des passages en dénivelé pour animaux. Et toute évolution de la Ville Creuse suit ce même principe (d'une certaine manière, le « modèle se respecte lui-même ») : quand ses anneaux ont atteint leurs tailles d'équilibre, il suffit de « tricoter de nouvelles mailles » pour croître encore.³⁴⁰

C'est précisément en raison de ce potentiel à respecter le patrimoine — en particulier celui des sols vivants³⁴¹ — qu'une urbanisation « filaire » nous semble être une caractéristique essentielle d'une ville BELT. Des deux dimensions géométriques qui définissent la surface d'un territoire, une seule est concernée par la mécanisation, l'artificialisation, la vitesse. Toute la high-tech de la ville (ou ce qu'il en reste en cas de pénurie) est concentré sur cette seule dimension « longitudinale » que trace le transport mécanisé, plus exactement sur une bande étroite d'adresses (majoritairement) artificielles, dont l'imbrication avec les adresses naturelles se fait suivant la dimension « transversale » — dimension de la lenteur et de la low-tech — où leur emprise décroît rapidement, par « dilution » (fractale ?) à mesure que croît l'éloignement à l'axe de la vitesse.

4.4.7.- Agencements de famille 7

(apports à la ville BELT des agencements d'échelle mécanique entre adresses naturelles, du point de vue de l'agronome).

339/ Dont la contribution à la bonne santé des sols vivants — et donc à leur potentiel productif pour satisfaire les besoins des habitants — a déjà été discutée à la section 4.3. (paragraphe 4.3.1.).

340/ Au delà d'un certain nombre d'anneaux jointifs (par exemple trois, ce qui, selon les hypothèses de calcul de l'auteur, équivaut à 150 000 habitants environ), la multiplication des correspondances risque de déprécier le transport collectif ; la création d'une nouvelle ville sur la ligne de transport régionale ou nationale auquel l'ancienne est raccordée est alors sans doute préférable.

341/ Dont certains auteurs disent qu'ils ont mis des millions d'années à se constituer.

L'importance des continuités à « l'échelle mécanique »³⁴² entre adresses naturelles pour favoriser le maintien (sinon la régénération) des sols vivants et donc leur productivité a déjà été évoquée au paragraphe 4.4.1. (Famille 1) relatif à l'échelle humaine.

Rappelons que l'une des causes majeures de l'érosion de la biodiversité est la fragmentation et la destruction des habitats (Bergès *et al.*, 2010). Des biologistes ont conseillé d'accroître la connectivité entre ces derniers par la mise en place de corridors afin de compenser les effets négatifs de cette fragmentation et maintenir, voire améliorer, la viabilité de la population de certaines espèces. Depuis les années 1990, le rôle de ces corridors entre habitats déconnectés dans le fonctionnement des systèmes écologiques est devenu un sujet de débats scientifiques ; des travaux de synthèses ont fini par mettre en évidence un effet positif des connectivités sur la dispersion des espèces et en 2007, sur la base des travaux du Grenelle de l'Environnement, le ministère en charge de l'écologie (MEEDDM) a fait de l'amélioration de la trame écologique une des priorités de la Stratégie nationale pour la biodiversité (« *La France s'engage à créer une trame verte et une trame bleue afin de rétablir les flux d'espèces de faune et de flore sauvages entre les zones de haute valeur écologique* »). Il s'en est suivi, en 2012, la mise en place de la TVB (trame verte et bleue), avec pour ambition d'inscrire la préservation et la restauration de la biodiversité dans les documents d'aménagement du territoire, notamment les SCoT et les PLU, en vue de (re)constituer un réseau écologique cohérent qui, en associant les réservoirs de biodiversité et les corridors les reliant, permette aux espèces animales et végétales d'assurer leur cycle de vie (Heinisch *et al.*, 2018). La controverse scientifique quant au caractère généralisable des bienfaits des flux migratoires n'est pas close pour autant, pas plus que celle relative à l'efficacité réelle des corridors pour faciliter ces flux. L'impossibilité à trancher de manière définitive provient en grande partie de la complexité des mesures nécessaires pour valider ou invalider une théorie dans ce domaine (Bergès *et al.*, 2010) ; de plus, un corridor peut prendre différentes formes (linéaires, avec nœuds, en « pas japonais », en mosaïque paysagère,...) et jouer différents rôles (habitat, conduit, barrière, filtre, source, puit), selon les espèces et en fonction de sa configuration (caractéristiques dimensionnelles, géométriques, topologiques) et de sa composition (Bennett, 2003) : par exemple, s'il est boisé, il joue simultanément le rôle de conduit pour les espèces forestières et celui de filtre pour les espèces des prairies. Enfin, l'éventualité d'un impact négatif des corridors mérite d'être soulignée : augmentation du risque de propagation de maladies et d'invasion par les espèces exotiques (en particulier le long des routes et des cours d'eau), rôle de drain attirant les espèces vers des habitats défavorables, comme les « trames jaunes » des grandes zones agricoles de monoculture (céréalières et viticoles) de plaine, estimées imperméables au déplacement des espèces (Heinisch *et al.*, 2018), *etc.*

Difficulté de généraliser des résultats relatifs à une espèce ou un paysage ; lourdeur des expérimentations pour montrer le rôle fonctionnel des corridors ; limite des connaissances pratiques pour savoir où les installer et quelles doivent être leurs forme, structure, largeur et composition ;... autant d'invitations à la poursuite des travaux scientifiques dans ce domaine, mais également à une certaine prudence dans la mise en œuvre de la TVB. Celle-ci n'en reste pas moins un levier reconnu de préservation de la biodiversité pour permettre aux écosystèmes de continuer à rendre à l'homme leurs services (Bergès *et al.*, 2010). A ce titre, elle est un exemple d'agencement spatio-fonctionnel participant au potentiel productif des adresses naturelles, donc au potentiel de la ville à fonctionner en mode BELT.

342/ En référence non pas aux infrastructures de transport, qui ne sont concernées par ces agencements qu'en raison de l'effet coupure qu'elles peuvent occasionner, mais au fait qu'il s'agit ici de traiter la question de l'articulation entre adresses naturelles éloignées les unes des autres.

Si la Trame Verte et Bleue fait donc désormais partie de la boîte à outils de l'aménagement du territoire, ce n'est que récemment que commence à émerger une autre notion, celle de la *Trame Brune* (TBr), comprenant les réservoirs et corridors pédologiques nécessaires pour assurer la continuité du milieu où évoluent les organismes dépourvus de pattes et/ou d'ailes et qui vivent en permanence dans le sol. Mais à ce jour, le rôle pourtant fondamental de la biodiversité de ce dernier reste encore très peu pris en compte³⁴³ dans la conception des villes durables, alors même que la contribution de la faune souterraine (en particulier des lombriciens) à ses fonctions et services écosystémiques (production alimentaire, régulation des eaux pluviales,...) sont largement reconnus. L'ADEME qualifie d'ailleurs les sols vivants de « trésor à préserver »³⁴⁴, tout en faisant le constat que 60% des sols du monde seraient déjà dégradés du fait des activités humaines. Parmi les désordres occasionnés par cette imperméabilisation (en France, 13 000 km² artificialisés au cours des trois dernières décennies), de récents travaux s'attachent à pointer plus particulièrement les effets de coupures « souterraines » des infrastructures routières qui, du fait de « l'artificialisation en profondeur » qu'elles occasionnent, constituent des barrières souvent infranchissables pour les organismes lombriciens³⁴⁵. Le but de ces travaux et projets (par exemple TRAM'BIOSOL³⁴⁶) est de mettre en exergue la nécessité d'intégrer la TBr (Trame Brune) et la biodiversité du sol dans les programmes d'aménagement urbain, au même titre que la TVB (Trame Verte et Bleue).

En raison de sa contribution à la santé des sols vivants (et donc à leur potentiel productif), un agencement des adresses naturelles intégrant la TBr à l'échelle que nous avons qualifiée de « mécanique » apparaît comme une caractéristique importante de la ville BELT. La conséquence de cette priorité donnée à la continuité entre adresses naturelles est le nécessaire recours à des dispositifs de franchissement des corridors pédologiques par les sites propres des infrastructures de transport.

4.4.8.- Agencements de famille 8

(apports à la ville BELT des agencements d'échelle mécanique entre adresses naturelles et adresses artificielles, du point de vue de l'agronome).

Comme rappelé au paragraphe 4.4.2. (Famille 2), les adresses artificielles (leurs habitants)

343/ La situation évolue néanmoins : issue des propositions de la convention citoyenne sur le climat, la loi « Climat et résilience » votée le 20 juillet 2021 — bien que jugée décevante par certaines associations écologistes — fait figurer parmi ses objectifs la réduction de 50% de l'artificialisation des sols sur les dix prochaines années.

(https://www.francetvinfo.fr/monde/environnement/convention-citoyenne-sur-le-climat/une-loi-climat-et-resilience-tronquee-votee-cet-apres-midi-a-l-assemblee-nationale-et-au-senat_4709171.html).

344/ <https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/sols-tresor-a-protger>.

345/ Le travail de recherche de Jeanne Maréchal s'inscrit dans cette démarche : l'un des objectifs de cette thèse CIFRE en cours commencée en novembre 2018 (collaboration entre l'entreprise Sol Paysage, l'Université de Rennes 1 et le CEREMA) est d'évaluer les contributions des vers de terre à la qualité des sols « reconstitués » d'aménagements paysagers et d'adapter les « itinéraires techniques » de manière à favoriser les lombriciens et donc les fonctionnalités écologiques de ces sols. Outre sa contribution à une meilleure compréhension du fonctionnement des sols vivants et à la mise en évidence des effets de l'urbanisation sur ce fonctionnement, l'intérêt de ce travail est d'alimenter le débat sur les modalités concrètes de la mise en place d'une trame brune. A plus long terme et dans un objectif d'intérêt général, ces nouvelles connaissances pourraient contribuer à une meilleure prise en compte des écosystèmes dans l'aménagement paysager des villes (<http://www.genie-ecologique.fr/de-la-vie-dans-les-sols-urbains-les-lombriciens-au-service-de-la-nature-en-ville/>).

346/ Projet de l'une des six équipes lauréates de l'appel à projets BAUM (Biodiversité, Aménagement Urbain, Morphologie) lancé en 2020 par le PUCA et ses partenaires, l'Office Français de la biodiversité et la DGALN (Direction Générale de l'Aménagement, du Logement et de la Nature). La thèse de Jeanne Maréchal est réalisée en lien avec ce projet.

représentent une source de minéraux indispensables aux plantes, et la gestion des proximités pour faciliter la circularité du système alimentation-excrétion relève donc de l'agencement BELT entre adresses naturelles et artificielles. Ce point reste valable à l'échelle mécanique : une gestion des excréta plus centralisée (complémentaire à celle, locale, d'échelle humaine) *via* le recours au mode motorisé principal peut faire sens en lien³⁴⁷ avec des agencements de type « gare-betteraves » envisagés au paragraphe 4.4.6. (Famille 6) en tant qu'éventualité à étudier dans certains cas de figure.

Sur un autre registre, la colonisation des sites propres (ruban de sol vivant entre les rails) par des espèces végétales adaptées à ce type d'environnement (variétés spécifiques de plantes mellifères ou médicinales, par exemple) pourrait être considérée comme une forme « d'articulation » d'adresses naturelles et artificielles relevant de l'échelle mécanique.

En tout état de cause, les possibilités d'alimenter cette huitième famille semblent restreintes.

Peut-être l'agencement est-il seulement un jeu des 7 familles ?

347/ Et de manière parfaitement symétrique : l'enjeu de ce type de lien est d'offrir aux habitants de la ville un accès à une source alimentaire du point de vue de l'urbaniste, d'offrir aux plantes cultivées un accès à une source de fertilisants pour l'agronome.

4.5.- Décrire l'agencement d'une ville BELT

En recourant au glissement sémantique qui consiste à utiliser l'expression BELT pour qualifier une ville (cf. introduction du chapitre), nous nous proposons dans cette section, en guise de bilan, de donner quelques éléments permettant d'esquisser un « portrait » d'une ville BELT du point de vue de sa configuration, qui relève à la fois du substrat (section 4.3.) et de l'agencement (section 4.4.) de ses adresses.

4.5.1.- Vers une « forme urbaine BELT » ?

En référence au triptyque « dimension-géométrie-topologie » comme grille de lecture (cf. paragraphe 4.2.3.) pour apprécier si un caractère est de nature « formelle »³⁴⁸, certains des agencements ayant servi à illustrer les différentes familles de la section précédente relèvent exclusivement de la « forme » (à la différence d'autres, qui sont de nature « spatio-fonctionnelle »). En voici quelques exemples.

L'efficacité³⁴⁹ des « pièges à chaleur » relevant de la *famille 1* tient essentiellement à leurs caractéristiques géométriques (« forme en U »).

Les zonages évoqués au paragraphe traitant de la *famille 2* mobilisent notamment cette caractéristique dimensionnelle qu'est la distance.

Parmi les agencements de *famille 3*, le volume passif des bâtiments est lié notamment à des caractéristiques géométriques et leur mutabilité à des caractéristiques dimensionnelles ; la marchabilité des espaces publics mobilise quant à elle certaines caractéristiques topologiques (maillage).

La topologie intervient également (au travers de différentes modalités de voisinage entre adresses naturelles et artificielles) dans l'architecture bioclimatique (*famille 4*).

Certains exemples présentés au paragraphe qui traite de la *famille 5* relèvent d'une combinaison des trois composantes : la « contribution au potentiel BELT » apportée par le tracé de l'infrastructure ferroviaire tient simultanément à sa topologie (une boucle plutôt qu'une ligne ouverte), à sa géométrie (éviter la multiplication de sinuosités aux virages serrés qui altère la durabilité du matériel roulant tout en dégradant le confort des passagers) et à sa dimension (une maille d'un diamètre trop important rend inaccessibles à pied certaines adresses naturelles productives).

L'effet de taille évoqué à propos du potentiel « refroidissant » des adresses naturelles vis à vis des adresses artificielles (*famille 6*) renvoie à la composante dimensionnelle.

...

D'une certaine manière, ces exemples illustrent le rôle de la « forme » qui, en tant que modalité particulière d'agencement³⁵⁰, apparaît comme un levier low-tech pouvant être mis au service du potentiel de sobriété énergétique de la ville. Prémisses à la théorisation d'une « forme urbaine BELT » ?

348/ Cette déclinaison de la forme a par exemple été mobilisée pour construire la « matrice composantes/acceptions » (Stransky, 2006), une grille d'analyse conçue comme outil d'aide à la réalisation de diagnostics spatiaux initialement de pôles d'échanges (Menerault, 2006), puis d'autres espaces publics, notamment ceux des quartiers de gare (Stransky, 2017) ou d'espaces du périurbain (Stransky, 2019).

349/ Entendue au sens de l'apport de cet agencement à la productivité des adresses naturelles, donc au potentiel BELT de la ville.

350/ Nous considérons la forme comme synonyme d'agencement spatial, sous-catégorie de l'agencement spatio-fonctionnel (cf. paragraphe 4.2.3.).

4.5.2.- La ville BELT en adjectifs

Au travers de l'approche par « familles » développée à la section 4.4., nous avons exploré différentes facettes de la contribution de l'agencement au potentiel des habitants d'une ville à satisfaire leurs besoins en mode basse énergie et low-tech. L'étape suivante pour décrire globalement la configuration spatiale d'une ville BELT serait le passage d'une liste de caractéristiques à une combinaison cohérente (idéalement optimale) de ces dernières en un schéma d'ensemble. A cet égard, le modèle de la Ville Creuse auquel nous avons fait référence au paragraphe 4.4.5. (*famille 5*) relève de cette logique et pourrait servir de base utile, dans la mesure où ses trois principes fondateurs sont en synergie avec l'approche low-tech de la sobriété énergétique. Néanmoins, au stade de réflexion où nous a mené le travail entrepris, l'exercice consistant à déconstruire et reconstruire le modèle en y intégrant de nouveaux éléments (notamment ceux relatifs à la place centrale des sols vivants dans une ville BELT, à différentes échelles) nous semble prématuré (il pourrait faire l'objet d'un travail ultérieur).

C'est donc bien plus modestement qu'en guise de synthèse, nous proposons un portrait « éclaté », sous forme d'une liste non hiérarchisée et pas forcément exhaustive d'adjectifs traduisant ce que nous estimons être des qualités fondamentales d'une ville BELT. Ces adjectifs découlent des seules caractéristiques relatives au substrat des adresses (section 4.3.) et aux différents types d'agencements de ces dernières (section 4.4). Certains éléments de cette liste peuvent être interdépendants ou se recouper partiellement (auquel cas sont mentionnés les adjectifs « liés »), d'autres ne concerner qu'une catégorie de substrat (qui est alors également précisée).

Ainsi, par ses éléments constitutifs et leur organisation, une ville BELT apparaît comme :

Anisotrope (cf. *Linéaire*). En référence à la surface de la Terre, chacune des deux dimensions horizontales de l'emprise spatiale d'une ville BELT présente des « propriétés » radicalement différentes. La dimension « longitudinale » (définie par le tracé du réseau mécanisé structurant le long duquel s'étirent ou se répartissent en chapelet les adresses artificielles) est celle de la vitesse et de la high-tech (dont nous rappelons qu'elle n'est pas absente de la ville BELT, mais limitée au maximum). La dimension « transversale » (perpendiculaire à la précédente et où prennent place les adresses naturelles au-delà du ruban « artificiel » de la dimension longitudinale) est celle de la lenteur et de la low-tech. Une urbanisation BELT revient à partager l'espace à deux dimensions de la surface terrestre entre « l'exosquelette humain consommateur » et le « transformateur d'énergie solaire producteur » : l'une des deux dimensions géométriques est dévolue au premier ; l'autre est réservée au second.

