

Université de Franche-Comté
École doctorale « Langages, espaces, temps, sociétés »
Laboratoire ThéMA - UMR 6049 CNRS

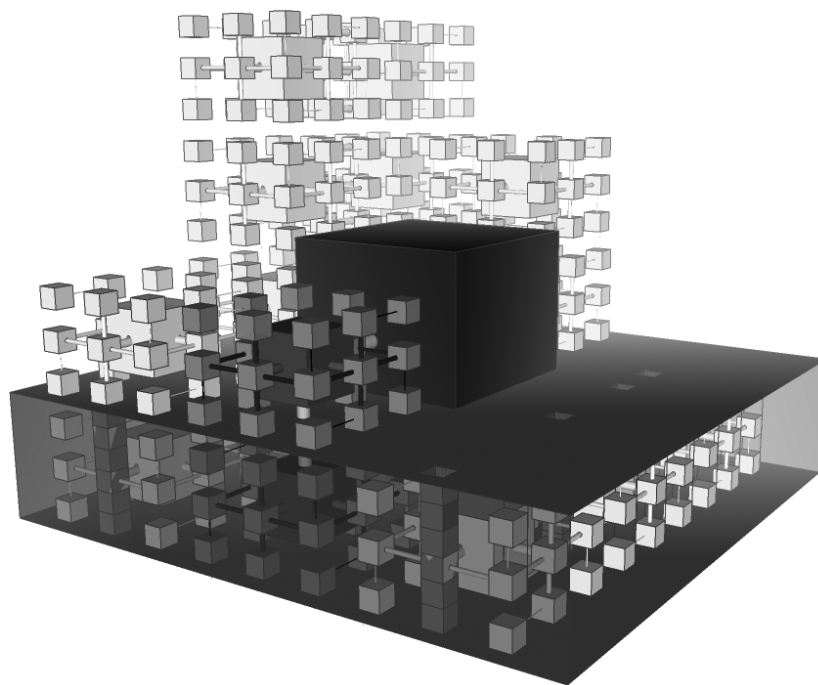
Modélisation et anticipations urbaines

Éléments théoriques pour une approche géo-ergonomique

Habilitation à diriger des recherches (Volume 1/2)

soutenue publiquement le 6 février 2014 par

Jean-Philippe Antoni



Membres du jury

- S. Barles, professeur d'aménagement et d'urbanisme, Université de Paris 1
- J.C. Foltête, professeur de géographie, Université de Franche-Comté
- P. Frankhauseur, professeur de géographie, Université de Franche-Comté
- D. Pumain, professeur de géographie, Université de Paris 1
- L. Sanders, directrice de recherche en géographie, CNRS

Je trouve que l'on a mal choisi
l'implantation des villes, il aurait
fallu les mettre à la campagne.

A. Allais

Your planet's ecosystem is
failing, save the planet, kill
yourself!

Church of Euthanasia

Figurez-vous qu'elle était debout
leur ville, absolument droite [...]
Mais chez nous, n'est-ce pas,
elles sont couchées les villes. . .

L.F. Céline

Le faisceau se noue.

M. Sorre

On improvise, on s'adapte, on
domine.

Légion étrangère

Avertissements

1. La notice¹ éditée en 2012 par la 23^e section du Conseil national des universités (CNU) indique que trois orientations peuvent être données au Volume 1 qui accompagne la soutenance d'une Habilitation à diriger des recherches (HDR) :
 - (a) Un positionnement et un projet de recherche et/ou une réflexion distanciée sur la pratique (mise en perspective de travaux de recherche) dans un contexte national et international, sans reprise factuelle des travaux antérieurs ;
 - (b) La présentation d'une nouvelle orientation de recherche (à l'occasion d'une bifurcation par exemple) correspondant à la formule en vigueur avant 2012 dite du volume *inédit* ou *original* ;
 - (c) Une proposition réflexive (théorisation des pratiques dans un contexte scientifique et sociétal), alimentée par la production contenue dans le Volume 2, valorisant avant tout une pratique pédagogique ou professionnelle.

Le présent mémoire s'inscrit essentiellement dans les points (a) et (b). D'une part, « sans reprise factuelle des travaux antérieurs », il propose une « réflexion distanciée » sur l'exercice de modélisation en géographie, considérée dans le cadre épistémologique et les problématiques actuelles de la discipline, en particulier quand cette dernière traite des espaces urbains. D'autre part, il envisage un transfert depuis l'ergonomie, transfert qui ne constitue pas une « nouvelle orientation de recherche » en tant que telle, mais qui souhaite ouvrir des pistes « originales » pour modéliser et simuler des réponses renouvelées à ces problématiques, en intégrant notamment la complexité de la verticalité spatiale.

2. Les références entre crochets ([...]) dans les notes de bas de page ne sont pas reprises dans la bibliographie générale. Elles correspondent soit à des textes dont l'importance ne justifiait pas d'alourdir la liste des références, soit à des citations indirectes, reprises d'ouvrages plus fondamentaux qui, eux, y sont référencés.
3. Dans le texte, le mot *homme* est utilisé pour désigner à la fois les hommes et les femmes, c'est-à-dire l'ensemble de l'espèce humaine, comme c'est la règle dans la langue française.

1. Cf. www.cpcnu.fr/web/section-23/recommandation-pr (lien consulté en octobre 2013).

Remerciements

Aux membres du jury.

À tous mes collègues.

À toutes mes étudiantes.

À mon frère d'armes Gilles Vuidel, qui, depuis 2001, a su concrétiser ce que je voulais faire, avec un regard critique mais bienveillant, et avec qui j'ai tantôt mangé le pain de la misère, tantôt bu le vin de l'amitié.

À Henri Reymond, que j'ai eu la chance de connaître par l'intermédiaire de son épouse, qui est également ma directrice de thèse (et que je remercierai toujours pour son affection et ses relectures millimétriques). En 1998, il me soufflait en aparté ce conseil : « Quoique l'on vous dise, ne quittez jamais votre ligne ». À l'époque, cette ligne était imprécise, probablement parce qu'elle était candide et faite de certitudes. Avec le temps, et avec son aide, elle s'est reconstruite et affinée. J'espère ne l'avoir jamais quittée.

À ma mère, parce qu'elle est super, et qu'elle sait tout faire, et parce que je l'aime, presque autant que ma femme, et que ma fille.

Introduction générale

Corpus théorique et projet : un préalable

La recherche en géographie théorique et quantitative semble aujourd'hui assez à l'aise avec la modélisation². Au prix d'un effort d'ouverture important et parfois difficile à assumer, elle s'est approprié de nombreuses méthodes et de nombreux outils pour dépasser l'idée de modèles conçus comme de simples objets conceptuels, c'est-à-dire comme des mots auxquels on a donné un sens qui dépassait parfois les processus qu'ils étaient censés qualifier, parce qu'ils ne les représentaient que verbalement, de manière subjective et non reproductible. Pour ce faire, elle a dû puiser dans des univers divers, révélés par des disciplines très indépendantes dans leur façon de concevoir et de résoudre les problèmes, selon un schéma qui avait déjà été ouvert, depuis l'Antiquité, par les cartographes.

Dans nos premiers travaux (Antoni, 1997, 1998), nous avons en effet qualifié la cartographie de discipline *avale* pour signifier qu'elle ne pouvait exister de manière autonome qu'en innovant à partir d'avancées découvertes par ailleurs : la géométrie, la triangulation et l'exactitude topographique, la statistique, l'aviation, la sémiologie, la télédétection, l'imagerie de synthèse et, parfois, les jeux vidéos. Certains pans de ces recherches restent évidemment ouverts (Antoni *et al.*, 2004 ; Antoni *et al.*, 2012), mais cette mise en commun a permis, dans son ensemble, de faire des cartes plus précises, puis plus démonstratives, et finalement plus ou moins explicatives quant aux processus mesurables qui modifient l'espace terrestre et son occupation. La démarche de la cartographie s'est alors rapprochée de la théorie de la communication de C. Shannon (Shannon et Weaver, 1962), pour insister sur le fait qu'en tant que transformations successives (Cauvin *et al.*, 2007), les cartes servaient avant tout à révéler l'espace terrestre et son évolution, par le fait de contraintes naturelles (objet d'étude de la physique géographique)³ ou par l'action d'hommes qui aménageaient le territoire qu'ils s'étaient approprié.

2. La notion de modélisation étant fortement polysémique (Antoni, 2013), nous n'en retenons ici qu'une définition commune, celle du Petit Robert : « Mise en équation d'un phénomène complexe permettant d'en prévoir les évolutions ». Cette définition de départ sera révisée et étayée dans la conclusion générale, au regard de ce que peuvent aujourd'hui en dire les géographes.

3. L'expression *physique géographique*, que nous employons dans l'ensemble de ce mémoire pour désigner ce que les géographes appellent communément la « géographie physique », est expliquée et justifiée dans une note au bas de la page 79.

Renouvelée au début du 20^e siècle (du moins en France)⁴ par les travaux de P. Vidal de la Blache (1903, 1948)⁵, la géographie a suivi, à partir des années 1960, une voie à peu près similaire : la systémique, les statistiques, puis surtout l'informatique et l'intelligence artificielle, lui ont permis d'investir de nouveaux domaines de compétence (souvent d'autant plus ardues qu'ils étaient éloignés des préoccupations classiques des sciences humaines) avant de les intégrer pour produire de nouvelles connaissances : la période que l'on qualifie aujourd'hui de *révolution quantitative* (Pumain et Robic, 2002) a ouvert des champs d'investigation théorique innovants, en même temps qu'elle a parfois éloigné les géographes des espaces concrets qu'ils étaient censés étudier. Ainsi, après des essais assez concluants fondés sur les avancées de la cybernétique (Reymond, 1981), elle a intégré la systémique (dont l'origine remonte à L. von Bertalanffy, 1968) comme une façon de concevoir le monde, conception à laquelle la *dynamique des systèmes* de J. W. Forrester (1969) a ouvert de nombreuses pistes. Par la suite, les progrès de l'informatique ont rendu de nouvelles explorations possibles : par l'intermédiaire des machines, qui servent désormais de *medium* technique avec le terrain, ils ont permis d'intégrer les principes de l'intelligence artificielle (Automates cellulaires et Systèmes multi-agents), qu'il s'est agi de mettre à profit pour mieux comprendre l'évolution des territoires et la genèse de leurs formes de base, à partir des cellules du *Jeu de la vie* de J. Conway (1970), réinterprétées dans un sens géographique (Tobler, 1979 ; Couclelis, 1985).

Dans cet élan, les automates cellulaires ont été utilisés pour modéliser et simuler l'évolution de l'occupation du sol d'un territoire (White et Engelen, 1994 ; Dubos-Paillard *et al.*, 2003 ; Antoni *et al.*, 2010), à l'issue de validations (Hacken, 2003) et de calibrages (Antoni, 2006) relativement précis. Dans ce domaine, de nombreuses avancées ont été faites et sont aujourd'hui citées comme des références de manière quasi unanime. En revanche, les géographes se posent encore beaucoup de questions quant à l'utilisation des Systèmes multi-agents (Ferber, 1995 ; Amblard et Phan, 2006), pour lesquels il n'existe pas de *corpus* théorique aussi consensuel que pour les automates : si tout le monde s'accorde à peu près pour reconnaître que les cellules des automates représentent des parcelles de territoire associées à un usage (un et un seul au sein d'un ensemble fini), il n'y a pas véritablement d'accord sur ce que peuvent représenter les agents d'un Système multi-agents : des territoires (Langlois, 2006), des individus (Antoni, 2010b), des institutions publiques (Kamps, 2013), des villes (Sanders *et al.*, 1997), des routes (Casanova *et al.*, 2005), des véhicules (Lammoglia et Josselin, 2013) ou, de manière plus conceptuelle, des métaphores (Bussy et Daudé, 2005) ? Cette absence de consensus vient en partie du fait que, contrairement aux économistes qui s'appuient sur la simplification consciente de l'*homo*

4. Notons que l'école de géographie allemande, qui se développe à la fin du 19^e siècle à partir des travaux de E. Haeckel (cf. [Haeckel E., 1884, *Histoire de la création des êtres organisés*, Reinwald]) et de F. Ratzel (cf. [Ratzel F., 1891, *Anthropogeographie*, Stuttgart]) regroupe également des travaux importants pour le renouveau de la discipline, en particulier ceux de C. Ritter (cf. [Ritter C., 1852, *Einleitung zur allgemeinen vergleichenden Geographie und Abhandlungen zur Begründung einer mehr wissenschaftlichen Behandlung der Erdkunde*, Druck und Verlag Reimer, 246 p.]) ou A. von Humboldt (cf. [Humboldt A., 1859, 2000, *Cosmos. Essai d'une description physique du Monde*, Utz, 4 tomes]). Leurs apports s'orientent largement vers une explication physique (notamment écologique et climatique) des « lois générales » qui coordonnent les différentes parties de la surface terrestre, si bien que P. Vidal de la Blache (1948) qualifie leurs auteurs de « naturalistes zoo-géographes ».

5. Cette approche vidalienne a par la suite été largement complétée, notamment par les apports de P. Lavedan, J. Bruhnes, A. Demangeon, M. Le Lannou, puis finalement de M. Sorre, auquel nous nous référons largement dans la Partie 1.

*oeconomicus*⁶, les géographes n'ont jamais⁷ proposé une formalisation sur laquelle ils pouvaient s'accorder pour définir leur objet d'étude. En définitive, les géographes ne disposent pas d'*homo geographicus* à proposer comme un socle de base pour tout approfondissement (Frankhauser et Antoni, 2009). Sans cette ontologie commune, qui manque aujourd'hui à la géographie (Berque, 1996), il n'y a rien d'étonnant à ce que chaque Système multi-agents pose ses propres fondements et se construise sur des hypothèses qui ne sont souvent compatibles avec celles des autres que par hasard. Une certitude toutefois : ils sont d'un intérêt remarquable pour considérer la question des mobilités, qu'ils confrontent parfois à celle de l'occupation du sol.

Cet état de fait mérite d'autant plus d'être relevé que les géographes ne sont pas seuls à œuvrer dans le domaine des disciplines spatiales par le biais de la modélisation : les économistes lui consacrent également de nombreuses études. Leur intérêt pour l'espace et les théories de la localisation n'est d'ailleurs pas récent : des travaux précurseurs de Von Thünen⁸ au prix Nobel de P. Krugman (1997), en passant par le modèle de W. Alonso (1964)⁹, ils ont formalisé les processus à l'œuvre dans la géographie des territoires et qualifié leurs conséquences sur le développement des villes et de leurs régions, au sein d'une discipline fondée dans les années 1940 par W. Isard (1956) : les *Sciences régionales*. D'abord réduite à une approche monodimensionnelle (sur une ligne) des espaces urbains, l'économie a franchi un pas en intégrant la logique des Systèmes d'information géographique (Raux *et al.*, 2008) et représente désormais ses terrains d'étude en deux dimensions selon une logique qui se rapproche de la réalité de l'espace géographique, en même temps qu'elle rapproche certains économistes des géographes.