Arborée. Complément indispensable de l'adjectif *Vivante* en raison de l'importance de la durée de vie (décennies, siècles) et des dimensions d'un arbre. En augmentant « l'épaisseur » des adresses naturelles aussi bien au dessus (canopée) qu'en dessous (système racinaire) du sol (cf. *Epaisse*), l'arbre contribue à accroître à la fois leur productivité de biomasse (optimisation du captage du rayonnement solaire) et leur capacité en tant que puits de carbone (profondeur plus grande). La ville BELT « se construit » non seulement autour de ses sols vivants, mais aussi autour de ses arbres qui contribuent à la production et au renouvellement de ces derniers (*via* le système racinaire) et multiplient les opportunités en matière d'architecture et d'urbanisme bio-climatiques.

Basse (concerne le substrat des adresses artificielles). Dictée par la minimisation des coûts énergétiques d'usage (ascenseurs) et d'entretien, la faible mobilisation de la dimension verti-

cale au dessus et en dessous de la surface du sol (limitation du nombre d'étages, limitation du recours aux équipements et infrastructures souterrains) contraste avec « l'épaisseur » recherchée des adresses naturelles (cf. *Epaisse*).

Bouclée (concerne les adresses artificielles). Complément d'information par rapport à l'adjectif *Linéaire* : en comparaison avec la ligne ouverte, un tracé en boucle (aux caractéristiques dimensionnelles et géométriques *ad hoc*) du réseau de transport collectif améliore les performances de ce dernier.

Comestible (concerne les adresses naturelles). Complément d'information indispensable par rapport à l'adjectif *Arborée* car conformément aux principes permacoles qui la sous-tendent, la ville BELT fait reposer, pour une large part, son potentiel de production alimentaire sur les arbres (agroforesterie). Compte tenu de la pérennité de ces derniers, ce critère conditionne le choix des essences lors de la plantation (à côté d'autres critères — besoins en eau, sensibilité à la chaleur,... — par anticipation du changement climatique) et fait donc partie des caractéristiques « structurelles » de la ville BELT.

Crue (concerne le substrat des adresses artificielles). Disponible en abondance, totalement recyclable, nécessitant peu d'énergie de transformation pour sa mise en œuvre, la terre crue est le matériau de construction dominant des unités bâties de la ville BELT.

Diverse. La diversité en termes de « lacunarité spatiale » (rapports entre les « pleins » et les « vides ») — ou, dit autrement, la multiplication de modalités d'articulations spatiales à différentes échelles entre adresses naturelles et artificielles — augmente les opportunités (d'habitat ou de développement d'activités productives, par exemple en lien avec diverses formes de circularité du système alimentation-excrétion) face à la variété des besoins, contraintes et goûts individuels. L'adjectif *Fractale* (en tant qu'alternative envisageable à *Diverse*) a été écarté en raison de sa connotation à l'idée « d'autosimilarité » et de « dilution progressive » qui ne nous semble pas indispensable (ou même utile) pour caractériser la structure spatiale d'une ville BELT.

Elémentaire. En référence aux quatre éléments que sont le feu, la terre, l'air et l'eau. Le premier (le Soleil, de manière imagée) est à l'origine de l'idée même de la ville BELT ; la seconde est le matériau de construction par excellence de cette dernière (cf. *Crue*) ; le troisième renvoie à l'importance accordée dans les agencements aux couloirs de canalisation des masses d'air en mouvement au moyen de la trame verte et bleue ; l'eau est centrale par la place qui lui est réservée à la fois en tant que stock (anticipation de sécheresses) et comme substrat d'écosystèmes productifs (étangs, mares) et de recyclage (lagunage).

Epaisse (concerne les adresses naturelles. Cf. *Arborée*, *Vivante*). La mobilisation de la dimension verticale, aussi bien au dessus qu'en dessous du sol, démultiplie le potentiel de captage de rayonnement solaire et de stockage du carbone de l'air.

Généreuse (concerne le substrat des adresses artificielles à l'exception des sites propres). Un dimensionnement généreux (volumes, épaisseur des murs,...) augmente le potentiel de mutabilité des bâtiments (cf. *Mutable*), mais également leurs performances thermiques (inertie, isolation).

Linéaire (concerne le substrat des adresses artificielles). La linéarité est un moyen de conci-

lier, pour les adresses artificielles, deux types de proximités : proximité aux entrées du réseau de transport mécanisé autour desquelles elles se répartissent sous forme d'étroits quartiers mixtes (éventuellement denses), proximité aux adresses naturelles pourvoyeuses de ressources qui entourent ces quartiers.

Mutable (concerne le substrat des adresses artificielles). La mutabilité est une caractéristique fondamentale de la ville BELT en ce qu'elle permet des réaffectations fonctionnelles sans modifications conséquentes et énergivores des substrats (bâtiments).

Perméable. Caractéristique inhérente aux sols vivants (cf. *Vivante*), la perméabilité est par ailleurs maximisée pour les substrats des adresses artificielles. Par exemple, des choix tels que celui du mode ferré comme transport structurant ou celui d'une artificialisation (lorsque nécessaire) selon des modalités spatiales qui limitent l'imperméabilisation relèvent de cette caractéristique.

Vivante (concerne le substrat des adresses naturelles. Cf. *Arborée*, *Comestible* et *Perméable*). En ordre de grandeur, les sols vivants représentent 90% de l'emprise au sol de la ville BELT dont ils sont le principal élément structurant. Transformateurs d'énergie solaire, ils rendent de multiples services : pourvoyeurs de ressources (notamment alimentaires), recycleurs de déchets (notamment alimentation-excrétion), puits de carbone, régulateurs de phénomènes météorologiques extrêmes (notamment par leur potentiel à atténuer le phénomène « d'îlot de chaleur », à absorber l'eau de pluie excédentaire pour la restituer par temps de sécheresse, etc),...

...

4.5.3.- Notion de « patrimoine utile BELT »

Une autre manière de caractériser la ville BELT est d'en apprécier chaque élément (au sens large : un substrat, un artefact, un équipement, un dispositif technique, un agencement,...) sous l'angle de son caractère patrimonial, défini ici en référence à ce que nous appelons « l'utilité BELT ». Dans cette approche — qui relève plus d'une piste à explorer que d'une réflexion aboutie —, l'*utilité* d'un élément renvoie : (1) à la fonction ou rôle qu'il remplit à l'aune du caractère plus ou moins fondamental du besoin auquel il répond (le développement sur la notion de besoin à la section 4.1 est éclairant à cet égard) ; (2) à son éventuelle « non-remplaçabilité » par un autre élément qui remplirait une fonction proche (par exemple, un vélo remplit une fonction « proche » de celle de la voiture particulière) ; (3) à sa capacité à ne pas entraver le fonctionnement d'un élément remplissant un rôle destiné à satisfaire un besoin d'importance supérieure ou égale (de ce point de vue, une autoroute n'est pas utile au sens où elle remplace un sol vivant, qui répond à un besoin vital *a priori* plus important que celui qui permet à un véhicule individuel motorisé de se déplacer rapidement).

Si, par ailleurs, l'élément est doté d'un potentiel à remplir son rôle (du moins en partie) sans recours à une énergie autre qu'humaine (ou, à défaut, en mobilisant « peu d'énergie »), son utilité est qualifiée de « basse énergie » (BE).

Enfin, la mention LT fait référence au caractère low-tech de l'élément sur l'ensemble de son cycle de vie : production, utilisation, réparation, entretien, recyclage,...

Dès lors qu'un élément satisfait à ces trois conditions — c'est-à-dire offre le potentiel d'assurer son rôle (ou rendre le service prévu) avec un minimum d'énergie et dans le respect des principes low-tech —, il est à promouvoir et à préserver et, à ce titre, mérite d'être classé « patrimoine utile BELT ».

Les quelques exemples qui suivent, volontairement choisis dans des domaines variés, ont pour objet d'illustrer aussi bien la notion elle-même que les questions que soulève le classement proposé.

Des artefacts de la vie courante comme une clochette (en tant que sonnerie de porte), un balais (plutôt que l'aspirateur) ou un pull relèvent *a priori* du « patrimoine utile BELT » ; cette appréciation peut néanmoins être nuancée par les matériaux utilisés ainsi que par le lieu et le mode de production. Dans l'exemple du pull, si ce dernier est confectionné manuellement à partir de laine locale, le classement est incontestable, alors qu'il pose question pour un pull synthétique en provenance d'Asie. Mais même dans ce cas, il est édifiant de comparer le service rendu (éviter d'avoir froid) « à quantité équivalente » par le pétrole suivant que ce dernier est brûlé dans une chaudière ou utilisé comme matière première pour la confection du pull et comme carburant pour son acheminement.

De son côté, un téléphone portable peut difficilement aspirer au titre de patrimoine utile, du moins pour l'écrasante majorité de ses utilisations ; et dans tous les cas, même lorsqu'il est conçu pour être BE (basse énergie), cet objet reste fondamentalement high-tech, en dépit des progrès qui peuvent certainement être faits autour de son obsolescence, sa réparabilité et sa recyclabilité.

L'utilité (au sens où nous l'avons définie) d'un équipement comme un scanner médical ne fait aucun doute, en particulier en raison de son caractère irremplaçable (du moins en l'état actuel des connaissances, car des substituts low-tech — comme les « chiens renifleurs de cancer » — sont à l'étude³⁵¹) ; c'est donc un patrimoine utile, éventuellement BE (selon la manière dont il est conçu), mais en aucun cas LT, puisque son caractère high-tech est incontestable.

Un vélo peut quant à lui être certainement classé « patrimoine utile BE », mais son caractère low-tech est tributaire des modalités de sa production (avec les fameuses trois questions : « comment », « avec quoi » et « où ») ; à cet égard, les vélos actuels sont, pour la plupart, high-tech.

Dans le domaine qui nous occupe, le propre d'une ville BELT est, par construction, d'être constituée majoritairement (si possible exclusivement) de « patrimoines utiles BELT », dont l'exemple le plus emblématique est le substrat des adresses naturelles, c'est-à-dire les sols vivants, qui sont nécessairement « classés ». Ce classement s'étend de manière évidente à tous les dispositifs favorisant la (ré)génération de ces derniers, en particulier ceux visant à optimiser la relation entre la terre et l'eau, tant cette dernière est indispensable au développement de la vie. Pour rappel, les particules minérales de la terre et toutes les formes de vie qu'elle accueille forment un réservoir de très grande capacité ; mais une alimentation optimale de ce dernier par la pluie requiert un temps précisément ajusté — suffisamment long mais sans excès pour éviter la saturation —, c'est-à-dire un ralentissement approprié de l'écoulement de l'eau. Différents types de « modelage du paysage » permettent d'atteindre cet objectif, depuis les classiques terrasses jusqu'aux systèmes *Keyline*, qui poussent très loin l'optimisation de la gestion de l'eau sur terrains en pente³⁵². L'importance vitale de cette question fait dire à certains auteurs (Ser-

351/ De récents travaux de recherche semblent confirmer la faculté des chiens à détecter précocement une tumeur cancéreuse grâce à leur odorat, qui leur permettrait de reconnaître une molécule commune à tous les cancers (<https://www.futura-sciences.com/sante/actualites/medecine-chiens-sont-capables-detecter-cancer-97-fiabilite-46305/>). Pour certaines de ses applications, le scanner serait donc remplaçable par des procédés low-tech.

352/ Mis au point par l'agriculteur et inventeur australien Percival Alfred Yeomans, le *Keyline Plan* est, selon Mark Shepard, « l'approche la plus holistique de gestion de l'eau. » Reposant sur un système de baissières et de bermes au tracé savamment étudié et placées en des endroits clé d'un terrain en pente, ce dispositif utilise « toutes les stratégies possibles et imaginables pour capter toute l'eau de pluie [...] jusqu'à la dernière goutte, pour ralentir sa descente dans le paysage, la répartir vers les reliefs où elle peut pénétrer, stocker le surplus dans le sol, les bassins, les réservoirs [...] » (Shepard, 2016, p.187)

vigne, 2014) qu'avant leur épuisement, les dernières ressources d'énergies fossiles devraient être mises à profit pour modeler le maximum de terres dans l'optique d'en faire des milieux favorables à la formation de sols vivants. De tels « modelages » — déclinaison particulière d'agencements spatiaux — comptent ainsi sans conteste parmi les éléments de « patrimoine utile BELT » de tout premier ordre.

De manière analogue, tout « élément » de la ville peut être évalué sous l'angle de sa valeur patrimoniale.

Par exemple, bien que le caractère low-tech de la production d'un rail puisse faire l'objet de débats (qui pose la question de la frontière entre high-tech et low-tech), une voie ferrée répond, en première approximation, aux critères du patrimoine utile BELT ; non seulement en raison de sa recyclabilité, sa « perméabilité » et son emprise au sol (faible eu égard à son potentiel capacitaire), mais également parce qu'elle est fonctionnelle en toute circonstance : que le matériel roulant soit high-tech ou low-tech (cela inclut le véhicule hippomobile), elle permet d'économiser de l'énergie de traction par minimisation des frottements.

A l'inverse, une autoroute — de par l'importance de sa surface (de surcroît artificialisée) rapportée à l'unité transportée³⁵³, le morcellement des écosystèmes qu'elle occasionne, les consommations d'énergie et de matière qu'elle requiert tout au long de son cycle de vie — ne saurait être classée, pas plus qu'un gratte-ciel inutilisable sans ascenseur au-delà du cinquième étage et dont la construction et l'entretien mobilisent d'importantes quantités de ressources non renouvelables et de matériaux non recyclables.

En revanche, la forte valeur patrimoniale ne fait aucun doute pour un bâtiment de faible hauteur en terre crue et doté de caractéristiques lui permettant de rester fonctionnel en cas de crise énergétique sévère (à côté de son architecture bioclimatique, la mutabilité de ses espaces intérieurs rend par exemple envisageable l'aménagement temporaire d'un dortoir collectif « chauffé » au métabolisme de ses occupants).

De même, à l'échelle d'un quartier, un agencement de type TOD relève également du « patrimoine utile BELT » dans la mesure où il rend possible un fonctionnement acceptable (bien que ralenti) en mode énergétiquement contraint.

Et ainsi de suite.

Comme précisé en début de paragraphe, cette notion de patrimoine utile BELT n'est ici esquissée qu'en tant que piste susceptible de faire l'objet de développements ultérieurs, par exemple en passant d'une acception de type binaire (classé / non classé) à une gradation de la valeur patrimoniale (degré d'utilité BELT). La pertinence d'une telle approche n'est cependant pas évidente en raison de la difficulté (impossibilité ?) à quantifier certains services rendus par un patrimoine (comment mesurer une contribution à l'augmentation de la biodiversité ?) en raison de la connaissance lacunaire des phénomènes en jeu et de leur portée (spatiale et temporelle). A ce stade de notre réflexion, une appréciation qualitative — à l'image d'autres types de patrimoine (culturel, architectural, naturel, ...) — semble plus appropriée.

353/ Surtout dans un contexte où l'avenir de voiture particulière est incertain.

Conclusion

Le prétexte du chapitre est une réflexion sur un « outil low-tech » — l'agencement spatio-fonctionnel — mis au service du fonctionnement énergétiquement sobre d'une ville.

Si l'idée n'est pas nouvelle, force est de constater que les nombreux travaux traitant de thématiques voisines ne permettent d'établir des liens de cause à effet entre formes urbaines et modes de vie sobres que de manière incertaine, et leurs résultats sont régulièrement remis en question. Pour cette raison, la démarche que nous avons retenue a consisté à interroger diverses modalités d'agencements qui, tout en restant compatibles avec les conditions de confort considérées aujourd'hui comme habituelles, sont susceptibles de faciliter l'adoption de modes de vie permettant aux habitants de satisfaire leurs besoins vitaux en cas de pénurie énergétique sévère sans qu'une restructuration soit nécessaire, les « bons éléments » (agencer quoi ?) étant déjà placés « aux bons endroits » (agencer comment ?) en prévision d'une telle éventualité.

Par construction, il ne s'agit pas, au travers de cette démarche, de répondre à la question des effets observables de ces agencements, mais d'en explorer un *potentiel* — celui d'un fonctionnement *a minima* (en mode « ralenti » et au prix de concessions à certaines exigences de confort) —, dont l'activation reste cependant hypothétique.

Si de nombreux travaux ont été mobilisés pour alimenter le propos, l'état actuel des connaissances n'a permis de mettre en évidence que des faisceaux d'indices, de sorte que l'argumentaire repose souvent sur des conjectures qui demandent à être vérifiées. De ce fait, les résultats proposés à l'occasion des principaux développements de ce chapitre — notamment ceux relatifs à la nature des substrats (section 4.3) et ceux traitant de la manière de les agencer (section 4.4.) — ouvrent plus de questions qu'ils n'apportent de réponses.

En d'autres termes, au travers d'une tentative de formalisation de principes d'agencements favorables à des modes de vie conformes aux préceptes low-tech, ce travail reste de nature exploratoire et doit être considéré avant tout comme une **invitation à ouvrir un chantier**.

C'est à une présentation structurée de ce chantier — tout au moins certaines de ses déclinaisons possibles, tant il est vaste — que nous consacrons le chapitre suivant, sous forme d'axes de recherche.

5.- Le chantier de la ville BELT

Parmi les potentielles questions de recherche soulevées au chapitre précédent, un tri est ici opéré pour sélectionner celles que j'envisage de développer dans mes futurs travaux. L'objet de ce chapitre n'est pas d'établir à proprement parler un programme de recherche, mais plus modestement d'en fixer une orientation générale et d'en définir les principaux axes.

5.1. Cadre général : l'énergie solaire pour un état stationnaire de longue durée

Tous les axes de recherche envisagés s'inscrivent dans le même cadre que celui du présent document, et dont l'idée fondatrice peut être illustrée par une citation issue de l'ouvrage Thermodynamique de l'évolution de François Roddier³⁵⁴ : « *Imaginons que nous sommes au XXII^e siècle. Les économistes ont enfin compris que l'économie suit les lois de la thermodynamique. Ils ont compris qu'un système isolé tend vers l'équilibre thermodynamique, c'est-à-dire vers la mort, et que si l'humanité veut survivre, elle n'a pas d'autre choix que d'utiliser une source d'énergie extérieure, le Soleil. Toute autre forme d'énergie [...] est exclue, car, en augmentant irréversiblement son entropie, elle entraîne nécessairement l'humanité à sa perte.* »³⁵⁵ Dit autrement, le seul avenir à pouvoir être maintenu durablement car reposant sur des principes qui n'entrent pas en contradiction avec ceux de la thermodynamique est un état stationnaire ; la vision — non dénuée d'optimisme (excessif selon certains) et d'une certaine poésie — qu'en donne l'auteur est celle d'une humanité « *chargée de maintenir en état non seulement elle-même, mais aussi toute la structure dissipative complexe dont elle fait partie. Se nourrissant du rayonnement solaire et rejetant un rayonnement infrarouge, cette structure comprend non seulement tous les autres êtres vivants (la biosphère), mais aussi la terre, l'eau, l'atmosphère et son climat, ensemble que [...] beaucoup appellent maintenant Gaïa. Peu à peu, l'humanité apprendra à contrôler Gaïa. Dawkins a montré qu'un organisme vivant est un «véhicule» contrôlé par ses gènes pour assurer leur survie. De même Gaïa deviendra un «véhicule» contrôlé par des organismes vivants pour assurer leur survie.* » (Roddier, 2012, p.168).

C'est cette perspective de (très) long terme qui sous-tend ce document et explique le caractère radical de l'option explorée d'un fonctionnement de la ville « en mode BELT ».

C'est également elle qui sert de cadre général et de fil conducteur à l'orientation de mes futurs travaux, auxquels elle donne de la cohérence et une logique d'ensemble.

Chacun des trois axes de recherche proposés correspond à un domaine d'action visant à rendre la ville de demain conforme à l'état stationnaire de longue durée évoqué ci-dessus ; de ce fait, ces trois axes alimentent, chacun à sa manière, la réflexion sur des formes d'urbanisation compatibles avec le seul avenir envisageable à terme — celui ne prétendant pas violer les lois de la thermodynamique.

Ils portent respectivement : (1) sur la formation de ressources par l'énergie solaire ; (2) sur la gestion sobre des ressources ; (3) sur la transition vers cet avenir.

354/ Sans qu'il soit nécessaire d'adhérer à la lecture que propose cet astrophysicien de l'évolution des sociétés humaines au prisme des lois de la thermodynamique, le grand mérite de l'auteur est de rappeler avec force que l'univers est soumis à des lois physiques dont l'ignorance ne peut que mener l'humanité à une impasse.

355/ Roddier, 2012, p.166.

5.2.- AXE 1 : Quels transformateurs naturels pour la ville BELT ?

Cet axe de recherche s'inscrit dans la continuité de la réflexion sur les « adresses naturelles » et au rôle primordial de leur contribution au potentiel BELT d'une ville.

Dès lors que « la nature » est considérée comme un « transformateur à énergie solaire » ayant la capacité de produire des ressources, et une fois admise l'idée que le seul avenir qui ne soit pas catastrophiste à terme repose sur le recours exclusif à l'énergie solaire, la question de **l'articulation entre « ville » et « nature »** apparaît comme devant ressortir d'une réflexion sur la ville du futur.

Cette thématique n'est certes pas nouvelle. Dans un ouvrage récent, Thierry Paquot montre comment cette question est abordée et traitée au cours de l'histoire (qu'il s'agisse d'utopies, de projets, de réalisations, de scénarios, voire de « guides » : *villes cultivées* de Thomas More, *phalanstères* de Charles Fourier, *cités-jardins* d'Ebenezer Howard, *RetroSuburbia* de David Holmgren, *biorégion* de Yves Cochet, Agnès Sinaï et Benoît Thévard, ... chaque modèle étant l'occasion d'interroger la présence et le rôle de la nature dans la ville) et soutient l'idée que l'avenir appartient non pas aux formes d'urbanisation aujourd'hui dominantes (mégapoles, bidonvilles, villes globales, *gated communities*, urbain diffus, petites villes dépeuplées, ...), mais à des solutions émergentes fondées sur « *un subtil dosage entre échelles territoriales différentes et complémentaires, allant toujours vers plus d'autonomie des individus et plus d'amitié des humains envers [...] la nature.* » (Paquot, 2020, p.220).

Il est vrai que la question d'une intégration de plus en plus poussée entre ville et nature monte en puissance ces dernières années, comme en témoigne la revue bibliographique, au sein du dernier rapport du GIEC (IPCC, 2022), des travaux de recherche explorant les possibilités des NBS (*nature-based solutions*) notamment en matière de lutte contre le changement climatique et l'atténuation de ses effets, mais aussi dans d'autres domaines (par exemple l'impact bénéfique sur la santé, mentale et physique : réduction du stress, amélioration de la qualité de l'air, réduction du niveau sonore, etc). Cette montée en puissance se retrouve d'ailleurs jusque dans les évolutions récentes du concept de *Transit-Oriented Development*, dont l'acronyme est désormais précédé de la lettre G (pour *Green*) dans les travaux de certains auteurs (Ye *et al.*, 2018 ; Niu *et al.*, 2021) qui s'attachent à prendre davantage en compte les « espaces verts » ; le GTOD (*Green Transit-Oriented Development*)³⁵⁶ est-il appelé remplacer le TOD ?

Dans ce contexte, la spécificité de notre réflexion autour des apports de la « nature » à la ville BELT tient à l'importance qu'occupent dans cette dernière (1) les sols vivants considérés comme patrimoine à préserver en toute circonstance du fait des services qu'ils rendent, en particulier dans le domaine de la circularité du système alimentation-excrétion à l'échelle humaine, et (2) les techniques de production permacoles, notamment celles reposant sur diverses formes d'agencements spatio-fonctionnels.

Force est cependant de constater qu'alors même qu'ils font office de pierre angulaire dans la construction des principes de la ville BELT (un exemple emblématique est le chiffrage du ratio « adresses artificielles / adresses naturelle » qui conditionne fortement la plupart des modalités

356/ Notons que la notion de *Green TOD* est introduite dès 2011 par Cervero et Sullivan, qui proposent d'associer TOD et « urbanisme vert » en vue de générer davantage d'effets bénéfiques (écologiques et environnementaux). Les auteurs suggèrent des mesures à mettre en place : par exemple, davantage de densité et de mixité, moins de sols imperméabilisés (notamment les aires de stationnement), plus de jardins partagés, et production d'électricité par la mise en place de cellules photovoltaïques sur les toits (Cervero & Sullivan, 2011).

d'agencements étudiés), ces deux éléments font appel à des conjectures ou à des connaissances reposant sur des bases théoriques encore fragiles.

L'objet de cet axe de recherche est de questionner certaines de ces conjectures fondatrices du schéma d'ensemble de la ville BELT. Deux sous-axes en interaction sont définis à cette fin.

5.2.1.- *Apports des sols vivants à la ville BELT : conditions, contextes, limites ?*

Production de nourriture, fort potentiel d'absorption et de stockage d'eau, puits de carbone par la matière organique morte qu'ils contiennent, capacité à recycler des déchets humains en nourriture et à purifier l'eau, ... la panoplie des services rendus par les sols vivants est variée. Mais la qualité et l'importance de ces services sont tributaires de leur bon fonctionnement — qui tient à la fois de certains processus physico-chimiques que de mécanismes permettant aux plantes d'interagir avec les organismes contenus dans ces sols — dont la connaissance est encore lacunaire et nécessite de nombreuses recherches relevant de domaines qui ne sont pas les miens (notamment l'écologie du sol).

Les travaux prévus dans le cadre de ce sous-axe relèvent non pas de la production de connaissances fondamentales, mais d'une logique « d'observatoire » : veille scientifique dans les disciplines concernées, mais surtout recensement et suivi d'expériences menées sur des terrains et dans des contextes (climatiques, géographiques, humains, ...) contrastés, la question du rôle du « facteur humain » (connaissances, savoir-faire, expérience, motivation, ...) faisant l'objet d'une attention toute particulière.

Le choix est fait de limiter le champ d'observation de ce sous-axe aux seuls travaux abordant deux thématiques — parmi les nombreuses autres³⁵⁷ — afférentes aux sols vivants : celle de leur formation-régénération et celle de la « nutrition en boucle ».

A titre d'illustration de la première thématique peuvent être mentionnés les projets expérimentaux sur sols dégradés (par exemple, les friches ferroviaires des parcelles de déblais/remblais de la ligne à grande vitesse LGV Est) dirigés par Agnès Sourisseau (paysagiste et agricultrice) en vue de tester leur capacité à se régénérer et d'évaluer les actions pouvant être menées pour accompagner et accélérer les processus de « production des sols vivants »³⁵⁸.

La seconde thématique (nutrition en boucle) relève de la logique des expérimentations de Renaud de Looze (qui ont fait l'objet d'un développement au paragraphe 4.3.1) autour des modalités pratiques de recyclage des excréta humains pour « nourrir » les sols vivants destinés à la production alimentaire³⁵⁹.

Il est à noter que par anticipation du changement climatique, il est prévu d'accorder une place importante au suivi d'expériences en conditions de sécheresse et de températures extrêmes ; par exemple au travers d'études de cas (menées sous l'angle spécifique de la formation des sols vivants et/ou de la nutrition en boucle) portant sur des initiatives locales à l'image de celle du maire d'Abraha We Atsbha (village au sein d'une région désertique et sablonneuse au nord de l'Éthiopie³⁶⁰).

357/ Ce sous-axe ne prétend pas explorer la variété des sujets en lien avec les sols vivants.

358/ Ces travaux sont menés notamment dans le cadre de l'association *Agrofile* (<http://www.agrofile.fr/champs-d-action/conservation-des-sols-vivants/>).

359/ (De Looze, 2018). Ces travaux ressortent du thème de la circularité du système alimentation-excrétion (Esculier, 2018) explorée, notamment, par différents travaux développés dans le cadre du programme OCAPAPI au laboratoire LEESU.

360/ Sury *et al.*, 2018.

La multiplication d'analyses de ces expériences a pour but, par le biais d'une mise en perspective croisée, une meilleure compréhension de leurs limites³⁶¹ et des conditions de leur transposabilité afin d'apprécier leur caractère généralisable, l'objectif final étant de cerner le domaine de pertinence de partis d'aménagements résolument conçus « autour des sols vivants ».

5.2.2.- *La permaculture : un principe fondateur de la ville BELT ?*

Le second sous-axe relève d'une logique analogue à celle qui sous-tend le premier : après les promesses des sols vivants, c'est la pertinence de la permaculture en tant que modèle de production capable de faire face aux besoins alimentaires de la ville BELT qui est questionnée.

Par leur nature, les travaux envisagés s'apparentent, là aussi, à un « observatoire » selon deux approches complémentaires :

d'une part, veille scientifique en agronomie, botanique et écologie (visant plus particulièrement les avancées des connaissances sur les sujets de l'agroécologie³⁶², de d'agroforesterie³⁶³ et du retour à des variété anciennes³⁶⁴ en tant que piliers possibles d'une « nouvelle révolution verte ») ;

d'autre part, inventaire critique d'expériences permacoles, notamment en contexte urbain, à différentes échelles, dans différents cadres (individuel, associatif, amateur, professionnel,...), dans différentes conditions (avec focale sur les cas particulièrement défavorables : sols dégradés, climat aride,...), et toujours dans une perspective d'identification des forces et des limites de ces expériences, tant pour étayer le rôle de la permaculture dans la ville BELT que pour alimenter la controverse à cet égard (toujours importante pour aider à faire la part des choses entre le potentiel réel et le fantasme³⁶⁵).

Il est prévu que ce vaste thème de la permaculture soit abordé surtout sous l'angle de *l'agencement spatio-fonctionnel*, dans la continuité directe du présent document ; rappelons à cet égard que certains agencements étudiés s'inspirent directement de la « permaculture de design » (Whitefield, 2004) ; c'est le cas, entre autres, de la plupart de ceux relevant de la *famille I*, présentés au paragraphe 4.5.1. comme des exemples d'apports au potentiel BELT de la ville mais qui, en réalité, sont (pour l'instant ?) autant de conjectures que nous envisageons de conforter dans le cadre de ce sous-axe.

En voici quelques-unes à titre d'illustration :

- conjecture relative à la supériorité (en termes de production alimentaire) de l'agencement « en strates » (modèle de la forêt comestible ou savane nourricière) par rapport à un agencement

361/ Une attention particulière sera accordée à la recherche et au recensement d'expériences ratées, les échecs faisant en général l'objet d'une moindre diffusion alors qu'ils peuvent être riches d'enseignements.

362/ Rebulard, 2021.

363/ Dupraz, 2021

364/ Deb, 2021.

365/ Chercheur et ancien dirigeant d'une entreprise agro-alimentaire, Pascal Perri écrit : « Rien n'empêche d'encourager les modèles de production dits « alternatifs », de les tester et les analyser pour en tirer des leçons constructives et améliorer les pratiques agricoles. Cependant, il faut veiller à la crédibilité des démarches menées et se méfier des trouvailles exceptionnelles comparables au moteur à combustion qui fonctionne avec de l'eau. En économie, comme en physique et certainement en agronomie, il n'y malheureusement jamais de miracle... » (<http://stop-intox.fr/small-nest-pas-toujours-beautiful-la-permaculture-une-nouvelle-croyance>).

« planaire » (zones de monoculture intensive juxtaposées à des espaces naturels soustraits à l'activité humaine) ; cette question s'inscrit dans le cadre d'un débat qui ne porte pas sur l'intérêt de préserver la biodiversité (ce point est admis de manière à peu près consensuelle), mais sur l'échelle et les modalités d'une « bonne » articulation entre espaces « naturels » et espaces « agricoles »³⁶⁶ ;

- conjecture relative à la possibilité de remplacer — de manière systématique, à grande échelle et en toute circonstance — les traitements phytosanitaires par des agencements entre espèces végétales (phytosociologie) ;

- conjecture relative à la pertinence de dispositifs spatiaux destinés à créer des microclimats productifs : compte tenu de leur emprise au sol, leur apport aux rendements par unité de surface n'est-il pas illusoire ?

...

En somme, l'enjeu de ce sous-axe est de conforter la place du modèle permacole parmi les principes fondateurs de la ville BELT.

De manière générale, dans le contexte d'un modèle de ville qui fait très largement appel à la présence massive de la « nature », l'objectif des travaux menés dans le cadre de l'axe 1 est d'étayer l'argumentaire en faveur de la pertinence des *modalités* selon lesquelles cette nature est présente : *sols vivants* comme substrat, *permaculture* comme mode de gestion. Dit autrement, ces travaux ont pour but d'infirmer l'hypothèse selon laquelle le parti d'aménagement de la ville BELT reposerait sur des « vertus fantasmées » de ces modalités.

5.3.- AXE 2 : La sobriété de la ville BELT par ses agencements

Si l'axe 1 traite de la manière de produire des ressources pour la ville BELT, l'axe 2 continue à explorer le thème de leur gestion économe par la convocation du levier des agencements spatio-fonctionnels. Trois pistes sont proposées.

5.3.1.- Développer, compléter, questionner les notions

L'objet de ce premier sous-axe est, d'une part, de préciser certaines des notions définies et/ou mobilisées dans ce document (mutabilité, low-tech, patrimoine utile BELT) et, d'autre part, de poursuivre la réflexion sur la sobriété de la ville par ses agencements en introduisant de nouveaux éléments qui n'ont pas été abordés (la notion de « taille optimale BELT » d'une ville en est un exemple, sans doute parmi d'autres) :

366/ Deux modèles s'affrontent :

d'un côté, celui de la séparation stricte entre des espaces de production intensive et des espaces de conservation ; c'est sur ce modèle que repose, depuis les origines, l'instrument des politiques occidentales de préservation de la biodiversité ; c'est conformément à cette logique que la *Coalition de la Haute Ambition pour la Nature et le Peuples* — emmenée notamment par la France — préconise que d'ici 2030, 30% des surfaces terrestres et marines soient protégées (ce qui a pour conséquence de mettre davantage de pression sur les 70% qui restent pour nourrir l'humanité) ;

de l'autre, celui qui « s'appuie sur une écologie de réconciliation entre nature et activités humaines, sur les interactions des humains et des non humains au sein de systèmes agricoles complexes ayant recours à beaucoup de main d'œuvre [...]. Les pratiques agricoles sont alors censées conserver les espèces et les services des écosystèmes. » (Aubertin, 2021).

Ces deux modèles continuent à faire l'objet de diverses évaluations et le débat n'est pas clos.

— Introduite au paragraphe 4.4.3 (agencements de famille 3), la **mutabilité** est présentée comme une caractéristique essentielle des éléments bâtis de la ville en ce qu'elle permet l'activation « en mode BELT » du fonctionnement de cette dernière. Mais les contours de cette notion ne sont qu'esquissés au travers d'un déterminant spatial unique, la « générosité dimensionnelle » (ou « surdimensionnement »), sur la base du seul exemple de l'immeuble haussmannien. Compte tenu de son importance parmi les « contributeurs » à la ville BELT (elle figure parmi les quelques adjectifs proposés pour la définir), une réflexion est à mener pour préciser cette notion. Par exemple : en la confrontant à d'autres terrains d'étude que le seul Paris d'Hausmann ; en questionnant le statut de déterminant unique de la « générosité dimensionnelle » ; en s'interrogeant sur la contribution à la mutabilité d'autres caractéristiques spatiales (relevant par exemple de la composante géométrique) ; *etc.*

— La notion multiforme de **low-tech**, en dépit des nombreuses réflexions et développements qu'elle a suscités, est toujours « en devenir » et ses contours restent fluctuants.

Dans la mesure où, par construction, elle est l'un des fondements de l'idée même de « ville BELT », ses évolutions futures méritent de faire l'objet d'un suivi systématique (observatoire de la low-tech ?) ; une contribution à cette évolution dans le domaine de l'urbanisme peut d'ailleurs faire l'objet d'une proposition spécifique.