C'est dans le contexte de ces innovations en sciences régionales, que les modèles LUTI (*Land-Use and Transport Interaction*) sont apparus sur la scène de la modélisation de l'espace. Nés aux États-Unis dans les années 1980, ils ont été développés par de nombreux pays occidentaux, notamment francophones (Antoni, 2010a), et dans une moindre mesure par des pays émergents, au

6. Les sciences économiques néoclassiques se fondent sur des paradigmes majeure, tels que la théorie de l'équilibre général ou de la rationalité pour formuler l'hypothèse d'un *homo oeconomicus*, supposé rationnel, capable d'ordonner ses préférences selon la notion de transitivité, d'analyser de manière optimale la situation que se présente à lui, et finalement de maximiser sa satisfaction en maximisant son utilité ; cf. [Demeulenaere P., 1996, *Homo oeconomicus : enquête sur la constitution d'un paradigme*, Presses universitaires de France, 288 p.]. Quoique fortement critiqué par certains courants de l'économie et malgré de nombreuses études montrant qu'il ne correspond pas à une représentation crédible du comportement humain, cette hypothèse constitue un paradigme qui offre plusieurs avantages : (i) un cadre pour une réflexion commune sur les processus à l'œuvre dans le monde économique, (ii) un *modus operandi* qui rend comparable l'ensemble des travaux économiques et permet de les compléter les uns par les autres comme les « briques » d'un même édifice, (iii) un écart à la réalité qu'il convient de dépasser en montrant que de nouvelles hypothèses peuvent être posées.

7. Il faut évidemment nuancer ce propos en citant les travaux de H. Béguin et J.F. Thisse (1979), qui ont proposé une approche axiomatique de l'espace géographique. Complexe sur le plan de sa formalisation mathématique, cette dernière n'a pas, à notre connaissance, rencontré le succès qu'elle aurait pu connaître et apparaît finalement peu citée comme une base heuristique pour les différentes recherches conduites dans le domaine de la modélisation géographique.

8. Le principal apport de l'économiste allemand J.H. von Thünen réside dans le modèle théorique qu'il met au point en 1826. Fondé sur des hypothèses lourdes (un libre marché dans un État isolé et isotrope, des marchandises que l'on déplace en lignes droites, etc.), ce modèle tente d'expliquer la relation entre la rentabilité de la production agricole et l'organisation radioconcentrique des villes, dont le centre constitue le marché.

9. Les travaux de la micro-économie, qui ont donné naissance au modèle fondateur de W. Alonso (1964), seront complétés par les approches de E. Mills (cf. [Mills E., 1967, An aggregative model of resource allocation in metropolitan areas, *American Economic Reviews*, 57, pp. 197-210]) et de R. Muth (cf. [Muth R., 1969, *Cities and housing*, University of Chicago Press]), fondées sur la théorie des enchères (*bid rent*) dans la considération du marché foncier urbain, puis élargies, de manière souvent plus réaliste, par l'école de la Nouvelle économie urbaine (NEU) (Thisse, 2010).

cours des décennies 1990 et 2000 (Hély, 2012). Tous poursuivent globalement le même objectif : apporter une réponse objective à la question des mobilités quotidiennes et des mobilités résidentielles d'une aire urbaine, en tenant compte des interactions qu'elles entretiennent, selon une logique que l'on pourrait qualifier de systémique, même s'ils ne font pas tous explicitement référence à la *Théorie générale de systèmes* (Bertalanffy, 1968). Pour autant, les LUTI apparaissent comme des modèles que nous qualifions d'*hybrides* pour trois raisons : (i) par leur ambition : il ne s'agit plus ici d'étudier l'occupation du sol et/ou les mobilités mais bien d'intégrer les deux pour saisir leurs interactions, selon un schéma en boucle que M. Wegener (2004) a été parmi les premiers à représenter ; (ii) par leur complexité : de par leur objet d'étude, les LUTI apparaissent simultanément comme des modèles non-linéaires, dynamiques et couplés (Waddell, 2002), que l'on pourrait aisément qualifier d'*usines à gaz* ; (iii) par leur construction pluridisciplinaire : si les questions de mobilité sont souvent traitées sous l'angle de la théorie économique (Gaudry, 2007), celles qui relèvent de l'occupation du sol adoptent pour la plupart une conception cellulaire de l'espace, analysé par le biais d'un calcul d'accessibilité gravitaire dans laquelle les économistes (Hansen, 1959) et les géographes (Stewart et Wantz, 1949 ; Huff, 1964) se retrouvent.

Ainsi, dans le monde de la modélisation spatiale, les modèles LUTI apparaissent désormais comme une référence incontournable par rapport à laquelle il devient impératif de se positionner. Nous pourrions le faire d'un point de vue méthodologique, voire technique, en revenant sur le contenu des travaux¹⁰ que nous avons publiés et présentés depuis 2006, date charnière à partir de laquelle nous avons choisi de dépasser la modélisation par automates cellulaires pour nous consacrer au projet MobiSim¹¹, modèle LUTI désagrégé fondé sur la logique des Systèmes multi-agents. **Ces travaux ayant été publiés, nous estimons qu'il n'est pas utile de**

10. Ces travaux ont fait l'objet d'une publication majeure (cf. [Antoni J-P., Vuidel G., 2010. MobiSim : un modèle multi-agents et multi-scalaire pour simuler les mobilités urbaines. In : Antoni J-P., (Dir.), *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, pp. 50-77]) qui s'appuie sur plusieurs conférences présentées lors de colloques internationaux [Antoni J-P., Frankhauser P., 2008. Modéliser différentes dynamiques à différentes échelles pour simuler la complexité des mobilités urbaines. L'exemple de MobiSim, XLV^e Colloque de l'ASRDLF, Rimouski, Canada, 25-27 août 2008 (CD ROM) ; Antoni J-P., Chanard C., Vuidel G., 2012, Assessing daily mobility scenarios within the MobiSim agent-based behavioral model, 11th International Conference on Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning, Eindhoven, The Netherlands, 27-29 August ; Antoni J-P., Frankhauser P., 2010. Simulating daily and residential mobility within agent-based LUTI models : an application of MobiSim on the city of Besançon, 10th International Conference on Design and Decision Support Systems in Architecture and Urban Planning, Eindhoven, The Netherlands, 19-22 July ; Antoni J-P., Vuidel G., Frankhauser P., 2009. *The MobiSim project : a multi-scalar agent-based Land-Use and Transport Integrated model*, 16th European Colloquium of Quantitative and Theoretical Geography, Maynooth, Ireland, 4-8 September], ainsi que sur des rapports de recherche [cf. Antoni J-P., Frankhauser P. (dir.) Tannier C., Vuidel G., Hirtzel J., 2011. *MobiSim*, Rapport PREDIT, 170 p. ; Antoni J-P., Vuidel G., Frankhauser P., 2009. *MobiSim. Appropriation et développement par ThéMA : vers une modélisation multiscalaire du développement urbain par système multi-agents*, Ministère de l'écologie, Direction de la Recherche et de l'Innovation, 63 p].

11. Rappelons que MobiSim (Antoni, 2010b) est un modèle LUTI qui s'organise en trois étapes : (i) génération d'une population d'agents virtuels représentant les habitants de l'agglomération étudiée avec leurs caractéristiques (âge, sexe, revenu, etc.), leur composition familiale et leur localisation (type de logement et bâtiment) ; (ii) simulation de la mobilité quotidienne de ces agents pour différents motifs (travail, achats, loisirs, accompagnement des enfants, etc.) et par différents modes de transport (automobile, transports en commun, marche, etc.) ; (iii) simulation de la mobilité résidentielle des agents qui déménagent pour satisfaire leurs préférences (cadre de vie, logement, localisation, etc.) suite à une modification de leur statut familial ou professionnel ou pour optimiser leur mobilité quotidienne. Au cours des simulations, l'introduction d'infrastructures ou de comportements nouveaux dans le modèle permet de construire des scénarios de développement à moyen terme. À chaque étape, une série d'indicateurs en évalue les conséquences au regard des critères du développement durable, pour faire de MobiSim un outil de gouvernance et de prospective territoriale. Des informations complémentaires quant aux choix qui ont précédés son développement sont données dans la conclusion générale (cf. p. 152).

le faire et préférons axer ce mémoire sur des questions théoriques qui ouvrent des perspectives plus fondamentales pour qualifier le rôle actuel des modèles LUTI, et, de manière plus générale, de la modélisation en géographie théorique et quantitative. En particulier, nous souhaitons montrer que *la modélisation pour la modélisation* ne présente qu'un intérêt limité : son intégration dans une problématique théorique (qui garantit la cohérence des hypothèses posées) et dans un projet d'aménagement du territoire (qui sert d'appui aux simulations prospectives) apparaît comme un préalable nécessaire. La problématique est sous-tendue par deux questions majeures :

1. Alors que l'homme aménage son territoire depuis « toujours » et qu'il construit des villes depuis « longtemps », comment se fait-il qu'il lui soit devenu nécessaire de recourir à une planification territoriale et urbaine de plus en plus stricte depuis la fin du 19^e siècle¹², planification qu'il tente désormais d'appuyer sur des modèles informatiques de simulation (automates cellulaires, systèmes multi-agents, etc.) ? En d'autres termes, pourquoi et comment en est-on arrivé à substituer une réflexion complexe et incertaine, appuyée sur des outils et parfois des modèles difficiles à manipuler, à une pratique que l'on pouvait précédemment considérer comme un acquis vernaculaire quasiment « naturel » ? (*Réponse p. 76*)
2. Que peut-on demander à ces modèles de simulation quand il s'agit d'aménager l'espace ? Si leur objectif fondamental consiste à mieux comprendre et à reproduire (dans la mesure du possible) ce que l'on connaît des dynamiques territoriales, on sait qu'ils sont utiles pour extrapoler ces dynamiques et construire des scénarios contrôlés pour l'aménagement prospectif (Antoni, 2011, 2013). Mais ne peuvent-ils pas dépasser cette extrapolation et fournir une aide à la décision plus audacieuse ? Ne faudrait-il pas, d'ailleurs, poser l'hypothèse qu'ils sont actuellement les outils les plus adéquats pour anticiper l'*innovation territoriale* dans un cadre conceptuel qui dépasserait les acquis vernaculaires et qui permettrait d'évaluer de nouveaux paradigmes pour l'hominisation spatiale ? (*Réponse p. 152*)

Pour tenter de répondre à ces questions, nous proposons un plan en deux parties. La première s'intitule *L'espace géographique des villes* ; elle revient sur les fondements épistémologiques de la géographie, et tente de comprendre pourquoi nous cherchons aujourd'hui à mobiliser la technique informatique (le *medium* des machines) pour répondre à des questions aussi simples que celles de la durabilité des territoires (entendus comme des *milieux* ; Demangeon, 1994), alors que dans

12. S'il constitue un exercice plurimillénaire plus ou moins bien défini depuis l'Antiquité grecque, l'urbanisme n'a par exemple jamais fait l'objet d'un véritable développement scientifique avant que l'ingénieur et architecte espagnol I. Cerdá (1815-1976) n'en propose une théorie générale en 1867 : « Je vais initier le lecteur à l'étude d'une matière complètement neuve, intacte et vierge [*urbanización*]. Comme tout y était nouveau, il m'a fallu chercher et inventer de nouveaux mots, pour exprimer des idées nouvelles dont l'explication ne se trouvait dans aucun lexique ». En fait, on ne peut pas dire que l'aménagement des villes n'existait pas avant I. Cerdá (1867), mais pour la première fois, on entend lui donner un statut scientifique et on tente de l'armer comme une discipline autonome. L'histoire ne donnera pas raison à cette manière de voir les choses, sans non plus lui donner tort : l'urbanisme est aujourd'hui défini comme une pratique (appuyée sur la science, l'art et la technique, mais sans s'y inclure totalement ; Merlin, 2002). On relève le même « retard à l'allumage » pour la définition de l'aménagement du territoire, qui n'apparaît à notre connaissance officiellement en France qu'en 1950, sous le ministère d'E. Claudius Petit (1907-1989) : « L'aménagement du territoire, c'est la recherche dans le cadre géographique de la France d'une meilleure répartition des hommes en fonction des ressources naturelles et des activités économiques. Cette recherche est faite dans la constante préoccupation de donner aux hommes de meilleures conditions d'habitat, de travail, de plus grandes facilités de loisir et de culture. Cette recherche n'est donc pas faite à des fins strictement économiques mais bien davantage pour le bien-être et l'épanouissement de la population ».

leur dimension écologique, ils sont durables (en équilibre dynamique) par définition. Les villes, qui ont toujours constitué le sujet majeur de nos préoccupations (Antoni, 2003, 2009, 2010a), y sont identifiées comme des machines-outils aujourd’hui enrayées, dont le développement, permis par toutes les étapes de modernisation des mobilités, apparaît en rupture avec leur objectif de départ (rupture que nous qualifions de *catachrèse*). Dans la deuxième partie, intitulée *L’espace ergonomique des villes*, nous entrons dans le champs des solutions possibles. À l’issue d’un transfert du monde de la ville à celui de la machine urbaine, il s’agit d’examiner les alternatives à l’étalement urbain, pour proposer une solution fondée sur une reconquête de la troisième dimension spatiale. Au fil des chapitres, nous construisons un transfert de l’ergonomie vers la géographie, qui conduit à la proposition d’une urbanisation verticale compatible avec le concept de *Transit oriented development* (Calthorpe, 1992) et de *ville fractale* (Frankhauser, 2012), que nous rapprochons des théories proposées par H. Reymond (1998), résumées par l’expression *ville tridiastatique*. Entre ergonomie et modélisation urbaines, l’ensemble positionne un certain nombre d’éléments théoriques pour une anticipation géographique de l’urbanisation et de ses enjeux, et une théorie de l’ergonomie urbaine.

L’intérêt de cette démarche est mis en perspective dans la conclusion générale, qui rappelle que cette proposition d’ergonomie urbaine, comme toutes les propositions du même genre en matière d’urbanisme et de géographie des villes, ne peut être débattue qu’après avoir été testée et visualisée. C’est là qu’interviennent à nouveau la cartographie (analytique, dynamique et interactive), la modélisation et la simulation en géographie théorique et quantitative (en particulier Mobi-Sim et les modèles LUTI), afin d’évaluer dans quelle mesure les solutions esquissées conduisent effectivement à des territoires plus durables et à des villes meilleures à vivre.

Deuxième partie

L'espace ergonomique des villes

Introduction

Si l'on considère la ville comme un milieu sociotechnique orienté par un axe coalescent et un axe cohérent (pour reprendre les mots qu'emploie M. Sorre (1948)), selon une forme organisée qui détonne avec la nature écologique terrestre et dont les éléments se disposent au gré de la physique géographique³⁴, elle apparaît artificielle par définition. La ville peut en fait s'assimiler à un outil dont le but, à l'image du travail tel que K. Marx le définit dans *Le Capital*³⁵, consiste à assimiler un certain nombre de *matières* pour leur donner forme : « Le travail est de prime abord un acte qui se passe entre l'homme la nature. L'homme y joue lui-même vis-à-vis de la nature le rôle d'une puissance naturelle. Les forces dont son corps est doué, bras et jambes, tête et mains, il les met en mouvement afin d'assimiler des matières en leur donnant une forme utile à sa vie. En même temps qu'il agit par ce mouvement sur la nature extérieure et la modifie, il modifie sa propre nature, et développe les facultés qui y sommeillent ».

C'est sur cette citation que pourrait débiter une analogie entre le monde de la ville et celui du travail, analogie qui ferait écho à une autre citation, celle de P. Lavedan (1936)³⁶ qui, comme K. Marx, positionne deux fondamentaux à l'origine de la ville : l'homme et la nature. Elle continuerait ensuite dans un sens plus économique : si la ville peut être considérée comme un outil au service des besoins humains, la notion de spécialisation y apparaît tout autant que dans

34. Compte tenu des conclusions apportées par les chapitres de la première partie, nous préférons employer l'expression *physique géographique* plutôt que *géographie physique* car elle décrit mieux, selon nous, l'objet de cette discipline dont les problématiques, souvent peu enclines à considérer l'action des hommes sur l'espace qu'ils occupent, ne correspondent que très lointainement à ce que nous avons défini comme une géographie dans les chapitres précédents (Chapitres 2 et 3), c'est-à-dire une discipline qui étudie la manière avec laquelle l'espèce humaine s'inscrit (*graphie*) sur la planète Terre (*géo*).

35. On peut rappeler la citation de K. Marx : « Le travail est de prime abord un acte qui se passe entre l'homme la nature. L'homme y joue lui-même vis-à-vis de la nature le rôle d'une puissance naturelle. Les forces dont son corps est doué, bras et jambes, tête et mains, il les met en mouvement afin d'assimiler des matières en leur donnant une forme utile à sa vie. En même temps qu'il agit par ce mouvement sur la nature extérieure et la modifie, il modifie sa propre nature, et développe les facultés qui y sommeillent » (Livre 1, Chapitre 7).

36. La citation complète de P. Lavedan (1936) se rapproche d'ailleurs d'une vision écosystémique des espaces urbains : « La ville est un être vivant. Comme tout être vivant, elle naît, elle grandit, elle meurt. L'étude des origines, de la croissance et, s'il y a lieu, du déclin et de la mort de la ville fait l'objet d'une science constituée récemment, l'évolution urbaine [dans l'intervalle, il semble que cette science ait malheureusement disparu]. Cette science est d'une extrême complexité, car les facteurs susceptibles d'expliquer les diverses phases du développement de la ville sont infiniment variés. Tout peut néanmoins se ramener au jeu de deux grandes forces, la nature et l'homme ».

la division du travail, ce qui renvoie à un nouveau champ des sciences économiques. Etudier ensemble la ville et le travail, c'est-à-dire regarder la première à travers les enseignements du second, et inversement, permet alors d'envisager la ville sous un angle original et d'y observer d'autres enjeux, qui concernent à la fois son organisation sociale (cohérence) et sa configuration spatiale (coalescence). Mais pour ce faire, il convient liminairement de préciser ce que l'on entend par travail. Ici encore, c'est l'acception la plus générale du terme qui permet d'accorder au mieux les points de vue, en partant du principe qu'une ville est bâtie dans le but de faciliter une certaine forme de travail. Ceci permet notamment d'envisager les rapports ville-travail dans un sens proche de celui de P. Aydalot (1985) : « Nous sommes [...] conduits à donner au travail un rôle central dans l'analyse des phénomènes spatiaux [...] Le travail nous apparaît comme le facteur le plus structurant de l'espace, et à ce titre, comme le facteur de localisation essentiel, de même que la relation entre une entreprise et sa force de travail est centrale pour comprendre les formes du développement régional et urbain ». Pour autant, est-il possible de décrire et de considérer la ville à la manière d'une entreprise ? L'entreprise est orientée vers un but : maximiser les bénéfices pour plus de profits ; la ville l'est également : maximiser les proximités pour moins d'effort et plus de confort. L'une comme l'autre peuvent s'assimiler à des systèmes dont les éléments interagissent les uns avec les autres en créant des alliances et des conflits. De ces alliances naissent des compromis, qui prennent la forme de « contrats », en l'occurrence de « contrats sociaux ».

De cette idée, structurée par la notion de travail (Chapitre 4), que la ville peut fonctionner à l'image d'une entreprise, il est possible de revenir à sa géographie, c'est-à-dire à la configuration spatiale du système-ville (comme du système-entreprise). Cette mise en correspondance peut être approchée par **une série d'outils relativement vaste, que l'on empruntera à la fois aux sciences de l'espace (la géographie et l'architecture) et à celles de l'entreprise et du travail (la psychologie et la physiologie du travail, l'ergonomie), chacune s'attachant au problème de la localisation des éléments qui composent le système qu'elles étudient en analysant, à des échelles différentes, le jeu dialectique de l'organisation des distances et des proximités.** Parmi ces disciplines, l'*ergonomie* occupe toutefois une place particulière : nouvelle et transversale, elle intègre de nombreux champs disciplinaires pour s'attacher spécifiquement à l'organisation du travail (Chapitre 5). Pour réaliser cet objectif, l'aménagement des postes de travail (donc de l'*espace* du travail) apparaît fondamental : plusieurs méthodes peuvent être proposées pour réduire les nuisances psychologiques et les risques physiologiques des usagers de ces espaces. Ces méthodes ne sont d'ailleurs pas très éloignées des modèles mis en place par les géographes³⁷ et mobilisent fortement la notion de distance. Pour autant, l'espace étudié dans le cadre de ces simulations est souvent plus « riche » que celui des géographes dans la mesure où, presque systématiquement, il intègre le temps et la troisième dimension (la verticalité) comme autant de leviers possibles pour concevoir les postes de travail comme des « espaces de solutions ». Cette intégration, qui n'est évidemment pas absente des préoccupations des géographes et des urbanistes, offre des perspectives innovantes pour réfléchir à des espaces urbains ergonomiques, conçus pour mieux satisfaire les besoins humains, réduire les efforts et maximiser le confort des habitants (Chapitre 6).

37. De plus, ces méthodes mobilisent l'outil informatique et la simulation pour fournir des outils d'aide à la décision pour la conception de Systèmes hommes-machines très variés, ce qui rapproche encore l'ergonomie d'une partie des recherches actuellement développées en géographie ; cf. l'Introduction générale, p. 8 et suivantes.

Chapitre 4

La machine urbaine

SI l'on admet l'idée que la ville est construite pour répondre aux buts que nous avons évoqués, elle peut être considérée comme un outil à l'usage des sociétés qui la construisent, il devient nécessaire d'identifier les relations qui la lient au monde du travail. Dans cette optique, on pourrait d'abord entendre la notion de travail dans le sens que lui ont donné A. Smith (1723-1790) et la révolution industrielle, c'est-à-dire comme quelque chose qui se mesure en valeur d'usage ou en valeur d'échange¹. Mais, cette seule définition économique ne suffit pas à cerner complètement la notion de travail puisque, comme le rappelle H. Marcuse, « le travail est un concept ontologique [...] qui saisit l'être même de l'existence humaine en tant que telle »². Dans ce contexte, le travail permet d'évaluer sur le même plan la production de biens (le travail « concret » du manuel) et la production sociale (le travail « abstrait » de l'intellectuel). Ainsi, c'est « par son travail que chacun participe à la société, conçue elle-même comme essentiellement définie par le travail » (Mottez, 1987). Cette dimension globale du travail nous invite à en donner une définition plus précise, permettant d'envisager la ville à l'image d'une machine : dans le § 4.1, nous défendons cette position en analysant le travail au sein d'un système productif plus ou moins contraint, auquel répondent des aménagements spatiaux plus ou moins adaptés : les postes de travail ; dans

1. La valeur d'usage est le prix que l'on donne à quelque chose en fonction de l'utilité que peut en retirer celui qui en bénéficie (dans un contexte donné). La valeur d'échange correspond quant à elle au prix auquel cette chose s'échange ; cf. [Smith A., 1776, 1995, *Recherches sur la nature et les causes de la richesse des nations*, Presses universitaires de France, 1512 p.].

2. On peut encore citer H. Marcuse critiquant l'acception presque exclusivement économique du travail : « La notion économique de travail a réagi de son côté sur les interprétations des fondements du travail en tant que tel, dans des domaines étrangers à l'économie. Elle a orienté les conceptions touchant le sens et l'essence du travail dans une direction bien déterminée, au point que maintenant, au premier chef, au sens propre du mot, c'est l'activité économique qui est considérée comme travail et l'activité du politicien, du chercheur, de l'artiste, du prêtre, n'est prise comme travail qu'au sens figuré et non sans hésitation, ce qui, par là même, l'oppose radicalement à l'activité économique. Mais ce n'est pas tout : la notion de travail a été encore plus rétrécie dans la théorie économique même. De plus en plus, on a tendance à ne plus entendre par là que le travail d'exécution, le travail commandé, non libre (dont le travail salarié est le prototype), même là où il s'agit expressément de définir la notion économique de travail, en rapport avec les concepts fondamentaux de l'économie politique » ; cf. [Marcuse H., 1933, *Les fondements philosophiques du concept économique du travail*. In : Bailly G., Bresson D., Grasset J.B., 1970, *Culture et société*, Ed. de Minuit, 391 p.].

le § 4.2, nous développons le concept de machine (entendu comme un « être physique » dont l'activité comporte travail, transformation ou production) en soulignant son intérêt central pour considérer à la fois la ville et les écosystèmes, les deux étant entendus comme des « organisations actives », sociale et artificielle pour la première, polyvalentes et vivantes pour les secondes.

4.1 L'organisation socio-spatiale du travail

Pour assoir cette approche qui vise à lier la ville et la machine, nous nous intéressons certes à la définition de ces deux objets. Mais nous focalisons surtout sur l'organisation sociale et spatiale qui en découle pour les individus et les groupes d'individus qui s'y trouvent confrontés.

4.1.1 Ville et travail

De façon très générale, le travail apparaît comme « l'ensemble des activités humaines coordonnées en vue de produire quelque chose » (Mottez, 1987). Assez simple d'emblée, l'idée se révèle toutefois plus complexe quand on entend les interprétations diverses qui en sont faites. Le dictionnaire économique et social de J. Brémont et A. Gélédan (1990), par exemple, distingue trois sens qui se superposent :

1. Au sens le plus étroit, le travail correspond à une « activité qui produit, dans un cadre économique donné (salarié, artisan, profession libérale, etc.) de la valeur pour autrui ». C'est une activité de production, salariée ou non. Ce sens du travail, mesurable par le fait qu'il est rémunéré, est celui que retiennent généralement les économistes ;
2. Au sens intermédiaire, le travail s'entend également comme une « activité qui produit quelque chose qui a de la valeur pour autrui », mais sans nécessairement s'inscrire dans un cadre économique donné ; c'est par exemple le travail domestique (ménage, achats, cuisine, etc.) qui a une valeur dans le cadre du cercle familial ;
3. Au sens large, enfin, le travail est défini par G. Friedman et P. Naville (1961) comme « l'ensemble des actions que l'homme, dans un but pratique, à l'aide de son cerveau, de ses mains, d'outils et de machines, exerce sur la matière, actions qui, à leur tour, réagissent sur l'homme, le modifient ». Ici, de très nombreuses interprétations sont possibles pour qualifier chaque action ou chaque réalisation comme une forme possible de travail³, dont certaines, nous le verrons, se rapprochent de la définition qu'emploient les écologues pour décrire le fonctionnement d'écosystèmes qu'ils assimilent parfois eux-aussi à des machines (cf. § 4.2).

Entendu de manière large, le travail est donc une notion à double sens, qu'il devient difficile de distinguer du non-travail, c'est-à-dire de son opposé. J. Fritsch (1995) note d'ailleurs à ce propos que « l'étude scientifique des relations entre travail et non-travail est encore à peine entamée ». Cette distinction, qui prend souvent la forme de nuances, semble présente dès l'étymologie : la

3. À titre d'exemple, on rappellera qu'au démiurge qui construit la ville, le *Charmide* de Platon fait correspondre l'artisan. Chez Homère et Hésiode, le terme *demiourgos* (démiurge) ne qualifie pas non plus uniquement l'artisan ou l'ouvrier, mais « toutes les activités qui s'exercent en dehors du cadre de la maison (*oikos*) et en faveur d'un public (*demos*) : les artisans (charpentiers et forgerons), les aèdes, mais non moins qu'eux, les devins et les hérauts qui ne produisent rien » (Vernant, 1965).

racine latine *trepalium* (sorte de trépied romain utilisé comme instrument de torture) a donné le mot français *travail* et peut s'assimiler à une activité pénible ; la racine *leb*, qui a donné l'anglais *labour*, évoque elle aussi un supplice, un effort ou une fatigue ; de même pour l'indo-européen *orbh* (littéralement « privé de père », puis « dépendant », « esclave ») qui donnera les mots russes *rabot* (travail) et *rabstvo* (esclavage), ainsi que l'allemand *arbeit*. En revanche, la racine *werg*, qui a donné l'anglais *work* et l'allemand *werk*, ne s'associe pas à l'idée d'effort, mais simplement à celle de faire « quelque chose ». Le mot français *travail* fait donc simultanément référence à ce que l'anglais et l'allemand distinguent : la besogne (*labour*, *arbeit*) et l'ouvrage (*work*, *werk*). Pour pallier cette absence française de nuance sémantique, les psychologues et les sociologues du travail n'ont proposé que tardivement un essai de distinction permettant de séparer le travail assimilé à un « supplice » du travail assimilé au fait de « faire quelque chose » : M. Noulin (1992), par exemple, parle de travail *aliéné* en opposition au travail *auto-régulé*.