Parallèlement, afin de continuer à alimenter de manière constructive la controverse entre cornuopiens et doomsdayers, il est utile d'assurer également le suivi des évolutions de nouvelles technologies vertes (observatoire de la high-tech ?), notamment celles qui prétendent remettre radicalement en question — dans le respect des contraintes environnementales — l'imminence des pénuries d'énergies et de matières.

— En lien avec la low-tech, la notion tout juste esquissée de « **patrimoine utile BELT** » nous semble être porteuse d'un réel potentiel opératoire. De ce fait, un travail ayant pour objet de préciser cette notion en tant qu'outil d'aide à l'évaluation de projets urbains — et de la confronter à différents terrains d'étude³⁶⁷ — est envisagé.

— La réflexion autour de la **notion de « taille optimale »** d'une ville BELT est au nombre des projets de recherche relevant de ce sous-axe.

Rappelons que pour des raisons de délimitation de l'objet d'étude, la question de la contribution de la taille d'une ville à son potentiel BELT n'a pas été abordée dans ce document, pas plus que celle du rôle que pourrait jouer à cet égard l'agencement de villes au sein d'un système urbain plus vaste. Ces thématiques ont été éludées par la distinction binaire entre échelle humaine et échelle mécanique, sans précision de « borne supérieure » pour cette dernière.

La notion de taille maximale a été seulement effleurée au paragraphe 4.4.6. (agencements de famille 6) à l'occasion d'une note de bas de page relative au modèle de la Ville Creuse, qui propose de limiter le nombre d'habitants à une valeur comprise entre 150 000 et 300 000. Il est intéressant de noter que cet ordre de grandeur, qui relève du niveau de la ville moyenne (agglomération régionale), est en phase avec les conclusions de nombreux auteurs s'interrogeant sur l'avenir de la ville, chacun à partir d'un raisonnement qui lui est propre. A titre d'illustration, sur la base d'analogies avec des modèles physiques et biologiques, François Roddier arrive à l'idée d'un optimum fondé sur les régions : « *D'une économie internationale, on revient à une*

367/ Par exemple, dans quelle mesure tel bâtiment à énergie positive, tel écoquartier, voire tel aménagement à l'échelle d'une agglomération (comme le Grand Paris Express) est-il un patrimoine utile BELT ?

multitude d'économies locales, chacune cherchant son indépendance. On reconnaît là la caractéristique des processus d'effondrement. Les grandes structures sont remplacées par des petites. [...] Devenues autonomes, les régions développent des solutions locales, adaptées à chaque région, afin de résoudre un problème global commun à l'ensemble de l'humanité. [...] Comme le cristal parfait minimise son énergie interne, la symbiose parfaite d'un ensemble d'individus en un seul organisme vivant maximise l'efficacité avec laquelle cet ensemble dissipe l'énergie. Les agrégats d'individus sont les régions qui se seront réorganisées matériellement pour survivre à l'effondrement. De même que nous sommes des organismes multicellulaires, l'humanité sera un organisme multirégional. Le même problème de survie se posant dans le monde entier, chacune des régions partagera et accumulera une expérience commune, reposant sur l'ensemble des connaissances accumulées par toute l'humanité, l'équivalent du génome commun de toutes nos cellules [...] »³⁶⁸. Cette vision rejoint l'idée des « biorégions urbaines », que Thierry Paquot imagine structurées autour de villes de différentes tailles³⁶⁹ dont les plus grandes (une ou deux par région) ne dépassent pas 100 000 à 300 000 habitants.

La question de la taille de la ville BELT fera l'objet de futurs travaux.

5.3.2.- Passer d'un portrait éclaté à un portrait intégré

Nous défendons l'idée que différents types d'agencements ne peuvent pleinement contribuer au potentiel de la ville pour fonctionner en mode BELT que si leur action est coordonnée et simultanée. La liste d'adjectifs proposée en conclusion du chapitre 4 pour caractériser la ville BELT doit donc être considérée comme une étape provisoire en attendant un schéma global intégré reposant sur des principes pensés en synergie et selon une logique de cohérence scalaire (interactions entre échelles). C'est à la construction d'un tel ensemble cohérent qu'il est prévu de consacrer un travail spécifique dans le cadre de ce sous-axe, selon une démarche comparable à celle du modèle de la Ville Creuse (cf. paragraphe 4.4.5.).

5.3.3.- Passer du « potentiel » aux « effets ».

Pour rappel, l'un des constats se dégageant du bilan « par familles » réalisé dans le cadre de ce document (section 4.4.) est que la contribution à la sobriété énergétique des différents agencements évoqués est souvent conjecturale.

Or chacune de ces conjectures peut être considérée comme un prétexte à des travaux visant à mettre en évidence les effets observables de certains types d'agencements sur des pratiques effectives, ce qui revient à passer d'une conjecture à une hypothèse validée. Par exemple, en facilitant la pratique de la marche et, plus largement, en contribuant à l'attractivité des espaces publics pour le piéton, certains agencements de famille 3 (paragraphe 4.4.3.) augmentent la « marchabilité » de ces espaces, comme le suggère un faisceau d'indices s'appuyant sur de nombreux travaux. Mais *quid* de l'évolution effective de la pratique de la marche à pied en lien avec cette amélioration de la marchabilité ?

De manière générale, la difficulté à identifier (voire à quantifier) le rôle d'un agencement dans les pratiques tient à la difficulté de démêler l'écheveau des mécanismes conduisant à des changements de ces dernières.

S'inscrivant dans la continuité de certains de mes travaux antérieurs (en particulier ceux

368/ Roddier, 2014, p.161, p.165.

369/ Pour Thierry Paquot, des regroupements humains de tailles variées sont indispensables pour préserver la diversité indispensable à la vie en société (Paquot, 2020, p.169).

portant sur les modes actifs dans les quartiers de gares selon une logique de complémentarité avec le mode ferré), l'objet de ce sous-axe est de contribuer à une meilleure compréhension des déterminants susceptibles de conditionner le passage du « potentiel des agencements » aux « effets de ces agencements » dans le domaine des mobilités sobres.

5.4.- AXE 3 : Questionner et accompagner la transition vers la ville BELT

Le parti que nous avons retenu dans le cadre de ce travail relève d'une logique de réflexion sur un avenir, mais pas sur le *chemin* vers cet avenir. De ce fait, alors que la question de la *transition* (écologique, énergétique) compte certainement parmi celles les plus présentes dans les débats actuels, nous l'avons laissée en suspens.

C'est donc elle qui fait l'objet de ce troisième axe de recherche, dont la construction n'est pas aboutie au stade actuel de nos réflexions. Pour cette raison, nous n'en donnons pas un aperçu structuré (à l'image de la présentation des axes 1 et 2) mais proposons deux pistes qui orienteront nos futurs travaux autour de cette question.

5.4.1.- Observer les obstacles et les dynamiques

S'interroger sur un changement — en l'espèce, la transition vers un hypothétique avenir dont la ville BELT est une manifestation — soulève la question des obstacles (ou « verrous ») qui s'y opposent et des dynamiques qui le favorisent. Leur identification et le suivi de leurs évolutions est une nécessaire étape préalable à la décision et à l'action.

Pour illustrer l'importance d'un tel suivi, prenons l'exemple du verrou que représente un choix de société interdisant de considérer une politique comme acceptable dès lors qu'elle ne s'appuie pas sur l'idée de *croissance* (le choix même de l'expression « *développement durable* » est particulièrement révélateur) ; un scénario en décalage par rapport à cette idée (comme c'est le cas de la ville BELT) est par conséquent inenvisageable : la primauté du critère de la croissance dans l'échelle des priorités joue le rôle d'obstacle. Toutefois, ce constat est susceptible d'être conditionné par la manière dont cette croissance est mesurée : le véritable obstacle serait alors non pas cette importance accordée à la croissance, mais une *convention comptable*. A l'occasion d'une conférence à l'INSEAD³⁷⁰, Jean-Marc Jancovici évoque l'une de ces conventions, consistant à assimiler richesse et PIB ; mais en réalité, ce dernier mesure la contrepartie économique du *flux* annuel de transformation, alors que la vraie richesse, c'est le *stock*. Une manière originale d'illustrer cette idée est l'analogie entre une « planète » et la *Station spatiale internationale*, dont la construction et le lancement ont coûté 100 milliards de dollars ; puisqu'elle accueille six astronautes, le prix à payer pour fournir à un être humain un lieu de vie doté d'une atmosphère respirable, d'une température supportable et d'un (début de) cycle de l'eau est d'environ quinze milliard de dollars. Dans la mesure où, d'une part, la planète Terre offre tout cela (et bien davantage) à chacun de ses habitants et, d'autre part, les activités productives de l'humanité détruisent chaque année au moins 0,1% des stocks (d'hydrocarbures, de sols, de forêts, de poissons, etc), la « valeur comptable » des destructions annuelles de chaque terrien est d'au moins quinze millions de dollars (sans doute beaucoup plus), un montant à comparer à la valeur moyenne du PIB — 15 000 dollars par an et par habitant : le rapport est de

370/ Jancovici, J.-M., « Energie et climat pour demain, relance et finitude : quels scénarios après les crises ? », INSEAD, *Les Conférences de l'INSEAD*, Fontainebleau, 7 janvier 2021. [En ligne] <https://www.youtube.com/watch?v=3i1wjUsQemo> (consulté le 19 janvier 2021).

1000 à 1. Dit autrement : en consommant davantage de stocks naturels, une augmentation du PIB ne correspond pas à un enrichissement, mais à un *appauvrissement*. Une évaluation (d'une politique, d'un projet, d'un scénario,...) faisant intervenir non pas la croissance (du PIB) mais la préservation de richesse (stocks naturels au sens large) aurait de fortes chances de changer radicalement les choix politiques (dans cet ordre d'idée, le « Rapport Dasgupta »³⁷¹ publié en février 2021 appelle à remplacer la seule comptabilité traditionnelle de la croissance *via* le PIB par un calcul du bien-être économique prenant en compte les services rendus par la nature).

Cet exemple illustre le caractère relatif d'un obstacle selon l'évolution des idées au sein d'une société, et donc l'importance d'un *suivi* de cette évolution ; la reconnaissance — ou non — de la ville BELT en tant qu'avenir « économiquement acceptable » pourrait être juste une question de convention comptable...

Tout comme les obstacles, les dynamiques (initiatives, réalisations, courants d'idées,...) apparemment favorables à la transition vers la ville BELT (car compatibles avec les principes fondateurs de cette dernière) sont à observer et à étudier afin d'en apprécier les potentiels et les limites.

Sous réserve d'une analyse plus approfondie, un exemple d'une telle « dynamique favorable » pourrait être la montée en puissance du phénomène « permaculture »³⁷², dont l'impressionnant « réseau d'expérimentations grandeur nature » sur la toile (internet) est une manifestation particulièrement marquante. A en croire la multiplication, au cours des dernières années, des « pages web » et du nombre de consultations dont certaines d'entre elles font l'objet³⁷³, la permaculture semble susciter un véritable engouement chez un nombre croissant d'internautes. La toile devient ainsi de plus en plus le théâtre foisonnant d'une nébuleuse d'acteurs véhiculant l'information et proposant à titre gracieux de véritables formations en ligne qui, par effet boule de neige, suscitent d'autres vocations, produisant un effet de spirale ascendante autoalimentée.

Les trajectoires de ces passionnés sont très diverses, depuis le jardinier amateur partageant ses astuces pour cultiver un potager de quelques dizaines de mètres carrés en milieu urbain jusqu'au propriétaire d'une ferme expérimentale où sont organisés des stages et des chantiers collectifs (rencontrant souvent un très vif succès, avec de longues listes d'attente) et qui devient parfois auteur d'ouvrages³⁷⁴. Mais dans tous les cas, le partage de retours d'expériences pratiques réussies semble être un moteur puissant du succès de la permaculture auprès d'un large public. En lien — ou non — avec ce phénomène, d'autres dynamiques sont à l'œuvre, comme le développement d'un tissu associatif en faveur de différentes formes de « verdissement » des

371/ Intitulé *The Economics of Biodiversity : The Dasgupta Review*, ce rapport, commissionné en 2019 par le gouvernement britannique, est le fruit du travail de spécialistes internationaux, coordonné par un professeur d'économie de l'université de Cambridge, Partha Dasgupta. Il est disponible en ligne : <https://www.gov.uk/government/publications/final-report-the-economics-of-biodiversity-the-dasgupta-review>.

372/ <https://blogs.mediapart.fr/nbgk/blog/270219/le-phenomene-permaculture-simple-mode>

373/ Avec un nombre de vues avoisinant le million (<https://www.youtube.com/watch?v=4SZasMQH9yU>), le cas de l'entretien réalisé par Damien Dekarz (permaculteur amateur) avec Renaud de Looze sur le thème de la nutrition en boucle des écosystèmes nous semble particulièrement illustratif pour témoigner d'une manifestation d'intérêt massive chez les internautes pour un sujet très technique (utilisation des excréments au jardin potager) en lien direct avec la thématique du potentiel de recyclage des nutriments par les sols.

374/ Perrine et Charles Hervé-Gruyer (créateurs en 2004 de la désormais très médiatisée *Ferme du Bec Hellouin* dont il a déjà été question au paragraphe 4.3.1.) sont un exemple emblématique de « nouveaux paysans » ayant abandonné leur milieu d'origine (souvent urbain).

villes³⁷⁵ ou le nombre croissant de microfermes urbaines³⁷⁶.

Parallèlement à cette tendance d'une « nature » de plus en plus présente en milieu urbain et qui s'apparente à une forme de *dédensification de la ville*, le phénomène de *densification des campagnes* — dont témoigne la croissance démographique que connaissent depuis une trentaine d'années des espaces qualifiés de « campagnes urbaines » par certains auteurs (Léger & Mariolle, dir., 2018) — pourrait également faire office de signe avant-coureur d'une évolution allant dans le sens de la ville BELT (dont la densité moyenne est celle d'un territoire « ni ville ni campagne »).

Sur un autre registre, le développement de divers mouvements d'inspiration survivaliste et, dans le même ordre d'idée, la formalisation et le succès du courant de pensée de la collapsologie qui accorde une place centrale à la réflexion sur des solutions collectives visant notamment à développer des systèmes alimentaires urbains résilients (Servigne, 2014), pourraient également être un marqueur d'une transition en marche³⁷⁷.

Un suivi de telles dynamiques (certainement parmi d'autres) selon une grille d'observation critique adaptée — par exemple pour évaluer avec un recul suffisant la réussite de certaines expériences³⁷⁸ ou pour essayer de faire la part des choses entre « tendance de fond » témoignant de changements sociétaux profonds³⁷⁹ et « effet de mode » temporaire³⁸⁰ — est au nombre des travaux envisagés dans cet axe de recherche.

5.4.2.- Domaines et cibles d'action en vue d'accompagner la transition

La seconde piste proposée est orientée vers l'*action d'accompagnement de la transition*. Le premier objectif des travaux envisagés (préalable à l'accompagnement proprement dit) est d'en identifier les domaines et les cibles. Etant entendu que dans la recherche et l'enseignement, l'action relève de la « gestion de l'information » (si l'on admet que la connaissance est une information comprise), l'identification du domaine revient à définir la nature du message à transmettre, celle de la cible vise à préciser à qui s'adresse le message.

L'intérêt d'une telle réflexion tient à ce qu'elle contribue à créer des conditions favorables à la communication, aux dialogues et débats constructifs (Larrue, 2017)³⁸¹, aux dispositifs partici-

375/ Les jardins partagés en sont un exemple.

376/ Les microfermes attirent une nouvelle génération d'agriculteurs (non issus du milieu agricole), qui ont été à l'initiative « de 30% des 5000 installations agricoles aidées en France pour 2014 [...]. En milieu urbain, alors que le maraîchage classique nécessite au moins 15 000 m² pour faire vivre un agriculteur, les microfermes n'ont besoin que de 2000 à 8000 m². » (Morel et al., 2018).

377/ Tout en soulevant la question de la peur en tant que puissant moteur des changements ainsi que celle du rôle des situations critiques en tant que « accélérateurs » de ces derniers : le succès des circuits courts durant la crise sanitaire du Covid-19 (les drives fermiers en France auraient « vu leurs ventes bondir jusqu'à +400% ») pourrait en être une illustration (<https://www.rtl.fr/actu/debats-societe/agriculture-les-circuits-courts-plebiscites-depuis-la-crise-coronavirus-7900004793>).

378/ Par exemple, les possibilités de réussite des microfermes en milieu urbain restent largement à explorer, car la ville peut apporter un grand nombre de contraintes supplémentaires (pollution des sols, contrainte foncière, vols).

379/ Dans sa thèse, Ana Cristina Torres suggère que par-delà leur contribution au « verdissement » et à l'accroissement de la biodiversité, les jardins partagés pourraient être à la fois un révélateur et un moteur de transformation des modes de vie (Torres, 2017).

380/ A titre d'illustration, la pratique du compostage en pied d'immeuble à Paris, pourtant efficace d'un point de vue matériel, relèverait davantage d'un nouveau loisir urbain que d'un dispositif de gestion des déchets (Lehec, 2018).

381/ Corinne Larrue évoque les difficultés des interactions (notamment entre acteurs des politiques publiques et

patifs (Barbier & Larrue, 2011)³⁸²,... composantes indispensables d'une *transition* — à ne pas confondre avec *effondrement*³⁸³ — nécessairement conditionnée par un changement radical des mentalités. Or un tel changement passe par l'information (la nature du message étant variable avec le public) : pour qu'une personne consente à modifier son mode de vie, il faut qu'elle soit clairement informée de la situation, et surtout, qu'elle *l'accepte*. En vue de faciliter cette acceptation, un vrai travail est à faire en matière de pédagogie. A cet égard, puisque de nombreux exemples³⁸⁴ semblent montrer l'inefficacité d'une « stratégie de la culpabilisation », une alternative à explorer consiste à mettre en exergue ce qu'un changement de pratiques et de modes de vie aurait comme incidences positives pour chacun : à l'image de l'amateur de camping prêt à renoncer librement à de nombreux éléments de confort pendant ses vacances, l'acceptation de la sobriété énergétique peut être facilitée par la vision d'un avenir offrant certaines compensations « qui en valent la peine »³⁸⁵. La construction d'argumentaires s'appuyant sur des scénarios « d'avenirs désirables »³⁸⁶ relève de cette approche. Selon cette logique, les travaux envisagés dans le cadre de l'axe 3 consistent en la production de discours circonstanciés autour de la ville BELT s'attachant à montrer ce que cette dernière peut apporter de positif, ou en d'autres termes, en quoi elle peut contribuer à un tel « avenir désirable ».