Selon cette distinction, le travail aliéné correspondrait globalement à l'allemand *arbeit* et s'inscrirait dans une sorte de rapport d'employé à employeur : le travailleur y est soumis à un certain nombre de contraintes sociales, techniques et organisationnelles qui lui sont imposées ; il cède ainsi à celui qui l'emploie son temps et le sens de son travail, en contrepartie desquels il perçoit un salaire lui permettant d'assurer son autonomie hors de son temps de travail. En revanche, le travail auto-régulé (qui fait écho à l'allemand *werk*) correspondrait à une tâche dans laquelle « l'homme est à la fois concepteur et exécutant de son propre travail » et dans laquelle il établit lui-même « un équilibre entre le facile et le difficile » (Cazamian *et al.*, 1996). Ainsi le travail auto-régulé est entièrement confié à la responsabilité du travailleur qui y trouve l'expression pratique de ses envies et de ses possibilités, ce qui lui procurerait des moments de joie, de remise en question et finalement de développement de ses capacités⁴. L'exemple du bricoleur rapporté par J. Fritsch (1995) permet d'illustrer les nuances qui séparent le travail contraint du travail auto-régulé, en montrant bien que le « non-travail » peut en fait correspondre à une forme de travail dont l'aspect contraignant est réduit :

L'exemple du bricoleur

« En apparence, le bricoleur qui peint les murs de son appartement ne procède pas d'une autre manière que le peintre professionnel. L'écoute de la télévision constitue au même instant le travail du critique et le loisir du téléspectateur, mais l'activité de non-travail peut être reprise, abandonnée, ralentie, au gré de celui qui la pratique, alors qu'il ne peut en être ainsi de l'activité de travail : la refuser entraînerait la perte d'un revenu indispensable pour vivre à la plupart des individus ».

4. Notons que dès le début du 19^e siècle, E. Kant (1724-1804) évoque également cette distinction : « On peut être occupé en jouant : cela s'appelle occuper ses loisirs ; mais l'on peut aussi être occupé par contrainte et cela s'appelle travailler [...]. Dans le travail, l'occupation n'est pas en elle-même agréable, mais c'est dans un autre but qu'on l'entreprend. En revanche, l'occupation dans un jeu est en elle-même agréable, sans qu'il soit besoin de plus de se proposer un but. Veut-on se promener : dès lors la promenade elle-même est le but et la marche nous est d'autant plus agréable qu'elle est plus longue. Mais si nous voulons aller quelque part, la société qui se trouve en cet endroit, ou tout autre chose, est le but de notre marche et nous choisissons volontiers le plus court chemin » ; cf. [Kant E., 1803, 1993, *Réflexions sur l'éducation*, Vrin, Coll. Bibliothèque des textes philosophiques, 160 p.]. La citation est d'autant plus intéressante quelle s'appuie sur l'exemple de la mobilité quotidienne à travers laquelle on retrouve une idée d'optimisation et de minimisation des distances, qui sera reprise indirectement par les travaux de K.G. Zipf (1949) ou de D.L. Huff (1964), et dont une solution algorithmique a été apportée par E.W. Dijkstra en 1959. Ce point sera développé avec plus de précision dans le Chapitre 5.

C'est à partir de cette distinction subtile que nous proposons une comparaison du travail et de la ville. Trois idées en découlent. Premièrement, (i) le travail participe d'un système comportant des boucles de rétroaction qui modifient l'homme en même temps que l'homme les modifie. De ce point de vue, il partage certaines de ses caractéristiques avec l'espace géographique, et en particulier avec la ville qui, elle aussi, influence les sociétés au fur et à mesure que celles-ci la construisent (Chapitres 2 et 3). Parallèlement, I. Meyerson (1955) assimile le travail à « une contrainte vitale pour l'homme » en indiquant que « c'est pour faire face à ses besoins biologiques de nourriture ou de protection que l'homme a travaillé, et [que] c'est cette nécessité qui a fait du travail une action forcée ». Or, si l'on s'en tient à la littérature géographique classique (Lavedan, 1936 ; Sorre, 1948 ; Claval, 1981) mais également aux hypothèses de l'économie spatiale (Huriot, 1998 ; Bailly et Huriot, 1999) et aux conclusions des historiens de la ville (Mumford, 1950 ; Duby, 1980-1985 ; Blanquart, 1997), nous avons souligné que la ville a elle aussi pu (ou dû) apparaître pour satisfaire un certain nombre de besoins humains (biologiques, défensifs, économiques, etc.) et qu'elle découle d'un aménagement nécessaire des milieux. Ce parallèle fonde la deuxième idée, que (ii) ville et travail apparaissent tous deux comme une contrainte permettant de répondre à certains besoins humains. À ce propos, J. Fritsch (1995), note clairement que « l'urbanisation, liée aux progrès de l'agriculture et de l'industrie, a soustrait l'individu aux influences et aux contraintes que les communautés rurales faisaient peser sur lui, lorsqu'elles réglaient aussi bien sa vie sociale, religieuse ou familiale que sa vie professionnelle », admettant par là que la ville correspond à une « libération de la personne qui n'a pas été, ni ne pouvait être immédiatement ressentie comme telle par tous ». En découle la troisième hypothèse, que (iii) **le jeu des rétroactions entre l'homme et le travail, tout comme entre l'homme et la ville, peut masquer son caractère contraignant, et ce d'autant plus que sa réalisation s'appuie sur une série d'outils possiblement aliénants, que la ville concrétise en partie.**

Pour approfondir cette correspondance, il faut encore rappeler qu'une ville n'existe pas en dehors de l'espace qu'elle occupe : elle est organisée en proximités pour maximiser les interactions possibles entre les éléments et les individus qui la composent selon un aménagement qui se matérialise dans un espace concret (Chapitre 3). Parallèlement (et presque symétriquement), le travail se concrétise lui aussi dans un espace qui fait l'objet d'une réflexion importante quant à son organisation et son aménagement en postes de travail.

4.1.2 L'aménagement des postes de travail

Dans un contexte où, finalement, tout (ou à peu près tout) peut être considéré comme une forme de travail, il n'y a rien d'étonnant à ce que les champs disciplinaires associés à l'étude du travail sous toutes ses formes, se soient multipliés. Depuis l'avènement de l'ère industrielle, la sociologie et la psychologie du travail ont rapidement investi ce domaine, en même temps que les principes élaborés par la physiologie ont été adaptés au monde du travail, comme ils l'avaient préalablement été à la pratique du sport. Assez dispersé au départ, l'ensemble de ces champs d'étude et de recherche semble désormais recueillis dans une discipline relativement nouvelle et encore assez mal définie : l'ergonomie⁵. Son objet concerne, entre autres, la définition et la conception des postes de travail.

5. Nous ne définissons pas encore l'ergonomie ici (définition qui fait l'objet du Chapitre 5 ; p.97) ; nous nous intéressons d'abord à son principal objet d'étude : l'espace de travail.

Le concept d'espace de travail est né il y a une trentaine d'années à partir des travaux de la psychologie environnementale (Altman and Stokols, 1987), afin de « rendre compte d'une nouvelle manière d'appréhender la réalité du travail à travers l'étude des interactions complexes existant entre les aménagements des lieux et les activités et comportements au travail » (Fischer, 1998). Comme son nom l'indique, ce concept est explicitement associé à une forme d'analyse de l'espace et trouve son enjeu majeur dans l'importance de l'aménagement, entendu comme un facteur important de l'organisation et de la réalisation des activités. Pour les psychologues, l'appropriation d'un espace de travail correspond en quelque sorte à l'inscription de soi dans l'espace. Elle provoque une volonté de le contrôler dont découle à terme un certain attachement à un lieu particulier (*place attachment*). Cette appropriation met globalement en jeu trois types de besoins : (i) un besoin de sécurité et de stabilité qui se manifeste par une tendance à rechercher un environnement protecteur dans lequel les éléments agresseurs ou menaçant sont maîtrisés ; (ii) un besoin d'influence et de contrôle qui se manifeste par une tendance à un élargissement du rayon d'action et une volonté d'y maîtriser les activités et les interactions ; (iii) un besoin d'identité et de valeurs personnelles qui se manifeste par une tendance à promouvoir l'image de soi en évaluant les réactions de son entourage, au sein d'un espace de travail qui devient le médiateur symbolique d'une expression personnelle. À une autre échelle, les processus qui sous-tendent l'ensemble de ces relations ne paraissent pas très éloignés de la logique du choix résidentiel telle qu'elle a été étudiée en géographie (Frankhauser et Ancel, 2013)⁶.

En effet, selon G.N. Fischer (1989) le processus d'appropriation transforme l'espace du poste de travail en une sorte de « chez soi » propre à chaque individu, et correspond à une certaine forme de création de territoire personnel. La conquête et la revendication de ce territoire peuvent se faire par l'intermédiaire de marqueurs reconnus par l'ensemble des individus partageant le même poste de travail ou qui le fréquentent (les employés d'une entreprise par exemple). Dans ce sens, ces marqueurs correspondent à un système de symboles individuels qui se destinent à une collectivité susceptible de les comprendre : « les processus en œuvre dans l'appropriation peuvent ainsi traduire les différents types de besoins ou de valeurs des individus et des groupes en présence. C'est pourquoi il existe plusieurs niveaux d'appropriation tels que l'appropriation collective, l'appropriation de groupe, dans une organisation par exemple, et l'appropriation individuelle, dans le cas de l'espace privé, notamment ». À une autre échelle, ici encore, l'ensemble n'est pas très éloigné non plus de la définition du territoire telle qu'elle est généralement admise par les géographes : en tant qu'« espace approprié, avec sentiment ou conscience de son appropriation », le territoire « tient à la projection sur un espace donné des structures spécifiques d'un groupe humain, qui incluent le mode de découpage et de gestion de l'espace, l'aménagement de cet espace » (Brunet *et al.*, 1992). L'*espace* de travail pourrait donc aussi s'entendre comme un *territoire* de travail.

Cela étant, les ergonomes préconisent généralement de ne pas restreindre la considération des « territoires de travail » à la position statique de celui qui y travaille car la tâche qu'il y accomplit nécessite souvent qu'il s'y meuve (mouvement) et qu'il se déplace (déplacement)⁷. L'appropriation prend en effet une forme un peu différente quand elle s'exprime à travers les déplacements

6. Nous assimilons cet ouvrage à une étude géographique même si sa construction est fondamentalement interdisciplinaire et élaborée à partir des regards croisés de géographes, d'économistes et de psychologues.

7. Sans avoir particulièrement étudié l'étymologie de ces deux verbes, nous employons *mouvoir* pour décrire les mouvements d'une personne, c'est-à-dire de l'un de ses membres (bras, jambes, etc.) dans l'espace tridimensionnel qui l'entoure, mais sans que cette personne ne se déplace. Le verbe *se déplacer* implique en revanche un déplacement qui se traduit par une translation dans un système de coordonnées planaires (XY) ou volumique (XYZ).

des individus. Elle rejoint alors la problématique de la mobilité et met en jeu les proximités, permettant d'étudier la manière avec laquelle les individus « bougent » pour effectuer une tâche quelconque et/ou rencontrer les autres pour échanger avec eux : le poste de travail personnel devient le centre à partir duquel d'autres éléments vont être atteints. Deux types de déplacements peuvent alors être distingués : (i) les déplacements non-fonctionnels (qui ne sont pas directement liés au travail) et (ii) les déplacements fonctionnels (liés au travail). Alors que la première catégorie est partiellement auto-régulée (dans le sens où, ne dépendant pas directement d'une action orientée vers le travail, l'individu y effectue de nombreux choix), la seconde est en revanche liée à une interaction que la tâche à exécuter rend nécessaire : elle dépend souvent de la configuration spatiale dans laquelle elle prend place. Au centre de cette configuration, on retrouve l'ambivalence de la distance qui « aménage » les choses quelque part entre le proche et le lointain, tentant, dans la mesure du possible, de minimiser l'espace qui sépare celui qui travaille de ce dont il a besoin pour travailler, et de maximiser l'espace qui le sépare de ce qui pourrait lui nuire ou de ce qu'il ne veut pas voir, selon une logique qui sera étudiée plus en détail dans le Chapitre 5.

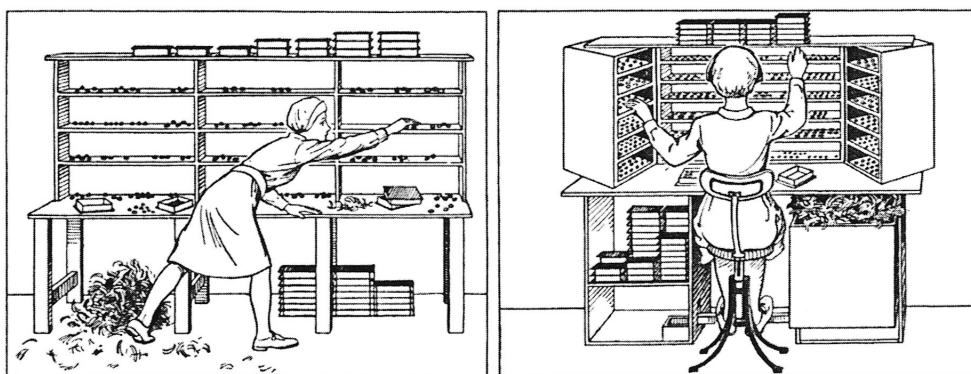


Figure 4.1 – Poste d'emballage de chocolats

À gauche, l'organisation « surfacique » du poste d'emballage nécessite des mouvements et des déplacements fortement contraignants pour l'opérateur qui y travaille. À droite, sa réorganisation ergonomique prend la forme d'un « volume » qui permet d'organiser les proximités selon des critères physiologiques (Source : Oakley, 1956).

En ce qui concerne les mouvements, cette idée de minimisation de distances, de regroupement des objets utiles comme moyen d'accroître une efficacité ou de générer un nouveau confort, correspond en fait à un principe actif dans de nombreux cas. Pour s'en convaincre, on peut utiliser l'image proposée par A.C. Oakley (1956) et illustrer les liens entre proximité et efficacité par l'exemple d'une tâche très concrète : l'emballage de chocolats (Figure 4.1). Sur le dessin de gauche, le poste de travail est configuré de façon linéaire, probablement sans réflexion préalable quant à l'efficacité de son organisation : son fonctionnement nécessite des mouvements incessants de la part de l'opérateur en charge de l'emballage des chocolats. Sur le dessin de droite, le poste est réorganisé, en l'occurrence en demi-sphère, de façon à ce que la proximité à tous les éléments permette à l'opérateur de ne plus se déplacer, mais au contraire, de se mouvoir en position assise, ce qui lui confère un gain de temps et de confort susceptible d'améliorer considérablement son efficacité, voire d'exécuter des tâches qu'il n'aurait pu effectuer avant sans se mettre en danger

d'un point de vue physiologique (les mouvements engendrés par la configuration spatiale demandent moins de torsions et apparaissent plus équilibrés par rapport à la mobilité naturelle du corps humain). **Cet exemple offre une première approche de la façon dont l'ergonomie traite les questions liées à la distance et à la proximité (cf. Chapitre 5) en les inscrivant dans un espace volumique organisé à la fois dans les dimensions horizontale et verticale.** Cette façon d'envisager le problème a d'ailleurs été généralisée bien avant la naissance de l'ergonomie par les architectes sous la forme de schémas anthropométriques qui montrent les surfaces « physiologiquement utilisables » de l'espace environnant : on en trouve un exemple chez Vitruve (illustrée par L. de Vinci)⁸, et elle a fait l'objet d'une étude célèbre de Le Corbusier, dont découle le Modulor, « instrument de mesure basé sur le corps humain et les mathématiques » :

L'exemple du Modulor

Le principe du Modulor a été publié dans les années 1940 par Le Corbusier. Basé sur le nombre d'or, ce système de dimensionnement couple deux suites de Fibonacci, une rouge (établie sur une unité de 1,13 m, soit la hauteur du nombril) et une bleue (établie sur 2,26 m, soit la hauteur d'un bras levé), dérivées d'une stature humaine standardisée et hypothétique que Le Corbusier fixe à 1,83 mètres, soit 6 pieds. Appliqué systématiquement, ce système a permis l'utilisation du nombre d'or à toutes les échelles de l'architecture, du dimensionnement des bâtiments jusqu'aux détails de leur conception intérieure (cf. [Framton K., 2001, *Le Corbusier*, Thames and Hudson, 240 p.]).