Cependant, il ne s'agit à ce stade que d'une piste en gestation pour alimenter un axe de recherche dont la finalité est de contribuer à accompagner la transition vers la ville BELT. Il est à noter que dans la mesure où elles relèvent de cette même logique « d'accompagnement de la transition », les activités menées au sein de l'association Shift Project³⁸⁷ pourront servir de source d'inspiration. Des collaborations sont envisagées.

chercheurs) et l'importance de développer, dans les domaines de la transition et de la résilience, un support pour un débat aussi large que possible associant, par-delà la communauté des chercheurs et les acteurs des politiques publiques, l'ensemble des citoyens.

382/ Rémi Barbier et Corinne Larrue soulignent l'importance de penser les liens entre politiques environnementales et participation : « [...] la protection de l'environnement passe de manière croissante par des mécanismes de marché et de responsabilisation individuelle pour lesquels la participation reste encore largement à inventer [...]. » (Barbier & Larrue, 2011, p.104).

383/ La perspective du risque d'un chaos généralisé inspire à Jean-Marc Jancovici une réflexion sur la pertinence d'un modèle « individualiste » d'aménagement du territoire (consistant à observer les tendances d'une société et à « composer avec ce que les gens veulent ») face au modèle d'une planification plus volontariste, sans doute à privilégier face à l'urgence en vue d'éviter l'effondrement ou en limiter les effets (Jancovici, août 2019).

384/ Dont certains récents comme la crise des Gilets jaunes ou la crise sanitaire du Covid-19.

385/ Cette idée est en lien direct avec l'abandon du PIB comme indicateur incarnant le bonheur. L'enjeu est d'arriver à construire un imaginaire collectif dans lequel « avoir moins » puisse être perçu comme au moins aussi désirable que « avoir plus », donc une « histoire » d'un avenir attractif en dépit de revenus qui se contractent.

386/ Dans un récent ouvrage, Pierre Veltz développe l'idée d'une économie humano-centrée à la fois sobre et désirable (Veltz, 2021).

387/ *Think tank* ayant pour objectif d'éclairer (production d'analyses, élaboration de propositions innovantes,...) et d'influencer (diverses actions dans la société civile, auprès des élus, auprès des entreprises, etc) le débat sur la transition énergétique (<https://theshiftproject.org/>).

Conclusion

« *Nous autres, civilisations, nous savons désormais que nous sommes mortelles* » écrivait Paul Valéry au lendemain de la Première Guerre mondiale³⁸⁸. Un siècle plus tard, le discours anxiogène autour d'une pénurie énergétique annoncée et de son corollaire climatique nous rappelle quotidiennement la réalité préoccupante d'une menace grave pour la survie de notre civilisation.

Dans une logique d'action, conformément à la pensée de Saint Thomas d'Aquin qui invite à compléter la compréhension du réel « tel qu'il est » par la perspective de « ce qu'il devrait être », l'attitude à adopter face à un avenir par définition incertain consiste moins à se demander « où allons nous ? » que de se poser la question « où voulons-nous aller ? ».

En admettant que l'unique avenir souhaitable est celui qui est « viable sur la longue durée » (une proposition pouvant éventuellement prêter à débat), la seule bonne réponse est celle d'un futur qui prend en considération les lois de la thermodynamique, en particulier la troisième, selon laquelle — dans son acception se référant à l'auto-organisation des systèmes ouverts — les structures dissipatives évoluent de manière à maximiser leur dissipation d'énergie. C'est ce que confirme la biologie. C'est ce que confirme aussi l'histoire de l'humanité³⁸⁹ (Roddier, 2012, p.190). A l'image d'un feu qui s'étend d'autant plus et d'autant plus rapidement que la quantité de combustible est importante, toute espèce vivante évolue de façon à épuiser ses ressources *le plus vite possible*. C'est ce qu'a fait et continue à faire l'humanité avec les combustibles fossiles. C'est ce qu'elle fera encore si elle arrive à maîtriser la fusion nucléaire ou toute autre source d'énergie à *débit* illimité. Mais faute de pouvoir disposer de *quantités* illimitées, sa durée de vie sera celle d'un feu de paille.

L'avenir durable est celui qui évite ce « feu de paille » mortifère au profit d'une « combustion lente et contrôlée » alimentée par l'unique source d'énergie extérieure dont dispose ce système ouvert qu'est la Terre : le Soleil. Celui-ci peut garantir à l'humanité de manière durable un certain niveau de vie, à condition que ce dernier soit « ajusté » au débit du flux d'énergie solaire ; à condition également que la manière dont cette énergie est captée soit « ajustée » aux ressources de minerais et d'espace nécessaires à la production des dispositifs de captage ; à cet égard, compte tenu des limites des stocks disponibles (notamment de métaux), le recours — non exclusif mais aussi étendu que possible — à des transformateurs solaires *naturels* optimisés selon les besoins de l'humanité est l'éventualité la plus probable dans cet avenir durable.

Le défi à relever par l'urbanisme est d'aider à construire ce futur qui tient compte des principes de la thermodynamique. C'est à la réflexion sur un tel « **thermo-urbanisme** » que ce travail entend apporter une contribution en interrogeant le potentiel de la structure physique de la ville à favoriser des modes de vie énergétiquement sobres de ses habitants, suffisamment sobres pour leur permettre, le cas échéant, de satisfaire leurs besoins vitaux sans recours aux énergies fossiles. Cependant, notre propos n'est pas d'apporter des réponses mais, plus modestement, d'alimenter un débat déjà ancien autour de l'agencement spatio-fonctionnel comme outil au service de l'aménageur.

L'apport de ce travail à mes activités de recherche peut être évalué sous l'angle aussi bien rétrospectif que prospectif.

388/ Valéry, P., *La Crise de l'esprit*, 1919.

389/ Roddier, 2012, p.190.

Concernant sa dimension rétrospective, trois points méritent d'être soulignés.

- Tout d'abord, en poursuivant la réflexion sur l'intérêt d'une approche s'attachant à explorer des *potentiels* (en complément de celles s'intéressant aux *effets*), il contribue à asseoir le cadre de mes travaux antérieurs sur la « forme urbaine » (une déclinaison de l'agencement spatio-fonctionnel) au service d'un dessein, qui relèvent de cette même logique.

- Ensuite, en proposant un argumentaire en faveur de l'état stationnaire comme seul avenir viable à long terme, il consolide la pertinence de ces mêmes travaux dont les objectifs (par exemple : encourager la pratiques de la marche à pied ou du vélo utilitaire ; permettre aux espaces périurbains de fonctionner sans recours massif à la voiture particulière ; faciliter le report modal vers les transports collectifs ;...) sont de nature à contribuer à construire cet avenir.

- Enfin, en soulignant le caractère d'urgence de la situation actuelle, il cautionne l'intérêt de ces travaux, même s'ils (voire : *parce qu'ils*) relèvent du long terme : compte tenu des temporalités longues qui caractérisent l'évolution des structures urbaines, il n'est jamais trop tôt pour réfléchir à des configurations compatibles avec un avenir « sous contrainte » (énergie, matières, nourriture, eau,...).

Sa dimension prospective est concrétisée notamment par la formulation d'une intention de recherche qui pose les jalons de mes travaux futurs. La nouveauté de leur (ré-)orientation tient essentiellement à trois éléments.

- En premier lieu, la prise en compte de la « nature » comme composante indispensable de la ville. De par le rôle fondamental qui lui est dévolu, ce n'est pas seulement le « statut » de cette composante naturelle qui est interrogée (« forêt civilisée ou ville végétalisée ? ») ; c'est également l'évolution des métiers d'urbaniste, d'agronome et d'agriculteur — chacun avec sa vision « d'aménageur des territoires » complémentaire de celles des autres — qui pose question : le temps est-il venu non seulement d'« inventer la ville du futur à partir des champs »³⁹⁰, mais également d'« inventer l'agriculture du futur à partir des villes »³⁹¹ ? Voire d'ajouter une lettre A (pour agronomie ou agriculture) à l'acronyme du laboratoire LVMT ? Ces questions font écho à *l'interdisciplinarité radicale* de l'urbanisme et de l'aménagement soulignée par Sabine Barles, une interdisciplinarité « *qui ne se limite pas aux sciences sociales, mais en appelle aussi aux sciences de la nature* » (Barles, 2018, p.218) ; voire aux sciences physiques, notamment à la thermodynamique, dont l'éclairage offre une clé de lecture de l'évolution des sociétés humaines (Roddier, 2012) qui enrichit le débat autour de l'urbanisme de demain et de son cadre d'action à long terme.

- Le deuxième élément qui contribue à la réflexion sur la ville du futur est une nouvelle manière d'envisager son fonctionnement, au travers de la prise en compte de l'éventualité d'une pénurie énergétique sévère. Celle-ci amène à penser une organisation de la ville qui, par-delà les opportunités et facilités qu'elle offre aux habitants d'adopter des modes de vie plus sobres, per-

390/ Titre de la conférence-débat organisée le 24 janvier 2019 au Pavillon de l'Arsenal à l'occasion de l'exposition « Capital agricole, chantiers pour une ville cultivée ».

391/ Selon certaines sources, une fois mis en place, un jardin permacole permet d'assurer des rendements élevés moyennant un investissement temporel d'une demi-heure par jour, une valeur à mettre en regard avec la proportion du temps consacré quotidiennement aux loisirs, supérieure à 20% dans la plupart des pays de l'OCDE. « Demain tous agriculteurs, sans remettre en cause l'urbanité » est-il le slogan d'un avenir envisageable ? Ce n'est sans doute pas exclu, sous réserve d'un agencement *ad hoc* de la ville favorisant les proximités aux adresses naturelles.

mette un passage rapide³⁹² à un « mode survie » en situation critique. L'acronyme BELT (basse énergie low-tech) a d'ailleurs été proposé en référence au potentiel d'une ville à continuer à fonctionner dans une telle éventualité, certes au ralenti et au prix de concessions au confort des habitants, mais permettant néanmoins à ces derniers de satisfaire leurs besoins vitaux sans qu'aucune adaptation structurelle ne soit nécessaire. Un tel fonctionnement — qui, au prisme des « standards » des villes (notamment) européennes actuelles, serait qualifié « d'exceptionnel » et de « survivaliste », mais dont certains aspects pourraient être appelés à devenir la règle dans un avenir « thermo-compatible » — est rendu possible par une configuration propice à un recours plus étendu à des solutions low-tech présentant un certain degré d'indépendance vis-à-vis d'une haute technologie reposant sur des réseaux et des complémentarités d'échelle mondiale.

- Cette mobilisation de la notion de low-tech — qui, par construction, sous-tend l'idée de la ville BELT — constitue la troisième originalité par rapport à mes travaux antérieurs. La démarche adoptée ne relève pas pour autant d'une logique de rejet de la haute technologie, mais s'attache à identifier les domaines où il est possible de s'en passer sans remettre en cause la qualité de vie : on n'habite pas « moins bien » dans un immeuble en terre crue bien conçu³⁹³ ; on ne mange pas « moins bien » en consommant des produits issus d'une agriculture locale fondée sur les principes de la permaculture ; on ne se déplace pas « moins bien » en train ou à vélo au sein d'une ville dont l'agencement n'est pas subordonnée aux exigences de la voiture ;... De nombreux aspects de la vie de tous les jours s'accommodant de la sobriété des basses technologies, les ressources ainsi préservées peuvent être allouées là où la high-tech est (provisoirement ?) inévitable, mais aussi là où cette dernière « est au service » des solutions low-tech. Par exemple, dans le domaine hautement stratégique de la production alimentaire, les échanges (de connaissances, d'expériences, de savoir-faire, de graines,...) aussi bien formels (collaborations scientifiques) qu'informels (toile) à l'échelle planétaire — donc impossibles sans le recours à la haute technologie — facilitent et accélèrent le développement de solutions low-tech alternatives à l'agriculture industrielle.

C'est sur cette dualité parfois ambiguë entre hautes et basses technologies que nous concluons, en en proposant une relecture au prisme de l'agencement, argument central de ce travail : la distinction high-tech *versus* low-tech ne tiendrait-elle pas à l'échelle « à laquelle on agence » ?

La high-tech, c'est le monde des nanotechnologies, des microprocesseurs, des puces électroniques, du noyau cellulaire, des alliages métalliques complexes, des particules élémentaires de la matière,... à façonner, manipuler, relier, organiser, *agencer* — à l'échelle microscopique. La high-tech, c'est aussi le monde des complémentarités lointaines, des accélérateurs de particules, des centrales nucléaires, des mégastructures,... à façonner, manipuler, relier, organiser, *agencer* — à l'échelle planétaire.

392/ Par exemple, la réservation de tous les espaces non artificialisés à la « culture » de sols vivants (lents à se constituer) permet, en cas de nécessité, la transformation rapide (quelques mois suffisent) d'un parc ou d'un espace vert urbain en une exploitation agricole très productive. Une anticipation « du pire » par remplacement systématique d'arbres et arbuste décoratifs par des variétés fruitières (ont-elles d'ailleurs une valeur esthétique moindre ?) relève également de cette logique.

393/ On y habite même beaucoup mieux que dans un immeuble high-tech mal conçu.

En face, la low-tech, c'est le monde de nos cinq sens « non augmentés », du savoir-faire commun, des outils manuels, de la ressource locale, des matériaux traditionnels, ... à façonner, manipuler, relier, organiser, *agencer* — à l'échelle humaine.

D'une certaine manière, qu'elle soit high-tech ou low-tech, toute solution relève d'une forme d'agencement. Mais à des échelles différentes. Fonder sur la high-tech une réponse à un problème reviendrait ainsi à considérer qu'un « bon agencement » aux échelles suprahumaines peut non seulement remplacer avantageusement un « bon agencement » à l'échelle humaine, mais surtout compenser les effets délétères d'un « mauvais agencement » à cette échelle : corriger l'acoustique d'un opéra aux formes et matériaux inappropriés par de l'électronique ; améliorer le confort thermique d'un bâtiment mal conçu par un système complexe de capteurs et de climatisation ; répondre aux besoins *d'interagir* au sein d'une ville démesurément étalée par une mobilité individuelle motorisée faisant intervenir des alliages à composition complexe, des énergies et des métaux venus de loin, des systèmes de production d'envergure mondiale ; ...

En résumé, « penser low-tech », ce serait réfléchir à des agencements à l'échelle humaine ; « penser high-tech », ce serait prétendre remédier à un « déficit de réflexion » à l'échelle humaine par un « surplus de réflexion » sur les agencements aux échelles microscopique et planétaire.

Seulement, agencer à ces échelles nécessite des moyens ayant un coût énergétique et environnemental auquel nous ne sommes plus en mesure de faire face.

N'est-il pas temps de (re)découvrir la richesse, les possibilités, les vertus des agencements d'échelle humaine ?

Bibliographie

AgroParisTech, *Pour une agriculture innovante à impacts positifs*, 2019.

[En ligne] <https://ecologie-integrale.fr/wp-content/uploads/2019/04/Plaidoyer-fermes-avenir.pdf> (consulté le 2 septembre 2020).

Alderfer, C., « An Empirical Test of a New Theory of Human Needs », *Organizational Behaviour and Human Performance*, volume 4, issue 2, May 1969, p. 142–175.

Alexander, C., *A Structure of Pattern Language*, Oxford, Oxford Press, 1977.

Alglave, G., « L'émergence d'une filière terre », *Maisons paysannes de France*, n°216, juin 2020, p.14-15.

Allain, R., *Morphologie urbaine. Géographie, aménagement et architecture de la ville*, Paris, Armand Colin, coll. U Géographie, 2004.

Allaire, G., *Conception optimale des structures*, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, Collection Mathématiques et Applications, 2007.

Altshuller, G., *40 Principles TRIZ Keys to Technical Innovation*, Worcester, Technical Innovation Center, 2002 (1st ed. 1998).

Anderson, W., Kanaroglou, P., Miller, E., « Urban form, energy and environment : a revue of issues, evidence and policy », *Urban Studies*, vol.33, n°1, p. 7-35.

Anger, R., Fontaine, L., *Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture*, Paris, Belin, Cité des sciences et de l'industrie, 2009.

Aubertin, C., « Protéger 30% de la planète : une ambition équivoque », *Pour la Science*, n°526, août 2021, p.20.

Baize, D., *Naissance et évolution des sols. La pédogenèse expliquée simplement*, Versailles, Editions Quae, 2021.

Barra, M., « Villes résilientes, réconcilier urbanisme et nature », *Urbanisme*, n°417, avril-mai-juin 2020, p.46-49.

Barocca, B., « Extrêmes hydrologiques et résilience urbaine », *Urbanisme*, n°417, avril-mai-juin 2020, p.38-41.

Bariol-Mathais, B., « Objectif ZAN », *Urbanisme*, n°416, janvier-février-mars 2020, p.60-61.

Barbier, R., Larrue, C., « Démocratie environnementale et territoires : un bilan d'étape », *Participations*, n°1, 2011, p.67-104.

[En ligne] <https://www.cairn.info/journal-participations-2011-1-page-67.htm> (consulté le 20 août 2021).

Barles, S., « Le métabolisme urbain et la question écologique », *Les Annales de la Recherche Urbaine*, n°92, 2002, p.143-150.

[En ligne] https://www.persee.fr/doc/aru_0180-930x_2002_num_92_1_2469 (consulté le 19 août 2021).

Barles, S., « L'écologie territoriale et les enjeux de la dématérialisation des sociétés : l'apport de l'analyse des flux de matières », *Développement durable et territoires*, n° 1, vol. 5, 2014.