L'ensemble des définitions et des exemples présentés ci-dessus montre clairement qu'il existe *a priori* des notions communes aux espaces de travail et à l'espace géographique, en particulier à l'espace urbain : les deux font l'objet d'une appropriation importante d'un point de vue psychosocial, et d'un aménagement qui vise à en maîtriser les distances pour en maximiser l'efficacité. Liées par leur rapport à l'espace, l'aménagement de la ville et l'organisation du monde du travail renvoient donc dos à dos des relations plus ou moins similaires qui semblent pouvoir s'étudier dans un cadre transdisciplinaire (sociologie, psychologie, ergonomie, géographie, etc.). Après avoir insisté sur l'importance de cet espace dans ces relations, il convient de décrire avec plus de précision le deuxième terme du concept d'espace de travail, pour voir dans quelle mesure le *travail* que ces espaces sont censés mettre en œuvre relève en lui-même d'une notion plus ou moins indissociable de l'idée de machine.

4.2 Travailler avec la machine

Dans le point précédent, nous avons tenté de définir la notion de travail et évoqué sa dimension spatiale par l'intermédiaire des postes de travail et de leur organisation ou de leur aménagement. Mais cette organisation n'est évidemment pas indépendante des processus de fabrication ou de production qui en sont à l'origine, et qui, pour une grande part, reposent sur l'utilisation de machines et d'outils. Aussi, il convient désormais d'étudier les machines et les outils en eux-mêmes, ainsi que les contraintes qu'ils imposent, afin de mieux cerner dans quelle mesure ils

8. La figure dessinée par L. de Vinci (1452-1519) se fonde sur les mesures données par l'architecte Vitruve (90-20 avant J.C. approximativement), indiquant que les proportions humaines sont ordonnées par la nature de la manière suivante : quatre doigts font une paume, quatre paumes un pied, six paumes une coudée, quatre coudées font un double pas et vingt-quatre paumes une longueur d'homme. Ces mesures suivent une progression liée à la suite de Fibonacci. L'homme de Vitruve s'inscrit alors dans un cercle dont l'ouverture des bras définit la hauteur.

peuvent induire des aménagements particuliers. Ces aménagements, nous le verrons, valent en partie aussi pour l'organisation des espaces urbains, la ville pouvant de ce point de vue s'assimiler à une machine produisant une certaine forme de travail, au même titre que n'importe quel écosystème.

4.2.1 La ville parmi les machines

L'idée de comparer la ville à la machine peut s'inscrire comme une suite logique si, comme nous l'avons fait précédemment, on reconnaît en elle un outil (Chapitre 3). Pour autant, il ne s'agit pas de considérer la ville comme une « machine à habiter », mais simplement de voir comment elle s'assimile aujourd'hui à un système sociotechnique complexe. Dans ce sens, notre propos diffère de celui de Le Corbusier (1925) quand il évoque la « ville-machine »⁹. Nous considérons simplement ici que la machine (la navette volante de J. Kay (1733) ou la machine à vapeur de J. Watt (1769) pour ne prendre que deux exemples historiques) apparaît plus complexe que l'outil, tout en restant sensiblement comparable. Pour M. de Montmollin (1990), elle correspond en effet à l'ensemble des « éléments que l'opérateur utilise pour accomplir sa tâche ou dont il doit tenir compte », et inclut *de facto* tous les outils et toutes les installations nécessaires, voire, dans certains cas, les hommes impliqués dans cette tâche. Cette définition correspond globalement à celle que donnait C. Babbage¹⁰ dès 1835 : « quand chaque *process* a été réduit à l'utilisation d'outils simples, l'ensemble de ces outils, actionné par une force unique, constitue une machine ». Ainsi, alors que l'outil n'est souvent qu'un moyen pour transformer la nature, la machine s'assimile plutôt à un « objet fabriqué, généralement complexe, destiné à transformer l'énergie et à utiliser cette transformation » (Petit Robert). Techniquement, elle se distingue de l'outil qui ne fait qu'utiliser l'énergie, sans la transformer.

Partant du principe qu'une organisation est active quand elle génère des actions et/ou qu'elle est générée par des actions, E. Morin (1977) définit quant à lui la machine comme « tout être physique dont l'activité comporte travail, transformation ou production » et développe la notion d'« être-machine », que l'on peut rapprocher de la notion d'écosystème telle qu'elle est défendue par G. Pillet et H.T. Odum (1997), et telle que nous l'avons abordée dans la première partie (Chapitre 1), notamment dans sa dimension énergétique¹¹. Ils distinguent alors trois types de

9. L'idée de « ville-machine » a été émise par Le Corbusier et les architectes du mouvement moderne lors des Congrès internationaux d'architecture moderne (CIAM), dont découle la Charte d'Athènes (Le Corbusier, 1957). Rappelons cette idée d'une ville construite pour un « homme nouveau » en prenant simplement l'exemple de la rue : il s'agit d'un « autre type de rue », une « machine à circuler », c'est-à-dire « une usine dont l'outillage doit réaliser la circulation », une rue qui serait « équipée comme une usine » (Le Corbusier, 1925).

10. C. Babbage (1791-1871), mathématicien britannique, a été l'un des précurseurs de l'informatique : en travaillant à la construction de ce qu'il appelle une « machine à différences » (présentée à la Société royale d'astronomie en 1821), il énonce l'un des premiers principes de l'ordinateur. Cette machine, dont la tâche consiste à calculer des polynômes par méthode différentielle, s'appuie sur un moulin qui exécute les opérations sur les nombres. Sa construction se heurte toutefois au problème de la friction et des vibrations occasionnées par les embrayages de l'époque ; elle ne sera jamais achevée. À partir des plans de C. Babbage, une partie de cette machine a été construite en 1991 (bicentenaire de sa naissance) par le Musée de la science de Londres ; elle fonctionne : cf. [Babbage C., 1835, *On the Economy of machinery and Manufactures*. In : Davis L.E., Taylor J.C., 1972, *Design of jobs*, Penguin Books, pp. 23-26.]

11. Dans la préface de l'ouvrage de G. Pillet et H.T. Odum (1997), H. Greppin note que la vie implique « du travail et une transformation de l'environnement dont l'énergie exprime la capacité ». Il note ensuite que suivant la distribution de cette énergie, plusieurs stratégies d'utilisation de l'espace et du temps peuvent être adoptées. Cette remarque semble tout à fait pertinente et compatible avec le propos que nous développons ici.

systèmes, dont le niveau de complexité va croissant :

1. Les *systèmes automatiques*, dont toutes les composantes et toutes les interactions sont connues et gouvernées par des processus homéostatiques dont découle leur stabilité (c'est l'exemple du thermostat qui régule la température pour tenter de ramener systématiquement le système à son état initial) ;
2. Les *systèmes naturels*, principalement gouvernés par des boucles de rétroaction plus complexes, au sein desquelles des variations, mêmes faibles, peuvent conduire à une structure différente de celle du système à son origine (c'est l'exemple de la majorité des écosystèmes : lac, forêt, etc.) ;
3. Les *systèmes humains* que nous ne pouvons comprendre comme les deux précédents car nous y sommes inclus et acteurs¹², et que l'on ne peut donc envisager que de manière provisoire et simplifiée, sous la forme d'un modèle¹³. Il devient alors de plus en plus difficile d'isoler l'étude de ces systèmes de leur « base vitale », constituée par les écosystèmes naturels auto-entretenus. Ce à quoi l'on peut ajouter, comme nous avons tenté de le montrer, qu'il est tout aussi délicat de les séparer des systèmes automatiques, dans la mesure où ces derniers constituent un média de transformation endotechnique du milieu naturel par les sociétés humaines (Chapitre 3).

À l'intérieur de ces trois types de systèmes, l'énergie occupe systématiquement une place fondamentale, qui peut être étudiée selon une approche éco-énergétique (écologie de l'énergie ; cf. p. 20). Ainsi, en suivant l'idée de Pillet et Odum (1997) et en reprenant le raisonnement de E. Morin (1977), il semble que toute organisation active produisant ou produite par le travail puisse s'assimiler à une machine et se définir comme un objet phénoménal, qui dépasse le simple produit social ou l'instrument matériel, et qui peut dès lors être considéré comme un « être physique organisateur ». L'écosystème, comme la machine à vapeur ou la ville, correspondent à cette définition : tous s'assimilent à des « êtres-machines » au sein desquels les actions ne se font pas au hasard de rencontres fortuites et de processus séparés, mais en fonction de propriétés organisationnelles propres à chaque système, même si ces fonctions possèdent parfois un caractère aléatoire. La Figure 4.2, qui associe d'une part un modèle simple de travail (*a* et *b*) et d'autre part une activité économique de transformation d'une ressource tirée de l'environnement (*c*) que l'on peut assimiler à une machine, tente d'illustrer cette idée. Cette vision des choses nécessite toutefois de formuler une différence fondamentale entre deux notions proches *a priori* : l'*aptitude* et la *compétence*. La première s'associe en effet à la réalisation d'une ou de plusieurs activités, alors que la seconde désigne la capacité organisationnelle à conditionner une certaine diversité d'actions de transformation ou de production. La nuance n'est pas anodine puisqu'elle conduit à définir une machine comme un être physique praxique qui effectue des actions en vertu d'une compétence organisationnelle¹⁴. Ainsi, les actions de transformation organisée qui caractérisent les machines ne sont plus isolables les unes des autres, mais associent systématiquement des

12. On retrouve ici l'idée principale soutenue par J. de Rosnay (1975) dans le *Macroscopie* : il est plus difficile d'étudier des systèmes dans lesquels nous (les hommes) sommes inclus que les systèmes dont on peut se détacher parce que nous n'intervenons pas sur eux, et que l'on peut observer par l'intermédiaire d'instruments techniques comme le télescope qu'utilisent les astrophysiciens pour étudier le système solaire ou le microscope des biologistes pour l'étude des systèmes cellulaires.

13. Concernant la définition du mot *modèle*, nous renvoyons à la conclusion générale (cf. p. 151), en précisant que l'acception proposée par E. Morin (une représentation montrant comment les choses s'organisent) diffère de celle que nous retenons pour parler des modèles de simulation en géographie.

14. Si l'on comprend bien ce qu'explique E. Morin (1977), contrairement aux systèmes naturels, dont la dimen-

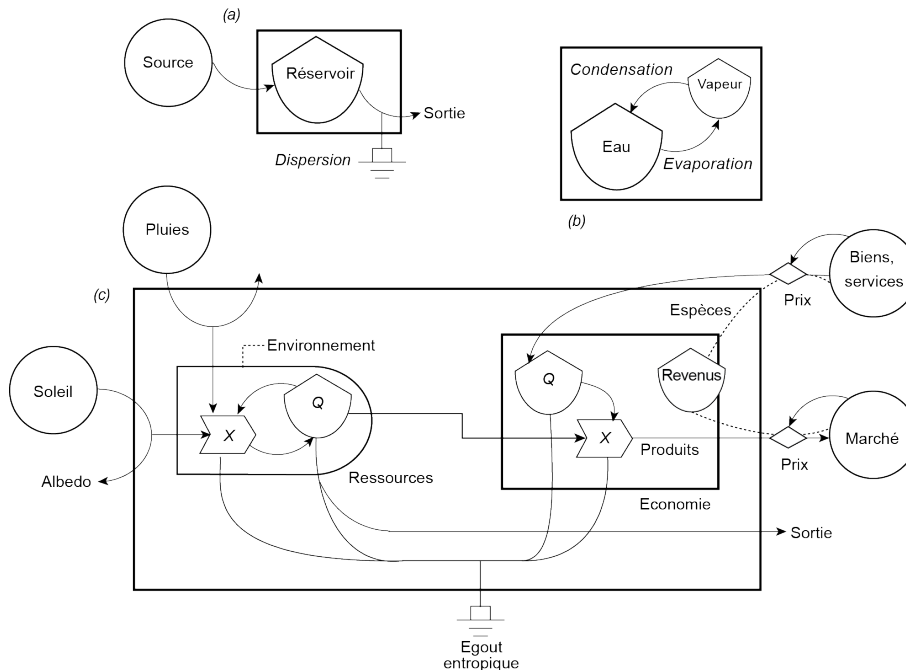


Figure 4.2 – Systèmes, machines et transformation de l'énergie

Selon l'approche éco-énergétique, tous les systèmes peuvent être analysés à peu près de la même manière. En haut (a), il s'agit d'un système ouvert simple avec travail (l'eau rentre, est momentanément stockée, et ressort). En haut (b), le même système, mais fermé (un récipient dans lequel des molécules d'eau passent à l'état gazeux avant d'être à nouveau condensées). En bas, il s'agit d'une activité économique de transformation d'une ressource tirée de l'environnement : la ressource est transformée en produits économiques qui sont écoulés sur un marché, consommés, puis rejetés à l'extérieur du système (Source : Pillet et Odum, 1997).

opérations de production, de travail, de transformation de l'énergie (etc.), à l'instar des écosystèmes. Si l'on s'en tient à cette manière de voir les choses, cinq familles de machines suffisent à caractériser l'ensemble des organisations actives, selon une classification établie par E. Morin (1977) :

1. L'*arkhe-machine*, c'est-à-dire le soleil (seule organisation active connue dans sa catégorie), qui constitue le moteur nucléaire de l'univers en transformant notamment le potentiel gravitationnel en énergie thermique, transformation dont découle toute une série d'organisations spontanées (écosystèmes), comme nous avons pu le voir dans la première partie (cf. p. 21 par exemple) ;
2. Les *proto-machines* (ou moteurs sauvages), qui peuvent être considérés comme des processus machinaux sauvages utilisant les flux thermiques, hydrauliques ou éoliens dans une succession de cycles (ces cycles n'ayant toutefois pas d'existence propre dans la mesure où ils se différencient des processus qui les constituent). Ainsi, les proto-machines correspondent globalement à l'ensemble des écosystèmes étudiés dans la première partie (cf.