[En ligne] <http://developpementdurable.revues.org/10090> (consulté le 26 mai 2021).

Barles, S., « Ecologie territoriale et métabolisme urbain : quelques enjeux de la transition socioécologique », *Revue d'Economie Régionale & Urbaine*, vol. 5, 2017, p.819-836.

[En ligne] <https://www.cairn.info/revue-d-economie-regionale-et-urbaine-2017-5-page-819.htm> (consulté le 18 août 2021).

Barles, S., « L'aménagement et l'urbanisme : disciplines de l'interface, interdisciplines », *Revue européenne des sciences sociales*, n°56, vol.1, 2018, p.203-218.

[En ligne] <https://www.cairn.info/revue-europeenne-des-sciences-sociales-2018-1-page-203.htm> (consulté le 18 août 2021).

Barot, S., « La biodiversité des sols nous protège, protégeons-la aussi », *The Conversation*, 4 décembre 2017. [En ligne] <https://theconversation.com/la-biodiversite-des-sols-nous-protège-protégeons-la-aussi-88538> (consulté le 2 mai 2021).

Bastin, J.-F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., *et al.*, « The global tree restoration potential », *Science*, Vol. 365, Issue 6448, 05 July 2019, p.76-79, [En ligne] <https://science.sciencemag.org/content/365/6448/76> (consulté le 28 mars 2021)

Batty, M., Longley, P., *Fractal Cities : A Geometry of Form and Function*, London, Academic Press Limited, 1994.

[En ligne] <http://www.fractalcities.org/book/fractal%20cities%20low%20resolution.pdf> (consulté le 12 mai 2021).

Bennett, A.F., *Linkages in the landscape. The role of corridors and connectivity in wildlife conservation*, Gland, Switzerland et Cambridge, UK, IUCN, 2003.

Bergès, L., Roche, Ph., Avon, C., « Corridors écologiques et conservation de la biodiversité, intérêts et limites pour la mise en place de la Trame verte et bleue », *Sciences Eaux & Territoires*, N°3, 2010, p.34-39.

Bertaud, A., Malpezzi, S., *The spatial distribution of population in 48 world cities : implications for economies in transition*, World Bank, 2003.

Besir, A. B., Cuce, E., « Green roofs and facades : A comprehensive review. », *Renewable and Sustainable Energy Review*, Vol.82, Part 1, February 2018, p.915-939.

Bevilacqua, P., D. Mazzeo, D., Bruno, R., Arcuri, N., « Experimental investigation of the thermal performances of an extensive green roof in the Mediterranean area », *Energy and Buildings*, Vol.122, June 2016, p.63-79.

[En ligne] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778816302183> (consulté le 6 juin 2021).

Bihouix Ph., *L'âge des low tech, Vers une civilisation techniquement soutenable*, Paris, Editions du Seuil, Collection : Anthropocène, 2014.

Bihouix, Ph., « Face à la raréfaction des ressources, quelle innovation pour demain ? », EIVP, *Conférences sur le métier d'ingénieur et les enjeux climatiques*, Paris, 30 septembre 2020. [En ligne] <https://www.eivp-paris.fr/évènement/conferences-du-premier-semester-2020-metier-dingenieur-et-enjeux-climatiques> (consulté le 11 janvier 2021).

Bihouix, Ph., « Sobriété, Solidarité, Prospérité : Pour un New Deal européen ! », PRODURABLE - Le salon des acteurs et des solutions économiques durables, *Sobriété, Solidarité, Prospérité – Pour un New Deal européen – 13^e édition*, Palais des Congrès de Paris, 7 et 8 septembre 2020. [En ligne] <https://www.youtube.com/watch?v=FH6Yse2RzBQ> (consulté le 22 novembre 2020).

Bihouix, Ph., « Sobriété, équipements et matériaux dans la sobriété énergétique », *Assises Européennes de la Transition Énergétique*, 22^e édition, Dunkerque, 15 janvier 2021. [En ligne] <https://www.youtube.com/watch?v=mXAmnQQkbks> (consulté le 19 janvier 2021).

Blanc, N., Clergeau, Ph., « La nature en ville », In : Euze, A., Eymard, L., Gaill, F. (dir.), *Le développement durable à découvert*, Paris, CNRS Editions, 2013, p.122-123.

Bolin, B., Cook, R. B., *The Major Biogeochemical Cycles and their Interactions*, New York, John Wiley and Sons, 1983.

Bonin, O., Bonneau, P., Clerc, M., Cousin, J., Haffner, M., Frankhauser, P., Gouvello, B. de, Haffner, M., Lehman, X., Pioli, R., Poirel, M., Stransky, V., Thébert, M., *Projet SOFT : sobriété énergétique par les formes urbaines et le transport*, 2020.

Bookchin, M., *Post-Scarcity Anarchism*, Remparts Press, 1971.

Borie, A., Micheloni, P., Pinon, P., *Formes urbaines et sites de méandres*, Rueil-Malmaison, GEFAU-CORDA, 1980.

Borie, A., Micheloni, P., Pinon, P., *Forme et déformation des objets architecturaux et urbains*, Marseille, Ed. Parenthèses, Coll. Eupalinos, 2006 (première édition 1978).

Boucher, O. *et al.*, « Presentation and Evaluation of the IPSL-CM6A-LR Climate Model », *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, Vol.12, Issue 7, July 2020. [En ligne] <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2019MS002010> (consulté le 27 juin 2021).

Bourg, D., Roch, Ph., *Sobriété volontaire : en quête de nouveaux modes de vie*, Genève, Labor et fides, 2012.

Bourguignon, C., *Le sol, la terre et les champs*, Paris, Sang de la Terre, 2008.

Brès, A., Beaucire, F., Mariolle, B., (dir.), *Territoire frugal. La France des campagnes à l'heure des métropoles*, Genève, Metis Press, 2017

Brunnquell, E., *La consommation d'espace par les transports : quels enjeux d'une optimisation de l'espace viaire autour des gares du Grand Paris Express ?*, PFE, Master Urbanisme et Aménagement, Spécialité Transport et Mobilité, IUP, 2015.

Buckley, F., « La mer, un océan d'énergies », *Pour la Science*, n°525, mai 2021, p.X-XI

Burgel, G., *Paris meurt-il ?*, Paris, Perrin, 2008.

Calthorpe, P., *The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream*, New York, Princeton Architectural Press, 1993.

Cervero, R., « Mixed Land-Uses and Commuting : Evidence From The American Housing Survey », *Transportation Research*, part A, vol. 30, n°5, 1996, p.361-377.

Cervero, R., Kockelman, K., « Travel demand and the 3Ds : density, diversity and design », *Transportation research*, Part D, 2 (3), 1997, p.199-219.

Cervero, R., Sullivan, C., « Green TODs: marrying transit-oriented development and green urbanism », *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, Vol.18, 2011, p.210-218.

CERTU, *Les piétons au cœur de l'aménagement de l'espace public urbain*, Savoirs de base en sécurité routière - Fiche n°2, Lyon, juin 2006.

CETUR, *Guide général de la voirie urbaine – Conception, aménagement, exploitation*, Bagnoux, 1988.

CESR Ile-de-France, *L'agriculture de proximité : un remarquable enjeu pour les territoires et les terroirs d'Ile-de-France*, Paris, synthèse du colloque du 3 février 2009.

Chatzimpiros, P., *Les empreintes environnementales de l'approvisionnement alimentaire : Paris, ses viandes et lait, XIX^e-XXI^e siècles*. Thèse de doctorat, sous la direction de S. Barles, Université Paris-Est, Marne-la-Vallée, 2011.

Chauffrey, J., *Mon petit jardin en permaculture : durable, esthétique et productif !*, Mens, Terre Vivante, 2017.

Chesné, L., *Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments basée sur leurs performances bioclimatiques*, Thèse de doctorat : Ecole doctorale MEGA - Mécanique, Energétique, Génie civil, Acoustique, sous la direction de J.-J. Roux, INSA – Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2012. [En ligne] <https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/825646/filename/these.pdf> (consulté le 8 mai 2021).

Choay, F., *L'urbanisme, utopies et réalités*, Paris, une anthologie, Seuil, 1965.

Chotte, J.-L., « L'initiative « 4 pour 1 000 », qu'est-ce que c'est ? », *The Conversation*, 16 novembre 2016. [En ligne] <https://theconversation.com/linitiative-4-pour-1-000-quest-ce-que-cest-54425> (consulté le 2 mai 2021).

Collectif bahn.ville 2, *Concevoir la ville à partir des gares – Rapport final du projet Bahn.Ville 2 sur un urbanisme orienté vers le rail*, octobre 2009.

Costanza, R. *et al.*, « Biodiversity and ecosystem services : A multi-scale empirical study of the relationship between species richness and net primary production », *Ecological Economics*, Volume 61, Issues 2-3, March 2007, p. 478-491.

Cortesi, F., « La notion de besoin : essai de conceptualisation théorique », *Recherches Sociologiques Louvain*, Vol 9, Num 2, 1978, p.155-181. [En ligne] https://sharepoint.uclouvain.be/sites/rsa/Articles/1978-IX-2_04.pdf (consulté le 2 avril 2021).

Coutard, O., Lévy, J.-P., Barles, S., Blanc, N., « Ecologies urbaines », In : Euze, A., Eymard, L., Gaill, F. (dir.), *Le développement durable à découvert*, Paris, CNRS Editions, 2013, p.114-115.

Curtis, C., Renne, J.L., Bertololini, L. (dir.), *Transit Oriented Development – Making it happen*, London – New-York, Routledge Taylor & Francis Group, 2016 (2009).

Dalpé, Y., « Les mycorhizes : un outil de protection des plantes mais non une panacée », *Phytoprotection*, Vol. 86, N°1, 2005, p. 1 – 86.

Daly, H., *Steady-State Economics*, Washington, Island Press, 1991.

Deb, D., « Le retour des riz traditionnels », *Pour la Science*, hors série n° 111, mai-juin 2021, p.80-87.

Declève, B., De Lestrangé, R., Gallezot, H., Mantziaras, P, Dir., *Dessiner la transition – dispositifs pour une métropole écologique*, Genève, Métis Presses, coll. VuesDensemble LignesDerre, 2020.

Dekarz, D., *La permaculture au jardin mois par mois*, Escalquens, Editions de Terran, 2019.

De Looze, R., *L'urine - de l'or liquide au jardin*, Escalquens, Editions de Terran, 2018.

Delaunay, A, « Néguentropie », *Encyclopædia Universalis* [En ligne] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/neguentropie/> (consulté le 10 avril 2021).

Deléage, J.-P. *Une histoire de l'Écologie : Une science de l'homme et de la nature*, La Découverte, 2010 (1^{re} éd. 1991).

Deleuze, G., *Différence et Répétition*, Paris, PUF, 1969.

Dempster, W.F., « Tightly closed ecological systems reveal atmospheric subtleties – experience

from Biosphere 2 », *Advances in Space Research*, N° 42, March 2008, p. 1951-1956. [En ligne] <http://ecotechnics.edu/wp-content/uploads/2011/08/Tightly-sealed-ecological-systems-asr-paper-2008.pdf> (consulté le 30 avril 2021)

Dendoncker, N., *L'approche par les services écosystémiques – Un levier pour l'agriculture urbaine ?* In : Declève, B. et al. (dir.). *Dessiner la transition – dispositifs pour une métropole écologique*, Genève, Métis Presses, coll. VuesDensemble LignesDerre, 2020.

Desjardins, X., « Pour l'atténuation du changement climatique, quelle est la contribution possible de l'aménagement du territoire ? », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Aménagement, Urbanisme, document 523, mis en ligne le 22 mars 2011, <https://journals.openedition.org/cybergeo/23531> (consulté le 16 mai 2021).

Desjardins, X., « Formes urbaines », In : Euze, A., Eymard, L., Gaill, F. (dir.), *Le développement durable à découvert*, Paris, CNRS Editions, 2013, p.108-109.

Dethier, J., *Habiter la terre*, Paris, Flammarion, 2019.

De Vries, W., « Soil carbon 4 per mille: a good initiative but let's manage not only the soil but also the expectations », *Geoderma*, vol. 309, janvier 2018, p. 111-112.

Dictionnaire Larousse [en ligne] <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/besoin/8907> (consulté le 25 mars 2021).

Doyal, L., Gough, I., *A Theory of Human Need*, New York, Guilford Press, 1991.

Dubrulle, R., « Le prolifique jardin des Fraternités ouvrières », *Silence*, N° 471, p. 34-35, 2018. [En ligne] <https://www.revuesilence.net/IMG/pdf/471.pdf> (consulté le 24/08/2020).

Dupraz, Ch., « Agroforesterie : une intensification écologique de l'agriculture ? », *Pour la Science*, hors série n° 111, mai-juin 2021, p.72-78.

Dupuy, G., « Aménagement urbain : l'avenir des fractales », *Cybergeo Conversation – le blog associé à la revue Cybergeo*, 26/04/2021. [En ligne] <https://cybergeo.hypotheses.org/956#more-956> (consulté le 4 mai 2021)

Dusong, C., *Quelle place pour l'analyse de la perception des risques et des avantages sur la santé du vélo ? Retour sur l'émergence d'un champ d'étude*, PFE, Master Urbanisme et Aménagement, Spécialité Transport et Mobilité, IUP, 2016.

Dutreix, A., *Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments*, Paris, Eyrolles, 2010.

Duvigneaud, P., Lamotte, M., Ramade, F., « Biosphère », *Encyclopædia Universalis* [En ligne] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/biosphere/> (consulté le 21 avril 2021).

Ehrlich, P., *The Population Bomb*, Ballantine Books, 1968.

Elain, Ch., *Un petit coin pour soulager la planète. Toilettes sèches et histoires d'eau*, Vanxains, Association Eauphilane, 2007.

Emelianoff, C., « La ville durable », in Zuindeau, B. (éd.), *Développement durable et territoire*, Villeneuve d'Ascq, Presses Universitaires du Septentrion, 2010, p.179-189.

Esculier, F., *Le système alimentation/excrétion des territoires urbains : régimes et transitions socio-écologiques*. Thèse de doctorat, sous la direction de B. Tassin et J. Garnier, Université Paris-Est, Marne-la-Vallée, 2018.

European Commission, *Europe 2020 A strategy for smart, sustainable and inclusive growth*, 2010.

Euze, A., Eymard, L., Gaill, F. (dir.), *Le développement durable à découvert*, Paris, CNRS Editions, 2013.

Ewing, R., Cervero, R., « Travel and the built environment — a synthesis ». *Transportation Research Record*, 1780, 2001, p.87-114.

Ewing, R. *et al.*, « Testing Newman and Kenworthy's Theory of Density and Automobile Dependence », *Journal of Planning Education and Research*, January 2017. [En ligne] https://www.researchgate.net/publication/313035305_Testing_Newman_and_Kenworthy's_Theory_of_Density_and_Automobile_Dependence (consulté le 12 mai 2021).

Fan, L., Wigner, J.-P., Ciais, P. *et al.* « Satellite-observed pantropical carbon dynamics », *Nat. Plants* 5, 29 July 2019, p. 944–951

Ferret, S. (dir.), *L'identité*, Paris, Flammarion, coll. Corpus, 2011 (1^{ère} ed. 1998).

Field, C.B., Behrenfeld, M.J., Randerson, J.T., Falkowski, P., « Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components », *Science*, vol. 281, n° 5374, 10 juillet 1998, p. 237-240. [En ligne] [http://www.fsl.orst.edu/rna/Documents/publications/Primary production of the biosphere Integrating terrestrial and oceanic components.pdf](http://www.fsl.orst.edu/rna/Documents/publications/Primary%20production%20of%20the%20biosphere%20Integrating%20terrestrial%20and%20oceanic%20components.pdf) (consulté le 23 avril 2021).

Fondriat, M., « La théorie des besoins de McClelland », *Sociologie des organisations*, 3^e éd., 2011, p. 130-132.

Forsyth, A., Hearst, M., Oakes, J.M., Schmitz, K.H., « Design and Destinations : Factors Influencing Walking and Total Physical Activity », *Urban Studies*, 2008, vol. 45, n°9, pp. 1973-1996.

Forsyth, A., Krizek, K. J., « Promoting Walking and Bicycling : Assessing the Evidence to Assist Planners », *Built Environment*, Vol. 36, n°4, 2010, p.429-446.

Forsyth, A., « What is a Walkable Place ? The Walkability Debate in Urban Design », *Urban Design International* 20, n°4, 2015, p.274-299.

Fouchier, V., *Les densités urbaines et le développement durable. Le cas de l'Île de France et des villes nouvelles*, Paris, La Documentation Française, Editions du SGVN, 1997.

Frankhauser, P., *La fractalité des structures urbaines*, Paris, Economica, Anthropos, collection Villes, 1994.

Frontier, S., Pichod-Viale, D., Leprêtre, A., Davoult, D., Luczak, Ch., *Ecosystèmes : Structure, Fonctionnement, Evolution*, Paris, Dunod, 2008.

Fukuoka, M., *La révolution d'un seul brin de paille : une introduction à l'agriculture sauvage*, Paris, G. Trédaniel, 2005.

GART (Groupement des Autorités Responsables du Transport) – « La prise en compte des piétons dans l'aménagement de l'espace public urbain », « Bonnes pratiques... : à pied, à vélo... », avril 2000, pp. 103-114.

Gauzin-Müller, D., *Architecture écologique*, Paris, Le Moniteur, 2001.

Gauzin-Müller, D., *Architecture en terre d'aujourd'hui*, Plaisan, Editions MUSEO, 2017.

Gauzin-Müller, D., « Un matériau ancestral pour construire l'avenir », *Maisons paysannes de France*, n°216, juin 2020, p.10-13.

Gauzin-Müller, D., « Architecture écologique ou architecture durable », *Encyclopædia Universalis* [en ligne] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/architecture-ecologique-architecture-durable/> (consulté le 8 mai 2021).

Georgescu-Roegen, N., *La décroissance*, 1979, dernière édition : Paris, Sang de la Terre, 2006.