sion téléonomique constitue l'une des caractéristiques, l'action de la machine est consciente et réfléchie (même si cette conscience et cette réflexion ne lui sont pas endogènes car il ne faut pas occulter la dépendance totale qui existe entre la machine et la société qui l'a créée).

notamment l'exemple de la bouteille, p. 22), dont certains éléments peuvent être domestiqués par l'homme (le feu, le vent ou l'eau qui font tourner les moulins, etc.) pour faire fonctionner ses machines artificielles¹⁵ ;

3. Les *poly-machines vivantes*, dont le principe allégorique a été identifié par R. Descartes quand il a proposé l'idée d'*animaux-machines* (cf. l'exemple du canard digérateur ; Chapitre 2, p. 41)¹⁶, par la suite généralisée par J. de La Mettrie¹⁷. Les poly-machines vivantes sont composées de l'ensemble des êtres vivants (cellules, animaux, hommes) considérés comme autant de moteurs thermiques ou de machines chimiques « produisant tous les matériaux, tous les complexes, tous les dispositifs, toutes les performances, toutes les émergences de cette qualité multiple nommée vie » (Morin, 1977). Ainsi, comme l'indiquent J. de Rosnay (1966) et J. von Neumann (1966) il semble que les êtres vivants dépassent en complexité, en perfection et en efficacité n'importe quelle usine automatique et n'importe quel automate ;
4. Les *méga-machines sociales*, qui sont constituées à la fois des sociétés animales (fondées sur des interactions spontanées entre individus et des rétroactions régulatrices qui conduisent possiblement à l'homéostasie des écosystèmes) et des sociétés humaines (comparables aux premières mais auxquelles s'ajoutent les notions de néoténie et de culture (Chapitre 2, respectivement p. 42 et p. 47)). Au sein de cette deuxième catégorie, la culture apparaît comme un programme de comportements qui génère, puis reproduit les règles d'organisation sociale, utilisant notamment le langage comme une « machine » pour construire des énoncés et leur donner un sens. Selon L. Mumford (1973), ou, plus récemment, S. Latouche (2004), ces méga-machines se sont développées sous la forme d'appareils (administration d'État, religion, armée, etc.) et ont connu une métamorphose majeure lors du 19^e siècle, quand elles sont devenues capables de produire des machines artificielles, socialement intégrées, mais également intégrantes ;
5. Les *machines artificielles*, dernières nées des machines terrestres à partir du développement des méga-machines sociales, qui correspondent à autant de prothèses et d'artefacts mis au point pour atteindre les objectifs spécifiques des sociétés qui les contrôlent et qui les manipulent. À la différence des outils, qui n'apparaissent que comme de simples instruments ou des appendices prolongeant les actions humaines, les machines artificielles disposent d'une certaine autonomie organisationnelle, dont l'un des aboutissements a été permis par la cybernétique, puis par l'informatique. Pour autant, elles restent aujourd'hui incapables d'« auto » (se régénérer, se réparer, s'auto-organiser, etc.)¹⁸ ;

15. Pour illustrer cette définition on peut reprendre la citation de E. Morin (1977) à ce sujet : « Nous sommes tellement habitués à considérer comme moteur le carter et les cylindres, et non ce qui agit à l'intérieur, que nous oublions que le moteur est ce qui 'turbine' à l'intérieur. Et ce qui est à l'intérieur a d'abord existé à l'état sauvage, existe toujours à l'état sauvage... ».

16. L'hypothèse de l'*animal-machine* avance que les animaux sont comparables à des machines, dans le sens où ils n'ont ni conscience, ni pensée, ni âme. Ce point de vue conduit à interpréter certaines de leurs expressions, comme l'a fait le philosophe N. Malebranche (1638-1715), comme des dysfonctionnement de leurs rouages plutôt que comme une communication de leur souffrance. Selon cette hypothèse, les animaux obéiraient aux causalités qui s'associent à leurs pulsions, par l'intermédiaire de leurs stimuli. Pour R. Descartes, il devient alors possible de créer une machine dont le comportement serait strictement comparable à celui d'un animal.

17. J. Offray de La Mettrie (1709-1751) est un philosophe français, médecin de formation. Dans son ouvrage principal, *L'Homme-machine* (1748), il étend le principe de l'animal-machine proposé par R. Descartes à l'homme, en se référant à une sorte de déterminisme mécaniste qui l'a également conduit à l'athéisme et par la suite au libertinage, deux champs pour lesquels il est aujourd'hui inscrit à la postérité.

18. Cette affirmation est discutable depuis que les avancées de la cybernétique et de l'intelligence artificielle ont permis de produire des machines dont les composants communiquent selon un système de relations complexes

Cette typologie permet évidemment d'affiner l'association ville-machine, que nous tentons de construire, et de positionner les espaces urbains dans deux catégories liées à leurs fonctions dans le temps historique :

1. Dans un premier temps, chaque ville apparaît comme un élément constitutif des poly-machines vivantes (catégorie 3) que constituent les sociétés humaines : en tant que tenant et qu'aboutissant de l'espace géographique, les villes sont l'une des composantes spatiales de l'inscription de ces poly-machines sur la surface terrestre et apparaissent comme un élément de structuration de leur fonctionnement. Cette association peut être considérée comme valable au moins jusqu'à la Révolution industrielle, période charnière (entrée possible dans l'anthropocène) préalablement identifiée comme une rupture dans le processus d'hominisation spatiale (Chapitres 2 et 3).
2. Passé cette période, la ville s'associe, selon nous, à une machine artificielle (catégorie 5) plus ou moins autonome. Elle possède en effet aujourd'hui toutes les caractéristiques de cette catégorie : prothèses et artefacts sont réunis dans un médium technique généralisé, dont l'autonomie organisationnelle est en partie régulée par un appareillage énergétique et informationnel. Construites par l'artificialisation utile des espaces écologiques pour faciliter l'évolution socio-spatiale des sociétés vers les objectifs qu'elles se sont fixées (projet), elles demandent désormais un effort d'adaptation aux individus qui les utilisent et qui calquent une partie de leurs comportements sur leur fonctionnement ¹⁹.

C'est dans ce double sens (catégories 3 et 5) que nous considérons la ville comme une machine, un artefact dont l'utilisation se révèle fortement ambivalente pour ceux qui sont soumis à son usage.

4.2.2 L'ambivalence de la machine

Si l'on poursuit la logique proposée par E. Morin (1977), on peut considérer que les machines artificielles (catégorie 5) enrichissent les sociétés qui les ont produites car elles sont le fruit des méga-machines sociales (catégorie 4) que constituent ces sociétés. Mais dans le même élan, elles contribuent à leur asservissement car elles ne permettent finalement qu'un branchement pauvre d'une société sur les prothèses qui lui permettent de vivre. Ainsi, la distinction fondamentale qui semble séparer l'outil (lui aussi pauvre en branchements, mais par définition) de la machine réside plutôt dans les modifications sociales qui ont été introduites par la machine : c'est véritablement une « révolution » qui caractérise sa multiplication, et qui s'est faite profondément ressentir sur la vie matérielle des hommes, sur l'organisation de leur travail et sur leurs rapports sociaux.

Au fil du temps (Mumford, 1950), cette « révolution » est apparue contradictoire : on y a vu autant un moyen d'augmenter le bien-être des hommes (donc un facteur de progrès) qu'un objet provoquant son asservissement et son aliénation. Ainsi, si les considérations aristotéliennes

leur permettant de détecter leurs propres pannes et, d'un certain point de vue, de s'auto-réparer, voire de prendre par elles-mêmes des décisions pour continuer à exécuter la tâche pour laquelle elles ont été fabriquées après qu'un évènement inconnu *a priori* a perturbé leur fonctionnement. Mais ces exemples sont loin de constituer une généralité.

19. Nous reviendrons sur ce point dans le Chapitre 5 en présentant le « principe de double adaptation » (p. 104), que l'on peut dores et déjà résumer de la manière suivante : les hommes adaptent leur environnement à leurs besoins et s'adaptent ensuite aux artefacts qu'ils ont mis en place pour ce faire.

antiques lui ont plutôt prêté un mauvais rôle, à partir du 16^e et du 17^e siècle, F. Bacon et R. Descartes associent la machine à un moyen de libérer l'homme de la nature, de s'en rendre « maître et possesseur » ; ils préfigurent alors la confiance que lui porteront les Lumières au 18^e siècle pour rechercher l'utile et l'efficace. Plus tard, c'est la Révolution industrielle qui provoque le tournant majeur : l'industrialisation et la mécanisation permises par la machine refondent les conditions d'existence de leurs utilisateurs dans le sens d'une dégradation des conditions de travail qui engendrent de nouvelles inégalités, comme en témoigne par exemple E. Buret²⁰ en 1840 : « l'ouvrier ne peut pas se complaire à son œuvre. Il ne la voit plus naître sous ses doigts. Il fatigue sans cesse. Il ne crée rien... Qu'y a-t-il pour l'intelligence dans la fonction d'un homme qui passe toute sa vie douze et quatorze heures par jour à fabriquer la vingtième partie d'une épingle ? ». La « foi » dans la machine, perçue comme un nouveau moyen de production, est néanmoins rapide et totale. En témoignent ces mots de Napoléon : « Dire qu'il est préférable d'employer des machines, c'est dire que le soleil donne plus de lumière qu'une bougie ». Et plus tard, s'adressant à C.P. Oberkampf²¹ : « Vous et moi faisons une bonne guerre avec l'Angleterre. Vous par votre industrie, moi par mes armes. C'est encore vous qui faites la meilleure » (cf. Lefranc, 1975)²². Dans ce contexte, de nouvelles servitudes se substituent rapidement à la libération annoncée par la machine, qui devient le vecteur d'un sentiment de déshumanisation. En conséquence, c'est en partie de la machine que naîtront certaines utopies d'urbanisme : les considérations de P.J. Proudhon ou les propositions de C.N. Ledoux, de R. Owen et de C. Fourier²³, visent à construire de nouvelles relations en proposant de nouveaux rouages pour des machines urbaines renouvelées dans leur géographie (Choay, 1965).

Au cours de cette évolution, l'introduction de la machine influence donc considérablement le développement des sociétés humaines. Elle génère également une modification profonde de l'organisation spatiale des systèmes urbains qui ne correspondaient jusqu'alors qu'à des outils répondant à des besoins relativement simples. La machine efface en partie l'inertie que connaissaient les villes de l'Antiquité à la Renaissance, et y provoque des changements à la fois rapides et profonds. Que ce soit dans ses principes de fonctionnement, comme dans le recours à des savoir-faire de plus en plus techniques, la machine crée une ville nouvelle, que C. de Portzamparc associe à un âge II dans la préface de l'ouvrage de O. Mongin (1995) :

L'exemple d'un espace retourné (V) : la ville de l'âge II

« La première ville, à travers ses formes diverses, à travers la planète et au long des siècles, présente en effet une extraordinaire constance [...]. La cohésion de la forme est collective, communautaire. Dans cette ville de l'âge I, l'homme semble toujours tailler sa route entre des masses construites, comme s'il écartait son chemin entre les forêts, où il découperait des

20. Cf. [Buret E., 1840, *La misère des classes laborieuses en Angleterre et en France*, Tome 1, Paulin, 492 p.].

21. C.P. Oberkampf (1738-1815) est un industriel français d'origine allemande, fondateur de la manufacture royale de toiles imprimées. Dans les années 1770, il entreprend une modernisation importante de cette manufacture, en y introduisant la machine pour en augmenter considérablement la capacité de production.

22. Pour compléter, on peut également reprendre l'idée très synthétique de G. Lefranc (1975) à propos de la machine : « Libération de l'humain qui pourra se décharger en partie sur la vapeur ? Sans doute. Mais libération qui entraîne en contrepartie une servitude ».

23. Pour la majorité d'entre elles, ces utopies se concrétisent dans le plan de phalanstères et de cités ouvrières, qui révèlent la volonté de créer une infrastructure rationnelle et efficaces des tâches et des fonctions. Pour accompagner l'expansion de l'industrie, ces infrastructures réunissent dans un même espace les lieux de travail et les logements des travailleurs, afin d'augmenter leur cohésion et leur disponibilité, tout en assurant leur équilibre par la présence de leur famille à proximité. En urbanisme, ces utopies, qui correspondent souvent à « une contre-réponse de l'économie capitaliste libérale aux utopies socialistes » (Jean, 1994), sont très bien décrites dans l'anthologie présentée par F. Choay (1965).

clairières pour former des lieux de vie, des 'places'. Avec le coup de tonnerre de l'âge II, cet espace est pour ainsi dire renversé, retourné comme un gant. On ne voit plus selon ce vide des espaces publics, mais à partir d'objets pleins [...] Leur modèle est la machine. La machine, entrée dans le paysage au 19^e siècle, semble mener une lutte sourde contre l'architecture, pour devenir au 20^e siècle son nouveau modèle ».

De manière plus imagée, De Thivier écrivait en 1771 que « la plupart des fondeurs ou des forgerons travaillent sans principe, ils n'ont que la routine comme guide, si leur ouvrage réussit, c'est l'effet du hasard »²⁴. Ce thème de la construction au hasard, est également identifié par I. Calvino (1972), qui en fait un principe propre à l'urbanisme médiéval et, en partie, à l'urbanisme antique : « Les villes aussi se croient l'œuvre de l'esprit ou du hasard, mais ni l'un ni l'autre ne suffisent pour faire tenir debout ses murs ». Cette « œuvre de l'esprit ou du hasard » était garante d'une certaine forme de cohérence ; pour la production de biens comme pour la construction de la ville, l'arrivée de la machine bouleverse cette conception héritée et renvoie sur une base comparable les modes de production, le développement urbain et la machine elle-même. Dans le sous-titre d'un des ouvrages de F. Asher (2005), on lit d'ailleurs sans peine le sentiment d'humilité un peu désespéré dans lequel ce mode de production laisse aujourd'hui les urbanistes et les planificateurs : « ces événements nous dépassent, feignons d'en être les organisateurs ».

Conclusion

D'un point de vue analogique, la machine et la ville se retrouvent ainsi dans le schéma proprement urbain *métro-boulot-dodo*²⁵, à l'image des *Temps modernes* (1936) de C. Chaplin ou du film *Metropolis* (1927)²⁶ de F. Lang, dans lequel l'homme s'assujettit à la ville-machine. D'un point de vue plus conceptuel, la ville s'approche également de la machine si l'on considère cette dernière comme un « assemblage de parties déformables avec restauration périodique des mêmes rapports entre les parties » (Canguilhem, 1952), assemblage qui devient capable d'automatisme, de régulation, ou de contrôle par lui-même de son propre fonctionnement. Peut-on y reconnaître les processus d'autorégulation étudiés par D. Pumain *et al.* (1989) pour qualifier le fonctionnement des espaces urbains ? On peut en tout cas admettre que **la ville et la machine ont fait l'objet d'une sophistication et d'une complexification qui ne permettent plus leur gestion complète par les sociétés qui les ont créées : dans de nombreux cas, leur développement actuel n'est plus maîtrisé de façon globale, mais se sectorise en plusieurs types d'analyses peu intégrées les unes aux autres**. Si l'on prend l'ordinateur comme exemple de machine, force est en effet de constater que rares sont les personnes qui en

24. Cf. [Gille B., 1947, *Les origines de la grande industrie en France*, Dornat-Montchrestien, 212 p.].

25. L'expression est extraite d'un vers de P. Béarn (1902-2004), tiré du recueil de poésies *Couleur d'usine* (1951) : « Au déboulé garçon pointe ton numéro / Pour gagner ainsi le salaire / D'un morne jour utilitaire / Métro, boulot, bistro, mégots, dodo, zéro ». Il critique le caractère monotone et répétitifs de la vie des parisiens, et plus généralement de tous les citadins.

26. La comédie dramatique *Les Temps modernes*, outre une satire du chômage lié à la grande dépression américaine des années 1930, insiste sur la lutte nécessaire des travailleurs dans un monde industrialisé imposé par les gains de productivité. *Metropolis* est un film expressionniste, inspiré par la ville futuriste de l'architecte italien A. Sant'Elia (1888-1916), produit par le réalisateur autrichien F. Lang (1890-1976), qui y met en scène une ville divisée en une partie haute (dans laquelle vivent les familles dirigeantes) et une partie basse (dans laquelle vivent les travailleurs qui font fonctionner la ville). Cette dichotomie verticale faite de loisirs, de richesses et d'oisiveté en surface, et de labeurs actionnant l'ensemble en souterrain, est peut-être aussi inspirée du premier roman de O.G. Wells (1866-1946) (cf. [Wells H.G., 1959, *La machine à remonter le temps* suivi de *L'île du docteur Moreau*, Gallimard, 374 p.]), paru en 1895 et adapté au cinéma en 1960 puis en 2003.

maîtrisent l'ensemble, de la soudure des composants *hardware* à l'optimisation de ses capacités *software*, en passant par la gestion sécurisée de ses données et de son système d'exploitation. Parallèlement, on trouve un découpage identique parmi les professionnels de l'urbanisme, qui étudient la ville sous l'angle des déplacements, de l'habitat, de l'économie, etc., mais rarement de façon transversale comme le préconisent les études dites de « développement intégré »²⁷. D'un certain point de vue, cette sectorisation témoigne en elle-même de la présence de la machine.

Ainsi, la complication²⁸ apparaît finalement comme la caractéristique majeure de la machine et de la ville, qui handicape la gouvernance de leur fonctionnement et crée possiblement des situations d'aliénation dont les causes comme les conséquences à long terme sont masquées par l'apparente efficacité de chaque secteur, de chaque partie. Dans ce cadre d'idées, la ville peut effectivement être considérée au-delà de l'outil, comme une machine alliant simultanément des aspects techniques et des aspects sociaux, c'est-à-dire comme un système homme-machine, et dans ce cas précis, comme un système homme-ville. Ce rapprochement fait l'objet du Chapitre suivant qui débute naturellement par une définition de l'ergonomie.

27. Selon l'Office professionnel de qualification des urbanistes (OPQU), « les différents champs disciplinaires de la ville [sont] trop lourds pour être portés par un seul individu et tout le monde s'accorde pour dire que l'urbaniste ne peut agir seul. Ce qu'on attend de lui, c'est [...] une expertise professionnelle suffisante dans les différents domaines qui touchent à l'aménagement et au développement afin d'en maîtriser les dynamiques, d'être en capacité de dialoguer avec les différents spécialistes de ces thèmes, d'en être l'interprète sans en devenir le mandataire et de révéler les enjeux majeurs et déterminants pour le territoire ». Le développement intégré agrège toutes ces approches ; il est censé en synthétiser les différents paramètres afin de proposer une « approche intégrée et synthétique de l'espace » ; cf. www.opqu.org (consulté en septembre 2013). Dans le même ordre d'idée, les modèles LUTI (cf. p. 9) sont mis au point depuis les années 1980 pour considérer les interactions existant entre la forme urbaine et les politiques de transport (Wegener, 2004).

28. Précisons que, selon la Banque de dépannage linguistique (www.oqlf.gouv.qc.ca/ressources/bdl.html), l'adjectif *compliqué* désigne ce qui est composé d'un grand nombre d'éléments ou ce qui est difficile à comprendre, à exécuter. Est donc compliqué ce qui aime la complication, qui manque de simplicité. L'adjectif *compliqué* comporte alors un sens péjoratif : une chose est compliquée parce qu'on l'a rendue compliquée, alors qu'elle aurait pu être simple.

Chapitre 5

L'approche ergonomique

QU'EST-CE que l'ergonomie ? C'est une discipline sans définition officielle, ce qui laisse le champ libre à à peu près toutes les propositions (Montmollin, 1967). De surcroît, elle n'a accumulé que très peu de bibliographie théorique et s'est surtout concentrée sur la résolution de problèmes pratiques. Ses concepts de base, ses hypothèses de travail, et finalement sa problématique, n'apparaissent qu'en filigrane à travers des études concrètes, parfois (mais rarement) généralisées. Comme la géographie, elle accorde pourtant une grande importance méthodologique à la notion d'aménagement, c'est-à-dire à la configuration spatiale (entendue comme un agencement de distances et de proximités), pour concevoir le *design* de ses propositions pratiques ; thématiquement, elle est également très attentive à des notions proches de celles qu'étudient les géographes (les risques et le paysage par exemple). Pour comprendre l'intérêt de l'ergonomie, il convient donc dans un premier temps de la considérer comme une discipline empirique de conception des espaces (§ 5.1.1), dont l'objectif et les moyens ne sont parfois pas très éloignés de ceux de la géographie. Après avoir construit quelques passerelles entre les deux disciplines, il conviendra alors de mieux noter leurs points communs, en identifiant la ville comme un Système homme-machine (§ 5.1.2), c'est-à-dire comme un système qui peut spécifiquement faire l'objet d'une approche ergonomique.

5.1 L'ergonomie : une discipline spatiale

Construit à partir des mots grecs *ergon* (travail) et *nomos* (loi) le terme ergonomie est fondé en 1949 à Oxford par la Société anglaise d'ergonomie avec une définition assez floue, comprise quelque part entre la science de l'aménagement du travail, de l'homme au travail, ou tout simplement du travail. En 1988, la Société d'ergonomie de langue française (SELF)¹ l'adopte comme une « mise en œuvre de connaissances scientifiques relatives à l'homme et nécessaire pour concevoir des outils, des machines et des dispositifs qui puissent être utilisés par le plus grand nombre

1. La SELF a été créée en 1963 par neuf membres fondateurs qui représentaient les principales disciplines et groupes des personnes alors actifs au sein des sciences appliquées au travail humain (cf. www.ergonomie-self.org).

avec le maximum de confort, de sécurité et d'efficacité ». Cependant, une définition plus complète incluant à la fois sa forme et son rôle apparaît dans l'ouvrage de A. Laville (1976) : « L'ergonomie est une discipline scientifique qui étudie le fonctionnement de l'homme en activité professionnelle ; elle est une technologie qui rassemble et organise les connaissances de manière à les rendre utilisables pour la conception des moyens de travail ; elle est un art lorsqu'il s'agit d'appliquer ces connaissances pour la transformation d'une réalité existante ou pour la conception d'une réalité future. Ses critères d'application sont du domaine de la protection de la santé physique, morale, psychique et sociale des travailleurs, du domaine du développement de leurs capacités professionnelles au cours de leur vie active, dans le cadre d'objectifs de production ». C'est donc un vaste programme, que l'on peut rapprocher de celui de l'aménagement du territoire, les deux étant plus ou moins définis dans la même brume².

5.1.1 Une technique empirique de conception

L'ergonomie est née de la complexification du monde du travail, qu'elle traite à la fois sous des aspects techniques, physiologiques et psychologiques. À l'heure actuelle, elle ne s'intéresse plus que peu à l'outil, et se consacre essentiellement à l'analyse des systèmes sociotechniques complexes et des machines, ces dernières correspondant ici aux *machines artificielles* définies dans le point précédent (§ 4.2.1, p. 88). De ce fait, l'ergonomie apparaît comme une technique horizontale (et non verticale), dans le sens où elle plonge ses racines dans de nombreuses sciences et techniques existantes (Figure 5.1) : la psychologie d'abord, mais également la physiologie, la médecine, l'ingénierie et les sciences cognitives, voire depuis peu les cindyniques³, etc., qui lui apportent des connaissances fondamentales, et qui effacent parfois le caractère proprement ergonomique des études menées en s'en appropriant la paternité⁴. Sa caractéristique principale apparaît alors comme l'exploitation coordonnée de connaissances variées pour la résolution de problèmes pratiques. Ainsi, le développement d'un savoir-faire largement axé sur la méthodologie lui permet aujourd'hui à la fois de redéfinir son autonomie, et de dépasser son simple intérêt pour l'outil afin de généraliser son objet à n'importe quel système utilisé par l'homme⁵. C'est dans ce contexte que H. W. Hendrick (1996) définit l'ergonomie (*discipline of human factors*) comme « le développement et l'application de techniques d'interfaces homme-système » et, à ce titre, comme une discipline à part entière (*stand-alone discipline*). On y comprend bien que l'étude de l'homme au travail n'est pas strictement anthropocentrée, mais qu'elle se focalise sur les liaisons entre l'homme et les éléments qu'il utilise pour travailler. Il convient néanmoins de considérer avec plus de précisions la place qu'il y tient, afin de distinguer des expressions sou-

2. En effet, dans le long chapitre que P. Merlin (2002) consacre à la définition de l'aménagement du territoire, il indique que ce dernier n'est ni un art, ni une technique, ni une science, mais doit être considéré comme une *pratique* qui emprunte à chacun de ces domaines. Interdisciplinaire par essence, l'aménagement du territoire trouve ici un point commun avec l'ergonomie qui se positionne elle aussi comme une sorte de discipline « carrefour ».

3. Les cindyniques (du grec *kindunos*, le danger) sont les sciences du danger ; cf. [Kerven G.Y., Rubise P., 1991, *L'archipel des dangers*, Economica, 460 p.].

4. Le titre de l'ouvrage de J. Scherrer (1967) est révélateur à ce propos : le premier titre est *Physiologie du travail*. Le terme *Ergonomie* n'apparaît qu'au second plan et entre parenthèses.

5. L'ergonomie a d'ailleurs pris un nouvel intérêt avec le développement récent des outils informatiques qui en ont requis les principes, d'abord pour réfléchir aux postures de travail et à l'adaptation du matériel (*hardware*), puis pour s'intéresser à la conception de logiciels (*software*), et aujourd'hui à la conception de sites web et de jeux vidéo. Cette dernière application, populaire mais souvent éloignée des concepts et des méthodes qui l'ont fait naître, vaut à l'ergonomie d'être associée à l'idée de « jouabilité » dans le dictionnaire du jargon français (jargon.org).

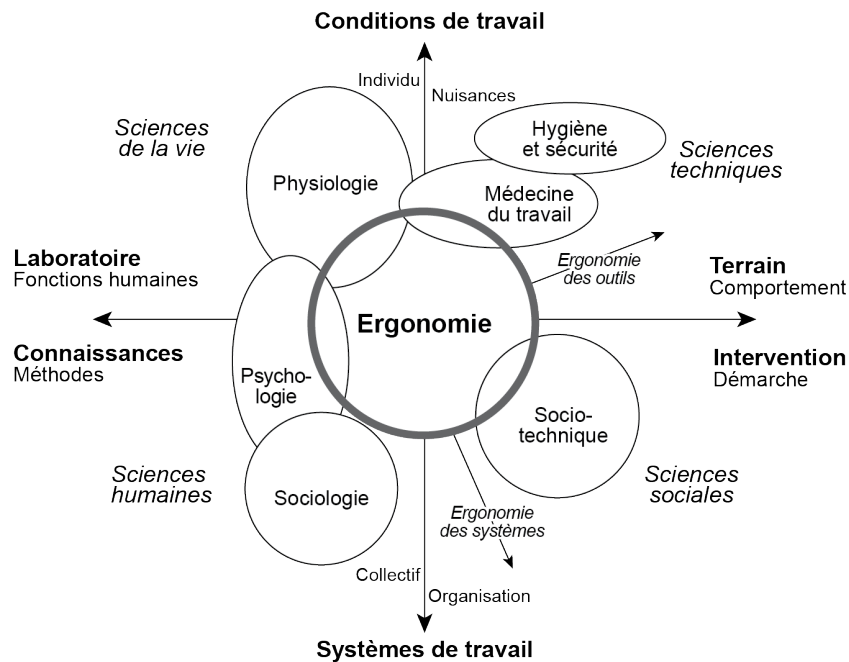


Figure 5.1 – L’ergonomie, horizontale et pluridisciplinaire

Au croisement de disciplines diverses, entre la méthodologie et la connaissance scientifiques et l’étude concrète (monographique) du terrain, l’ergonomie peut être définie comme technique visant à améliorer le fonctionnement des Systèmes hommes-machines dans le double but d’augmenter leur efficacité et de réduire leurs nuisances (Source de l’image : F. Hubault (in Cazamian *et al.*, 1992)).

vent confondues comme des synonymes : interface homme(s)-système (H.W. Hendrick), interface homme(s)-machine(s) (M. Noulain), système homme(s)-machine(s) (M. de Montmollin). Autant de nuances qu’il convient d’identifier.