Gies, E., « Bienvenue dans les villes éponges », *Pour la Science*, n°110, février-mars 2021, p.98-103.

Glasby, G.P., « *Abiogenic Origin of Hydrocarbons: An Historical Overview* », *Resource Geology*, vol. 56, n° 1, 2006, p. 83-96.[En ligne] <http://static.scribd.com/docs/j79lhbgbjbqrb.pdf> (consulté le 29 avril 2021).

Guillaud, H., Houben, H., CRAterre, *Traité de construction en terre*, Marseille, Ed. Parenthèses 2020 (1989).

Harchaoui, S., Modélisation des transitions en agriculture : énergie, azote, et capacité nourricière de la France dans la longue durée (1882-2016) et prémices pour une généralisation à l'échelle mondiale, Thèse de doctorat, sous la direction de P. Chatzimpiros, Université de Paris, Paris, 2019.

Heinisch, C., Fleury, Ph., Sarrazin, B., « Agriculture et stratégie Trame verte et bleue : élaborer et mettre en œuvre une politique dans les espaces agricoles de Rhône-Alpes », *Science Eaux & Territoires*, N°1, 2018, p.38-43

Henderson, V., *Principes fondamentaux des soins infirmiers*, Conseil international des infirmières (éd.), Genève, Conseil international des infirmières, 2003 (1947).

Héran, F., Ravalet, E., *La consommation d'espace-temps des divers modes de déplacement en milieu urbain. Application au cas de l'Ile de France*, Rapport final, Ministère des transports, de l'équipement, du tourisme et de la mer, DRAST, juin 2008.

Héran, F., « Des distances à vol d'oiseau aux distances réelles ou de l'origine des détours », *Flux*, avril-septembre 2009, n° 76/77, p.110-121.

Héran, F., *La ville morcelée*, Paris, Economica, 2011a.

Héran, F., « Etat de l'art raisonné », in *Plusieurs Options de Rabattement ou Transfert Vélo et Réseaux de Transport – Approche multi-aspects des diverses formules d'intermodalité*, Rapport final du projet Port-Vert, PREDIT, vol.1, 2011b, p.7-140.

Hervé-Gruyer, Ch., Hervé-Gruyer, P., *Permaculture : guérir la terre, nourrir les hommes*, Arles, Actes Sud, 2014.

Hochella Jr., M., Mogk, D., Ranville, J., Allen, I., Luther, G., *et al.*, « Natural, incidental and engineered nanomaterials and their impacts on the Earth system, *Science*, vol. 363, n° 6434, 29 mars 2019, article n° eaau8299. [En ligne] <https://science.sciencemag.org/content/363/6434/eaau8299.full> (consulté le 8 mai 2021).

Holzer, S., *La permaculture de Sepp Holzer*, Marsac, Éditions Imagine un colibri, 2011.

Hopkins, R., *The Transition Handbook : From Oil Dependency to Local Resilience*, Chelsea (Vermont), Chelsea Green Publishing, 2008

Houdeau, E., « Perturbateurs endocriniens, nanoparticules... l'intestin est-il trop perméable aux xénobiotiques ? », *Pratiques en nutrition*, Vol. 11, n°43, juillet-septembre 2015, p. 21-24.

Houdeau, E., Lamas, B., « Nanoparticules dans l'alimentation - Interactions avec le microbiote intestinal, impacts sur la fonction barrière de l'intestin et devenir systémique », *Innovations Agronomiques*, n° 73, février 2019, p. 81-90.

Huang, R., Grigolon, A., Madureira, M., Brussel, M., « Measuring transit-oriented development (TOD) network complementarity based on TOD node typology », *The Journal of Transport and Land Use*, Vol.11, N°1, 2018, p.304-324.
[En ligne] <https://www.jtlu.org/index.php/jtlu/article/view/1110> (consulté le 4 juin 2021).

Hurley, B., « The 6 D's of Sustainable Transit-Oriented Development », *TransLink in Vancouver - interview with its former managing director of planning and policy, Michael Shiffer*, 2012.
[En ligne] <https://momentummag.com/the-6-ds-of-sustainable-transit-oriented-development/> (consulté le 4 juin 2021).

Iablonovski, G., Bognon, S., « Efficacité matérielle et performance écologique des territoires :

analyse croisée de 67 métabolismes », *Flux*, 2019, n° 116/117, p.6-25.
[En ligne] <https://www.cairn.info/revue-flux-2019-2-page-6.htm> (consulté le 18 août 2021).

IAU-IDF, *Vers une mobilité durable en Europe*, Les Cahiers de l'IAU-IDF, n°150, Paris, mars 2009.

Ichbiah, D., « Nanotechnologie : les incroyables applications », Futura Tech, 2015 [en ligne] <https://www.futura-sciences.com/tech/dossiers/technologie-nanotechnologie-incroyables-applications-894/> (consulté le 9 mai 2021).

Igalens, J., « La collapsologie est-elle une science ? », *The Conversation*, 23 novembre 2017.
[En ligne] <https://theconversation.com/la-collapsologie-est-elle-une-science-87416> (consulté le 7 juillet 2021).

Illich, I., *La convivialité*, Paris, Seuil, 1973.

Illich, I., *Energie et équité*, Paris, Seuil, 1975

Institut Paris Région, *Une métropole à ma table. L'Île-de-France face aux défis alimentaires*.
Les Cahiers de L'Institut Paris Region, N° 173, 2017.

International Energy Agency (IEA), *The World Energy Outlook (WEO)*, 2018
[En ligne] <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018> (consulté le 23 juin 2021)

Isambert, M., Hernandez, J., « De la terre et des sols », *Maisons paysannes de France*, n°216, juin 2020, p.28-30.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, *AR5 - Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*, 2013. [En ligne] <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (consulté le 22 juin 2021)

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, *Fifth Assessment Report (AR5), Working Group III (WG III)*, 2014. [En ligne] <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/> (consulté le 5 décembre 2020).

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, *AR5 Synthesis Report : Climate Change 2014*, 2014. [En ligne] <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/> (consulté le 20 juin 2021)

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, *AR5 Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, 2014. [En ligne] <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> (consulté le 22 juin 2021)

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, *Special Report – Global Warming of 1,5°C*, 2019. [En ligne] <https://www.ipcc.ch/sr15/> (consulté le 28 juin 2020).

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, *Special Report – Climate Change and Land*, 2019. [En ligne] <https://www.ipcc.ch/srccl/> (consulté le 29 juin 2020).

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, *Special Report – Climate Change and Land*, à paraître en 2022.

ISIS/IDF, Syndicat des Transports Collectifs du Douaisis - *Plan de Déplacements Urbains de l'Agglomération douaisienne*, Douai, 2002.

Jackson, T., *Prospérité sans croissance : la transition vers une économie durable*, Bruxelles, De Boeck-Etopia, 2010

Jacobson, M.Z. *et al.*, « 100% clean and renewable wind, water, and sunlight (WWS) all-sector energy roadmaps for the 50 United States », *Energy & Environmental Science*, Vol. 8, 2015, p.2093-2117.

[En ligne] <https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/USStatesWWS.pdf> (consulté le 10 juillet 2021).

Jacobson, M.Z., *100% Clean, Renewable Energy and Storage for Everything*, Cambridge University Press, 2020.

Jaganmohan, M., Knapp, S., Buchmann, C.M., Schwarz, N., « The Bigger, the Better ? The Influence of Urban Green Space Design on Cooling Effects for Residential Areas », *Journal of Environmental Quality*, Vol.45, 2015, p.134-145.

Jallon, B., Napolitano, U., Boutté, F., *Paris Haussmann*, Paris, Editions du Pavillon de l'arsenal, 2017.

Jancovici, J.-M., *Transition énergétique pour tous. Ce que les politiques n'osent pas vous dire*, Paris, Poches Odile Jacob, 2013.

Jancovici, J.-M., « Bienvenue dans le monde fini », ADEME Ile-de-France, *Cycle Approche systémique, source d'inspiration des politiques publiques ?*, Paris, 13 avril 2018. [En ligne] <https://www.youtube.com/watch?v=jC0IiJnuB2U> (consulté le 22 mai 2018).

Jancovici, J.-M., « Cours n°1 – Eléments de base sur l'énergie au 21^e siècle », Mines ParisTech, *Energie et changement climatique*, Paris, mai 2019. [En ligne] <https://www.youtube.com/watch?v=xgy0rW0oaFI> (consulté le 20 décembre 2019).

Jancovici, J.-M., « PIB ou CO₂, il faut choisir », Sciences Po, Conférence *Vous avez dit « transition énergétique » ?*, Paris, 29 août 2019. [En ligne] <https://www.youtube.com/watch?v=Vjkq8V5rVy0> (consulté le 14 septembre 2019).

Jancovici, J.-M., « L'Homme et l'énergie, les amants terribles », Ecole Centrale de Nantes, *Les Matinales de la Transition Ecologique*, Nantes, 11 février 2020. [En ligne] https://www.youtube.com/watch?v=IaQ-U-dP_7M (consulté le 19 avril 2020).

Jancovici, J.-M., « Du pétrole, ou pas », *L'Express*, 9 avril 2020. [En ligne] <https://jancovici.com/publications-et-co/articles-de-presse/du-petrole-ou-pas/> (consulté le 23 juin 2021).

Jancovici, J.-M., « Il était une fois l'énergie, le climat, et la relance post-covid », EIVP, *Conférences sur le métier d'ingénieur et les enjeux climatiques*, Paris, 21 septembre 2020. [En ligne] <https://www.eivp-paris.fr/événement/conferences-du-premier-semester-2020-metier-dingenieur-et-enjeux-climatiques> (consulté le 15 décembre 2020).

Jancovici, J.-M., « Energie et climat pour demain, relance et finitude : quels scénarios après les crises ? », INSEAD, *Les Conférences de l'INSEAD*, Fontainebleau, 7 janvier 2021. [En ligne] <https://www.youtube.com/watch?v=3i1wjUsQemo> (consulté le 19 janvier 2021).

Jancovici, J.-M., « Un peu de physique pour finir la journée ? », Conférence à Sablé sur Sarthe, 31 mai 2021.

[En ligne] <https://www.youtube.com/watch?v=3vg9kffxPtE> (consulté le 19 juin 2021).

Jenkins, J., *Le petit livre du fumain – Manuel de compostage du fumier humain*, Montréal, Ecosociété, 2017 (1996).

Joffroy, T., Misse, A., Celaire, R., Rakotomalala, L., *Architecture bioclimatique et efficacité énergétique des bâtiments au Sénégal*, CRAterre, 2017.

[En ligne] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02025559> (consulté le 8 mai 2021)

Jouve, F., Allaire, G., « Les avatars de la forme optimale », *Pour la Science*, n° 91, avril-juin 2016, p.94-100.

Khan, Z.R., Pickett, J.A., « The «push-pull» strategy for stemborer management : a case study in exploiting biodiversity and chemical ecology », In : Gurr, G.M., Wratten S.D., Altiery M.A. (Ed.) *Ecological engineering for pest management. Advances in Habitat Manipulation for Arthropods*, Collingwood (Australia), Csiro Publishing, 2004.

[En ligne] <http://www.push-pull.net/PDF%20files/Dr.%20Z.%20Khan's%20Article.pdf> (consulté le 9 juin 2021).

Lambert, D.-C., *Le mimétisme technologique des tiers mondes - Plaidoyer pour le recours à des techniques intermédiaires et différenciées*, Paris, Seuil, 2003.

Larrue, C., « Recherche et politiques publiques environnementales : vers un modèle d'interactions », *Nature Sciences Sociétés*, Supplément 4, 2017, p.12-17.

[En ligne] <https://www.cairn.info/revue-natures-sciences-societes-2017-Supp.%204-page-12.htm> (consulté le 20 août 2021).

Laterrasse, J., *Transport et urbanisme, la ville en quête de développement soutenable*, Londres, ISTE Editions Ltd, Coll. Sciences, société et nouvelles technologies, 2019.

Latouche, S., *Sortir de la société de consommation*, Paris, Les liens qui libèrent, 2011

Léger, F., Guégan, S., *Maraîchage biologique permaculturel et performance économique - Ferme du Bec Hellouin, France*, AgroParisTech – INRA – Institut Sylva, Projet « Very small farms : economic, ecologic and social viability », Novembre 2016.

[En ligne] <https://www.researchgate.net/publication/291832974> (consulté le 28 avril 2021)

Léger, F., « Comment vivre avec des systèmes maraîchers biologiques sur de très petites surfaces cultivées ? », Conférence petites fermes maraîchères – SIVAL, Angers, 2018.

Léger, J.M., Mariolle, B., (dir.), *Densifier/dédensifier, penser les campagnes urbaines*, Marseille, Ed. Parenthèses, 2018.

Legrand, M., « Digestions fertiles – Le retour au sol des excréments humains », *Revue d'Anthropologie des Connaissances*, 2020 [En ligne], <http://journals.openedition.org/rac/11042> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/rac.11042> (consulté le 11/12/2020).

Lehec, E., *La remise en cause des services urbains en réseau, une approche par la technique : le cas du compostage des déchets en pied d'immeuble à Paris*, Thèse de doctorat, sous la direction de S. Barles, Université Paris 1, Paris, 2018.

Levy, A., « Formes urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine », *Espaces et sociétés*, Vol. 4, N°122, 2005, p. 25-48
[En ligne] <https://www.cairn.info/revue-espaces-et-societes-2005-3-page-25.htm> (consulté le 12/04/2016).

Le Néchet, F., *Approche multiscale des liens entre mobilité quotidienne, morphologie et soutenabilité des métropoles européennes. Cas de Paris et de la région Rhin-Ruhr*, Thèse de doctorat : Aménagement de l'espace, Urbanisme, sous la direction de J. Laterrasse et L. Sanders, Université Paris-Est, 2010.

L'Hôte, O. *et al.*, « L'hydrogène naturel, nouvel eldorado ? », *Pour la Science*, n°525, mai 2021, p.VI-VII.

Lovelock, J., *La Terre est un être vivant, l'hypothèse Gaïa*, Paris, Flammarion, coll. « Champs », 1999.

Lowenfels, J., *Un sol vivant : un allié pour cultiver*, Rodez, Editions du Rouergue, 2016.

Lucan, J., *Où va la ville aujourd'hui ? Formes urbaines et mixités*, Paris, Editions de La Villette, 2012.

Madec, Ph. (entretien avec), « L'approche frugale est déjà à l'œuvre », *Urbanisme*, n° 417, avril-mai-juin 2020, p.54-55.

Merlin, P., Choay, F., *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*, Paris, PUF, 1988.

Maslow, A., « A Theory of Human Motivation », *Psychological Review*, n° 50, 1943, p. 370-396.
[En ligne] <http://psychclassics.yorku.ca/Maslow/motivation.htm> (consulté le 26/03/2021).

Maupu, J.-L., « Comment choisir un système de transport collectif en site propre de surface », *Revue Transports Urbains*, n°105, 2003, p.11-19.

Maupu, J.-L., *La ville creuse pour un urbanisme durable. Nouvel agencement des circulations et des lieux*, Paris, L'Harmattan, collection « Villes et entreprises », 2006.

Maupu, J.-L., Stransky, V., *La ville creuse, un agencement des lieux et des circulations pour lutter contre le réchauffement climatique*, communication au colloque Changements climatiques, aménagement de l'espace et transition urbanistique, Université de Bretagne occidentale, 5 et 6 octobre 2015.

Maupu, J.-L., Stransky, V., « Mieux agencer les lieux et les circulations pour lutter contre le réchauffement climatique. Avec les principes de la ville creuse ? », *Norois – Environnement, aménagement, société*, N° 245, 2017/4, p. 75-88.

Maupu, J.-L., Stransky, V., « Mobilité durable ou agencement soutenable des lieux et des liens ? », IFSTTAR, *Journée du développement durable*, Marne-la-Vallée, 21 septembre 2018 (non publié).

Maupu J.-L., Stransky, V., « La Ville Creuse : l'Anneau ou la frugalité des moyens techniques au service de la sobriété énergétique et spatiale » in : Audouze, J. (sous la direction de), *Eclats de créativité*, L'Harmattan, coll. Action et savoir. A paraître (accepté pour publication).

Max-Neef, M., Elizalde, A., Hopenhayn, M., *Human Scale Development ; conception, application and further reflections (Le développement à l'échelle humaine : conception, application et réflexions complémentaires)*, New York & London, The Apex Press, 1991.
[En ligne] https://web.archive.org/web/20130319153338/http://www.max-neef.cl/download/Max-neef_Human_Scale_development.pdf (consulté le 29 mars 2021).

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., Behrens III, W.W., *The Limits To Growth*, New York, Universe Books, 1972.
[En ligne] <http://www.donellameadows.org/wp-content/userfiles/Limits-to-Growth-digital-scan-version.pdf> (consulté le 5 juillet 2021).

Meadows, D.H., Meadows, D.L., Randers, J., *Les limites à la croissance (dans un monde fini)*, Paris, L'éco-poche, éditions Rue de l'échiquier, 2020 (2017, 2012).

Menerault, P. (dir.), *Les pôles d'échanges - état des connaissances, enjeux et outils d'analyse*, Lyon, CERTU, 2006.

Menerault, Ph., et al. (dir.), *Les Gares, pôles d'échanges et leurs quartiers : connaissances et expériences partagées*, Villeneuve d'Ascq, Presses Universitaires du Septentrion, à paraître.

Mignot, D. et al., *Permanence des formes de la métropolisation et de l'étalement urbain*, ADEME, 2004.

Mollison, B., Holmgren, D., *Permaculture 1*, Paris, Editions Debard, 1986.

Mollison, B., *Permaculture 2 : Aménagements pratiques à la campagne et en ville*, Flers, Equilibres, 1981.

Mora, C. et al., « Global risk of deadly heat », *Nature Climate Change*, Vol. 7, June 2017, p.501-506.

[En ligne] https://www.researchgate.net/publication/318173438_Global_risk_of_deadly_heat (consulté le 27 juin 2021)

Morel, K., *Viabilité des microfermes maraîchères biologiques : une étude inductive combinant méthodes qualitatives et modélisation*, [S.l.], AgroParisTech, 2016.

Morel, K., San Cristobal, M., Léger, F., « Small can be beautiful for organic market gardens : an exploration of the economic viability of French microfarms using MERLIN », *Agricultural Systems*, N°158, November 2017, p.39-49.

Morel, K., Léger, F., San Cristobal, M., « Agriculture biologique : les microfermes peuvent tirer leur épingle du jeu », *The Conversation*, 7 octobre 2018, [En ligne] <https://theconversation.com/agriculture-biologique-les-microfermes-peuvent-tirer-leur-epingle-du-jeu-86901> (consulté le 29 avril 2021).

Morel, P.-M., Épicure, «Lettre à Ménécée», Garnier Flammarion, 2009.

Morris, D.J., *Self-reliant cities. Energy and the transformation of urban America*, San Francisco, Sierra Club Books, 1982.

Mouillot, Ph., « Comment le coronavirus réhabilite la pyramide des besoins de Maslow », *The Conversation*, 4 mars 2020. [En ligne] <https://theconversation.com/comment-le-coronavirus-rehabilite-la-pyramide-des-besoins-de-maslow-132779> (consulté le 31 mars 2021).

Müller, J., Kirleis, W., Hofmann, R. « Des métropolises en Europe il y a 6000 ans », *Pour la Science*, n° 521, mars 2021, p.52-59.

Mumford, L., *Le Mythe de la Machine - Technique et civilisation*, Seuil, 1976.

Mussy, M., *et al.*, *Une ville verte : les rôles du végétal en ville*, Versailles, Editions Quæ, 2014.

Newman, E. I., « Mycorrhizal Links Between Plants: Their Functioning and Ecological Significance », *Advances in Ecological Research*, Vol.18, 1988, p.243-270.

Newman, P.G., Kenworthy, J.R., *Cities and Automobile Dependence : An International Sourcebook*, Brookfield, Gower Publishing, 1989.

Nesshöver, C., *et al.*, « The science, policy and practice of nature-based solutions : An interdisciplinary perspective », *Science of The Total Environment*, Volume 579, February 2017, p.1215-1227.

Nieuwenhuijsen, M. J., Khreis, H., « Car free cities : Pathway to healthy urban living », *Environment International*, Vol.94, 2016, p.251-262.

Nieuwenhuijsen, M. J., « Urban and transport planning pathways to carbon neutral, liveable and healthy cities ; A review of the current evidence », *Environment International*, Vol.140, July 2020. [En ligne] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020302038> (consulté le 6 juin 2021).

Niu, S., Hu, A., Shen, Z., *et al.*, « Measuring the built environment of green transit-oriented development: A factorcluster analysis of rail station areas in Singapore », *Frontiers of Architectural Research*, Avril 2021.

[En ligne] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263521000261> (consulté le 3 juin 2021).

Noizet, H., *La fabrique de la ville. Espaces et sociétés à Tours (IX^e – XIII^e siècles)*, Paris, Publications de la Sorbonne, 2007.

Openshaw, S., *The Modifiable Areal Unit Problem, Concepts and techniques in modern geography*, vol.38, Geo Books, Norwich (Norfolk), 1984.

Osborn, H. F., *Our Plundered Planet*, Boston, Little, Brown and Co, 1948.

Panerai, P., Depaule, J.-C., Demorgon, M. & Veyrenche, M., *Elements d'analyse urbaine*, Paris-Bruxelles, AAM Editions, 1980.

Paquot, T., *Mesure et démesure des villes*, Paris, CNRS Editions, 2020.

Patriarche, D. *et al.*, « La géothermie, source de chaud, de froid et d'électricité », *Pour la Science*, n°525, mai 2021, p. IV-V.

Perini, K., Bazzocchi, F., Croci, L., Magliocco, A., Cattaneo, E., « The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. Field monitoring in Mediterranean climate. », *Energy and Buildings*, Vol.143, May 2017, p.35-42.

Pesty, A.M., *La végétalisation du bâti, notamment des toitures et des façades, peut-elle répondre à l'enjeu de résilience urbaine face au changement climatique ?*, Mémoire Master 1 Urbanisme et Aménagement, Ecole d'Urbanisme de Paris, UPEC-UPEM, 2020.

Peycru, P., Grandperrin, D., Perrier, Ch. (dir.), *Biologie*, Malakoff, Dunod, 2018.

Pichard, C., *La construction de la forme urbaine : approche archéologique et archéogéographique du processus urbain de Reims du début du Moyen Age à la ville pré-industrielle*, Thèse de doctorat : Histoire-archéologie, sous la direction de R. Gonzales Villaescusa et A. Devos, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2014.

[En ligne] 26371_PICHARD_2014_diffusion (consulté le 8 mai 2021).

Pour la Science/Engie, « La terra incognita de l'énergie », *Pour la Science*, n°525, mai 2021, p. I-XXXIII)

Pruvost-Bouvattier, M., Viallex, M., Joveniaux, A., Esculier, F., *Valoriser l'azote et le phosphore des urines pour une meilleure sécurité écologique et alimentaire*, Note rapide de l'Institut Paris Région, N° 858, 2020, ISSN 2724-928X, ISSN ressource en ligne 2267-4071.

Ramade, F., *Eléments d'écologie*, Paris, Dunod, 2009.

Raugei, M., « Net energy analysis must not compare apples and oranges », *Nature Energy*, Vol.4, 2019, p.86-88.

Rebulard, S., « Les vertus d'une agriculture fondée sur la biodiversité », *Pour la Science*, hors série n° 111, mai-juin 2021, p.52-60.

Renne, J. L., Wells, J. S., « Emerging European-style Planning in the USA: Transit-Oriented Development », *World Transport Policy & Practice*, Vol. 10, n°2, 2004, p.12-25.

Rey, O., *Une question de taille*, Paris, Stock, 2014.

Roddiier, F., *Thermodynamique de l'évolution – un essai de thermo-bio-sociologie*, Editions Parole, 2012.

Rostain, S., *Amazonie. Un jardin sauvage ou une forêt domestiquée. Essai d'écologie historique*, Paris, Actes Sud / Errance, 2016.

Rostain, S., *Les 12 travaux des civilisations précolombiennes*, Paris, Belin, 2017.

Salat, S., *Les Villes et les Formes: sur l'Urbanisme Durable*, Hermann Ed., 2011.

Salingaros, N., *Principles of Urban Structure*, Amsterdam, Techne Press, 2005.

Sander, A., *Les points de réseau comme formes urbaines - Morphogenèse et enjeux de conception*, Thèse de doctorat : Urbanisme et Aménagement, sous la direction de G. Dupuy, Université Paris XII - Val-de-Marne, 1995.

[En ligne] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00345093> (consulté le 10 mai 2021).

Say, J.-B., *Traité d'économie politique, ou simple exposition de la manière dont se forment les richesses*, 1803. [En ligne] <http://dx.doi.org/doi:10.1522/cla.saj.tra1> (consulté le 22 juin 2021).

Say, J.-B., *Cours complet d'économie politique pratique*, Paris, Libr. Guillaumin et Cie, 1852.

Schittich, Ch., *Vernacular Architecture : Atlas for Living Throughout the World*, Bâle, Birkhauser, 2019.

Schumacher, E.F., *Small is beautiful – Une société à la mesure de l'homme*, Paris, Seuil, 1979 (1973)

Servigne, P., *Nourrir l'Europe en temps de crise. Vers des systèmes alimentaires résilients.*, Namur, Editions Nature & Progrès, 2014.

Servigne, P., Stevens, R., *Comment tout peut s'effondrer. Petit manuel de collapsologie à l'usage des générations présentes*, Paris, Ed. du Seuil, 2015.

Shackelford, G. E. *et al.*, « Accumulating evidence using crowdsourcing and machine learning: A living bibliography about existential risk and global catastrophic risk », *Futures*, vol. 116, février 2020.

Shepard, M., *Agriculture de régénération*, Marsac, Editions Imagine Un Colibri (traduit de l'anglais *Restoration agriculture*, 2013), 2016.

Silva, C.M., Gomes, M.G., Silva, M., « Green roofs energy performance in Mediterranean climate. », *Energy and Building*, Vol.116, March 2016, p.318-325.

Simon, J., *The Ultimate Resource*, Princeton University Press, 1981.

Simondon, G., *Sur la Technique*, Paris, PUF, 2014 (1983).

Sinaï, A. et al., *Petit traité de la résilience locale*, Paris, Ed. Charles Léopold Mayer, 2015.

Soulas, C., Wahl, M. (coordinateurs), *Innovation dans les transports guidés urbains et régionaux*, Paris, Hermes Lavoisier, octobre 2010

Stevens, M.R., « Does Compact Development Make People Drive Less ? », *Journal of the American Planning Association*, Vol. 83, issue 1, p.7-18.

Stransky, V., *Forme et fonction d'un réseau : cas de la voirie urbaine de desserte locale*, Thèse de doctorat : Urbanisme et Aménagement, sous la direction de G. Dupuy, Université Paris XII - Val-de-Marne, 1995.

[En ligne] <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00129522> (consulté le 7 mai 2021).

Stransky, V., « Les espaces des pôles d'échanges : de multiples composantes et des acceptions variées », in Menerault, P. (dir.), *Les pôles d'échanges - état des connaissances, enjeux et outils d'analyse*, Lyon, CERTU, mai 2006, p. 80-95.

Stransky, V., « Une méthode d'analyse spatiale des espaces piétons au service d'un urbanisme orienté vers le rail », *Rech. Transp. Secur.*, n°27, 2011, p.178-199.

Stransky (V.), Maupu (J.-L.), « The Hollow City : a Ring as an urban utopia or as a model for sustainable urbanisation ? », paper for the International Scientific Conference *Building of the Urban Future and Transit Oriented Development (BUFTOD)*, Paris-Marne-la-Vallée, 16th-17th April 2012.

Stransky, V., « Repenser les modes de transport », *Constructif*, N°35, 2013, p. 82-85.

Stransky, V., *La Ville Creuse : l'Anneau ou la frugalité des moyens techniques au service de la sobriété énergétique et spatiale*, communication au Forum sino-français de créativité de Shekou, Shenzhen (Chine), 31 octobre - novembre 2014.

Stransky, V., « Des quartiers de gare favorables aux modes actifs pour une mobilité régionale énergétiquement sobre. Point de vue d'acteur », *Flux - Cahiers scientifiques internationaux réseaux et territoires*, n°107, 2017, p. 74-90.

Stransky, V., « Périurbain et Transit-Oriented Development : un couple invraisemblable ? », *Flux - Cahiers scientifiques internationaux Réseaux et Territoires*, n° 115, 2019/1 - janvier-mars, p.33-57.

Stransky, V., « Agriculture urbaine et énergie : recyclage des excréta et forme urbaine », in : Bonin, O., *et al.*, *Projet SOFT : sobriété énergétique par les formes urbaines et le transport*, 2020, p. 65-99.

Sury, P., Bradfer, J., « Ethiopie : un chef de village transforme sa région aride en oasis protégée des famines », *Newsletter RTBF Info – Afrique*, 3 juin 2018.

[En ligne] https://www.rtb.be/info/dossier/hors-des-sentiers-battus/detail_ethiopie-un-chef-de-village-transforme-sa-region-aride-en-oasis-protgee-des-famines?id=9930417 (consulté le 29 avril 2021).

Theys, J., Vidalenc, E., (dir.), *Repenser les villes dans la société post-carbone*, Ministère de l'Écologie-Ademe, 2013.

Torres, A.C., *Initiatives citoyennes de conservation de la nature en milieu urbain : rôle des jardins partagés*, Thèse de doctorat : Biologie, Université Paris-Saclay, sous la direction d'A.-C. Prévot et la co-direction de S. Nadot, 2017.

Tsai, Y.-H., « Quantifying urban form : Compactness versus «sprawl» », *Urban Studies*, vol.42, n°1, p.141-161.

Tucholsky, K., « Das Ideal », *Berliner Illustrierte Zeitung*, n°31, 31/07/1927.

-Usbek & Rica, « De la forêt civilisée à la ville végétalisée », *Demain la ville*, 12 mai 2021, [En ligne] <https://www.demainlaville.com/de-la-foret-civilisee-a-la-ville-vegetalisee/> (consulté le 15 mai 2021).

VandenBygaert, A. J., « Comments on soil carbon 4 per mille by Minasny et al. 2017 », *Geoderma*, vol. 309, janvier 2018, p. 113-114.

Van Oost, O., Versteirt, R., « Des cerfs volants producteurs d'énergie », *Pour la Science*, n°525, mai 2021, p. XX-XXI.

Veltz, P., *L'économie désirable. Sortir du monde thermo-fossile*, Paris, Editions du Seuil, 2021.

Vidal, O., *Matières premières et énergie*, Londres, ISTE Editions Ltd, Coll. Energie, 2018.

Viljoen, A., Bohn, K., Howe, J., *Continuous Productive Urban Landscapes: Designing Urban Agriculture for Sustainable Cities*, Oxford, Architectural Press, 2005.

Vissac, A. *et al.*, *Argiles et biopolymères*, Villefontaine, CRAterre, 2017.

Vogt, W., *Road to survival*, Willial Sloane Assoc, 1948.

Walden Bello, *Deglobalization, ideas for a New World Economy*, Londres et New-York, 2002.

Waligora, C., *Faune utile des bords de champs*. Paris, France Agricole, 2016.

Wiel, M., *La transition urbaine ou le passage de la ville pédestre à la ville motorisée*, Liège, Mardaga, 1999.

Wiel, M., *Ville et automobile*, Paris, Descartes & Cie, coll. « Les urbanités », 2002.

Whitefield, P., *The earth care Manual : A Permaculture Handbook For Britain & Other*, East Meon (UK), Permanent Publications, 2004.

Wild, T. *et al.*, *Nature-based Solutions – Analysis of EU-funded Projects*, European Commission, 2020.

[En ligne] https://www.gcca.eu/sites/default/files/2020-08/KI0120260ENN.en_.pdf (consulté le 22 mai 2021).

Ye, Y. *et al.*, « Low-Carbon Transportation Oriented Urban Spatial Structure : Theory, Model and Case Study », *Sustainability*, vol.10, Special Issue « Methodological Advances in Research on Sustainable Ecosystems », 2018.

[En ligne] <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/19> (consulté le 7 juin 2021).

Zelezny R., *Design urbain et tramway. Recherche méthodologique autour de cinq villes moyennes françaises et tchèques*, Thèse de doctorat : Aménagement, Urbanisme, Développement territorial, Université Paris-Est, sous la direction de N. Baron-Yellès et la co-direction de V. Stransky, 2016.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	5
1.- Les sociétés humaines au prisme de l'énergie	8
1.1.- Une définition de l'énergie	8
1.2.- Energie et modes de vie	11
1.3.- Energie et économie	14
1.4.- Conclusion	17
2.- Deux limites amont + Une limite aval = Trois pénuries	18
2.1.- Pénurie d'énergies fossiles	18
2.2.- Pénurie de minerais	18
2.3.- Pénurie de temps	21
2.4.- Conclusion	27
3.- Vers une approche BELT de la gestion des pénuries	28
3.1.- Un débat ancien : Doomsdayers <i>versus</i> Cornucopiens	30
3.2.- Les impasses de la high-tech face aux trois pénuries	34
3.3.- L'alternative des low-tech	41
3.4.- L'approche basse énergie et low-tech en urbanisme : la ville BELT	45
4.- L'agencement au service d'une ville BELT	50
Introduction	50
4.1.- Une question de besoins	50
4.1.1.- Des classifications multiples	50
4.1.2.- Eléments d'accord : hiérarchie implicite et importance de l'échange	55
4.2.- Satisfaire les besoins en mode BELT : potentiel de l'agencement	59
4.2.1.- Notion d'agencement	59
4.2.2.- Agencement et utilité	61
4.2.3.- Agencement et forme urbaine	63
4.2.4.- Agencement et développement durable	65
4.2.5.- L'agencement comme apport au potentiel BELT de la ville	69

4.3.- Agencer quoi ?	70
4.3.1.- Adresses naturelles : sols vivants producteurs	71
4.3.2.- Adresses artificielles : exosquelettes consommateurs	86
4.3.3.- Conclusion : forêt civilisée ou ville végétalisée ?	91
4.4.- Agencer comment ?	93
4.4.1.- Agencements de famille 1	97
4.4.2.- Agencements de famille 2	97
4.4.3.- Agencements de famille 3	101
4.4.4.- Agencements de famille 4	104
4.4.5.- Agencements de famille 5	108
4.4.6.- Agencements de famille 6	113
4.4.7.- Agencements de famille 7	114
4.4.8.- Agencements de famille 8	116
4.5.- Décrire l'agencement d'une ville BELT	118
4.5.1.- Vers une « forme urbaine BELT » ?	118
4.5.2.- La ville BELT en adjectifs	119
4.5.3.- Notion de « patrimoine utile BELT »	121
Conclusion	124
5.- Le chantier de la ville BELT	125
5.1.- Cadre général : l'énergie solaire pour un état stationnaire de longue durée	125
5.2.- AXE 1 : Quels transformateurs naturels pour la ville BELT ?	126
5.2.1.- Apports des sols vivants à la ville BELT : conditions, contextes, limites ?	127
5.2.2.- La permaculture : un principe fondateur de la ville BELT ?	128
5.3.- AXE 2 : La sobriété de la ville BELT par ses agencements	129
5.3.1.- Développer, compléter, questionner les notions	129
5.3.2.- Passer d'un portrait éclaté à un portrait intégré	131
5.3.3.- Passer du « potentiel » aux « effets »	131
5.4.- AXE 3 : Questionner et accompagner la transition vers la ville BELT	132
5.4.1.- Observer les obstacles et les dynamiques	132
5.4.2.- Domaines et cibles d'action en vue d'accompagner la transition	132
Conclusion	136
Bibliographie	140
Table des matières	160