Parler d’Interface homme(s)-système (IHS) revient à considérer que l’homme ne fait pas partie du système, et qu’a *fortiori* c’est uniquement la machine (entendue au sens large) qui forme ce dernier. Or, dans la mesure où il intervient au moins à son entrée et à sa sortie, l’homme ne peut véritablement s’en exclure. De ce fait, c’est justement sur l’interaction des hommes et des machines au sein d’un même système que l’intérêt de l’ergonomie doit être porté (Montmollin, 1967). Parler d’Interface homme(s)-machine(s) (IHM) revient alors bien à considérer ces interactions en les assimilant à une interface. Mais une interface apparaît par définition comme une « limite commune à deux systèmes, permettant des échanges entre ceux-ci », voire comme une « frontière conventionnelle entre deux systèmes ou deux unités, permettant des échanges d’informations » (Larousse). Dans les deux cas, il s’agit donc d’étudier deux systèmes juxtaposés qui communiquent, le premier centré sur l’homme et le second sur la machine. Ainsi, on préférera parler de Système homme(s)-machine(s) (SHM) pour traduire l’intérêt porté au système de travail composé simultanément de l’homme et de la machine : « Quand on étudie le Système homme + machine automatique, on doit se garder de glisser sur une de ces deux positions idéologiques qui s’opposent l’une à l’autre, mais sont l’une et l’autre également erronées : la position de l’anthropomorphisme, qui s’exprime dans des tentatives pour copier d’une façon non critique et non rationnelle les fonctions psychophysiologiques de l’homme [...] ; la position du

mécanisme, qui méconnaît les particularités spécifiques du fonctionnement de l'organisme vivant, et de l'homme en particulier, et manifeste une tendance à considérer l'opérateur [...] comme un mécanisme inanimé » (Leontiev *et al.*, 1961). Cette conception du système tend à éliminer du champ ergonomique certaines méthodes de la psychologie qui ne s'intéressent qu'aux aptitudes de l'homme indépendamment de ses rapports avec la machine, et la quasi-totalité des méthodes de l'*engineering*, qui étudient la machine sans tenir compte de l'opérateur qui l'utilise. Car justement, comme le précise D. Ochanine (1962), « l'aspect vraiment spécifique [de l'ergonomie], c'est un rapprochement extrême des fonctions de l'homme et de la machine, leur enchevêtrement le plus étroit dans un tout fonctionnel. Et c'est ce fait qui nous amène à parler du Système homme + machine ».

Ces considérations conduisent à proposer une définition de l'ergonomie que nous construisons à partir des critères qui nous semblent les plus utiles : l'ergonomie est une technique appuyée sur tous les champs disciplinaires nécessaires, visant, après analyse du travail, à améliorer le fonctionnement des systèmes hommes-machines dans le double but d'augmenter leur efficacité en terme de productivité et de faciliter leur utilisation, c'est-à-dire de réduire les nuisances portées aux utilisateurs. Ainsi, l'ergonomie a pour but de tendre vers la meilleure adéquation possible entre un opérateur (homme) et son poste de travail. Mais cette qualité, qui détermine la facilité d'utilisation des systèmes produits et qui se traduit en termes d'efficacité pour l'homme et de rentabilité pour la machine, apparaît toujours particulière à chaque système, et les quelques standards existant ne suffisent pas à généraliser des solutions, ce qui explique l'une des difficultés de l'ergonomie à se définir sur la base d'un *corpus* épistémologique et méthodologique universel ou unanime.

Dans tous les cas, l'ergonomie conserve un caractère appliqué qui la distingue d'une éventuelle *ergologie* (étude du travail) puisqu'elle vise non seulement l'étude, mais surtout le perfectionnement ou l'optimisation concrète des interfaces homme-système. Le problème soulevé par J. Leplat (1995) consiste alors à définir la nature et les limites des systèmes à prendre en compte. Cette nature est à l'origine, par exemple, de la distinction entre une *ergonomie du produit* et une *ergonomie du milieu* (ou de la production), les deux utilisant des principes voisins, mais travaillant sur des objets différents. L'exemple le plus connu est celui du tracteur agricole, dont la conception ergonomique peut avoir été effectuée pour l'utilisateur (l'agriculteur) ou le constructeur (l'ouvrier sur la chaîne de production)⁶. Ainsi se dégage une ergonomie des composantes (centrée sur l'étude de parties de dispositifs techniques, d'indicateurs, de commandes, etc.) et une ergonomie du poste de travail (centrée sur l'utilisation du produit fini). Outre la nature, c'est aussi l'échelle et la complexité de chacun de ces systèmes qui varie.

Dans la majorité de ses travaux, l'ergonomie apporte ainsi des solutions concrètes par une réorganisation, finalement assez simple, des objets impliqués dans le problème à traiter. **Cette réorganisation passe presque systématiquement par une nouvelle conception de l'espace de ces objets, c'est-à-dire de leur forme, de leur taille, et de leurs distances respectives. Par essence, la démarche proposée par l'ergonomie apparaît donc spatialisée.** Peut-on pour autant la considérer, comme la géographie, comme une discipline spatiale ? Certes, l'espace physique des machines n'est pas l'espace anthropique de la géographie et ne peut

6. Si l'on rapporte cet exemple au cas de l'urbanisme, il oppose également deux visions de la construction urbaine : celle de ses concepteurs (les architectes) et celle de ses usagers (les habitants), soit deux positions qui ne s'accordent pas toujours dans la pratique, comme le souligne P. Tétriac (2001) de manière plutôt provocatrice.

s'y associer ni dans ses représentations concrètes, ni dans les problématiques qui le définissent ⁷. Néanmoins, l'ergonomie et la géographie ont ceci en commun qu'elle utilisent toutes les deux, par exemple, les notions de distance et d'accessibilité. Sur le plan physiologique comme sur le plan psychologique, nombreux sont les cas dans lesquels un nouveau dessin (*design*), replaçant les objets dans un espace tridimensionnel, a permis d'orienter l'efficacité des machines et des processus de production, en préservant la santé et l'efficacité de leur utilisateur. Pour tenter d'illustrer ces parallèles, considérons deux champs d'études : (1) les ambiances (ergonomie) et les paysages (géographie), (2) les nuisances (ergonomie) et les risques (géographie) :

L'exemple des ambiances et des paysages

Mises à part les questions d'échelle, l'ambiance des ergonomes présente de grandes similitude avec la définition du paysage telle qu'elle est développée par certains géographes (Rougerie, 1991 ; Brossard et Wieber, 2008 ; etc.). En effet, suivant la distinction que proposent G. Bertrand et O. Dollfus (1973) par exemple, au-delà du paysage étudié pour lui-même dans un cadre presque exclusivement écologique, le concept de paysage voudrait recouvrir un « espace subjectif, senti et vécu », que partagent aussi bien les architectes, les psychologues, les sociologues, les géographes, etc. Il rejoint alors le champ des recherches sur la perception de l'espace, et notamment de l'espace urbain, qui ont donné naissance à des disciplines aussi diverses (mais néanmoins très proches) que la psychologie de l'environnement (*environmental psychology*), l'écologie humaine ou la perception de l'environnement, dont les théories et les résultats sont publiés indifféremment par des écologues, des économistes, des géographes, des urbanistes, des architectes, des psychologues, des sociologues, des juristes, des médecins, etc. Cet ensemble est à rapprocher de la notion d'ambiance en ergonomie, qui étudie l'environnement qu'un individu perçoit par ses cinq sens quand il est au travail, et dont il s'agit d'évaluer dans quelle mesure il peut apparaître à l'origine de perturbations psychologiques. La réduction de ces perturbations et la mise en place d'un espace paysager confortable constituent en elles-mêmes un objectif de l'ergonomie.

L'exemple des nuisances et des risques

Dans sa dimension physiologique, l'ergonomie s'attache à la résolution de problèmes liés aux nuisances induites par les postes de travail, c'est-à-dire aux atteintes possiblement nuisibles faites aux organismes humains en action de travail. Dans sa définition générale, une nuisance peut s'entendre comme l'ensemble des facteurs d'origine technique (bruit, dégradation, pollution, etc.) ou sociale (encombrement, promiscuité, etc.) qui nuisent à la qualité de la vie. Dans la majorité des cas, les préceptes adoptés pour limiter les possibilités de nuisances font suite à des analyses d'accidents parfois graves et rejoignent dans ce sens un certain nombre de travaux menés par des géographes sur les risques, ces derniers étant généralement définis comme la probabilité de manifestation d'un danger plus ou moins prévisible, sous la forme d'un phénomène nuisible et dommageable à l'homme et son environnement, dans une aire non précisément définie et d'une durée indéterminée. En géographie, la problématique des risques repose généralement sur les notions de distance et de densité : pour faire face aux nuisances et dangers liés aux activités industrielles, une solution simple a été avancée : l'*éloignement* des activités dangereuses par rapport aux autres activités et spécialement par rapport aux autres habitations. Le point de vue de l'ergonomie, nous le verrons (§ 5.2.1) est globalement similaire, à ceci près que dans le contexte d'un Système homme(s)-machine(s) plus ou moins bien délimité, il est généralement possible d'agir directement sur les éléments techniques à l'origine des risques potentiels.

Ces deux exemples témoignent de similitudes thématiques et méthodologiques évidentes entre

7. Nous reviendrons largement sur ce point dans la conclusion de ce chapitre parce qu'il est fondamental, mais également fortement limitant pour la proposition de transfert « ergonomie ↔ géographie » que nous tentons de construire ici.

l'ergonomie et la géographie, qu'il s'agisse des définitions qu'elles emploient ou des objets qu'elles analysent (ambiances, paysages, nuisances, risques, etc.). Pour dépasser leur dimension analogique et illustrative, il est nécessaire d'étudier plus précisément dans quelle mesure l'approche ergonomique peut constituer un apport pour l'analyse de la ville et plus généralement des espaces urbains, analyse qui peut conduire à une lecture conceptuelle originale de leur géographie et de leur aménagement. Pour ce faire, il apparaît préalablement indispensable de voir si, d'un point de vue théorique, la ville peut être considérée comme un Système homme(s)-machine(s).

5.1.2 La ville : un système hommes-machines

La ville peut-elle être considérée comme un Système homme(s)-machine(s), tel que nous l'avons défini précédemment (p. 99). Si l'on entend le travail qu'elle génère au sens large, c'est-à-dire simultanément comme un ensemble successif de tâches aliénées et auto-régulées (cf. § 4.1), on peut admettre que les activités prenant place en milieu urbain sont toutes des activités de travail : elles impliquent l'interaction de plusieurs individus, eux-même liés à un travail aliéné ou auto-régulé (Chapitre 5). Cette idée apparaît confortée par la notion de *spécialisation*⁸, assez clairement définie par les économistes et les géographes qui étudient la composition des espaces urbains. Grâce aux économies d'agglomération qui découlent de cette spécialisation, la ville offre une possibilité de maximiser les interactions entre divers éléments issus de la coalescence urbaine, qui relie de façon interactive la ville à son site et à sa situation, ainsi qu'aux acteurs qui exploitent directement ou indirectement ce site et cette situation. Considérée sous cet angle, la ville peut alors être appréhendée comme un « bloc de facteurs productifs » (Remy, 1966) avant tout. Une autre idée, émise par W. Thompson (1965) va dans le même sens : il propose de voir la ville comme une source d'externalités produites par la juxtaposition en un point privilégié de l'espace occupé par plusieurs unités de production et de consommation. Ces externalités se font au profit des deux parties : (i) des firmes productives dont elles assurent l'économie matérielle (en rassemblant les infrastructures nécessaires à leur fonctionnement) et l'économie immatérielle (en leur apportant l'information indispensable à l'innovation et à la recherche des moindres coûts) ; (ii) des consommateurs (en leur permettant de disposer de biens et de services indivisibles). Ainsi, si l'on schématise le fonctionnement d'une entreprise de manière systémique comme le proposent F. Guérin *et al.* (1997), il devient possible de considérer l'ensemble (du moins la majorité) des entrées et des sorties urbaines dans l'optique productive du travail, telle qu'elle existe dans le monde de l'entreprise.

Pour autant, peut-on pousser plus loin l'analogie et proposer de comparer la ville à une entreprise en admettant que son fonctionnement s'identifie à une succession de tâches et de travaux similaires, répartis dans différents postes de travail liés et complémentaires ? C'est aussi la question que pose R. Gendarme : « La ville est devenue une catégorie économique fondamentale ; pourquoi ne pas la camper par rapport à l'entreprise par exemple ? Ne possède-t-elle pas ses coûts, son optimum, ses investissements ? »⁹. De ceci découle que la ville, bâtie comme un outil

8. Rappelons que la spécialisation peut être définie comme le « développement d'une certaine homogénéité dans une ville ou un quartier, mesurée par ses activités économiques, ses commerces, ses services [etc.] Afin de maximiser les économies d'agglomérations, les activités similaires ont souvent besoin de se regrouper dans un certain rayon de proximité. Ces regroupements, qui permettent une meilleure division du travail, contribuent alors à 'spécialiser' certaines villes, dont la majorité des activités se tourne vers un secteur, une filière, ou un niveau de fonction dominant » (Antoni, 2009).

9. La citation est extraite de la préface de l'ouvrage suivant : [Guyot F., 1968, *Essai d'économie urbaine*,

pour satisfaire les besoins humains, peut également s'assimiler à une sorte de machine, et plus avant, à un Système homme(s)-machine(s).

Ainsi, si l'on tente de considérer la ville par rapport au travail et de réfléchir par rapport à lui, aliéné ou autorégulé, il peut être intéressant de prendre en considération les notions élaborées par l'ergonomie, notamment pour l'étude des Systèmes homme-machine (SHM). Pour ce faire, nous partons du principe que la ville est un outil produit par l'homme pour être utilisé par lui (dans des relations à double sens), et nous posons l'hypothèse que le système hommes-ville peut effectivement correspondre à un Système homme(s)-machine(s), avec son interface particulière. Dans cette optique, il faut encore noter, comme le fait M. de Montmollin (1967), que deux types de SHM peuvent être distingués. On trouve d'une part le Système homme-machine (au singulier) et d'autre part, le système hommes-machines (au pluriel). Alors que le premier correspond simplement à un poste de travail, c'est-à-dire à un homme + une machine, le second s'entend comme un « système au sens riche du terme, un ensemble interagissant de plusieurs éléments humains et non-humains »¹⁰, qui peut se définir comme une « organisation dont les composantes sont des hommes et des machines, reliés par un réseau de communication et travaillant ensemble pour atteindre un but commun » (Kennedy, 1962)¹¹, « compte tenu des contraintes d'un environnement donné » (Spérandio, 1984). Les géographes n'ont probablement que peu de mal à reconnaître dans cette seconde définition l'approche systémique (Forrester, 1969; De Rosnay, 1975) par l'intermédiaire de laquelle ils tentent aujourd'hui de définir, de caractériser et de comprendre les espaces urbains et leur fonctionnement. Pour compléter cette comparaison et comprendre ce qu'elle peut apporter à l'aménagement des villes, il est nécessaire de développer la manière avec laquelle les ergonomes étudient les relations entre l'homme et les machines.

Pour rester général et concis, on pourrait dire que l'ergonomie part généralement du principe que les relations hommes-machines ne sont jamais parfaites : à l'intérieur du système, il existe presque toujours un écart entre ce qui est à faire pour atteindre un objectif (tâche prescrite) et ce qui est réellement fait par l'opérateur pour l'atteindre (tâche réelle, que l'on appelle également « activité »). Pour les ergonomes, ces écarts correspondent à l'*effort d'adaptation* et de gestion auquel l'opérateur doit faire face ; ils sont dus à une série de contraintes et de problèmes qu'il rencontre en accomplissant la tâche prescrite. De notre point de vue, **cet effort d'adaptation présente un intérêt fondamental qui doit être considéré dans le cadre des considérations présentées plus haut. En effet, si l'on considère, comme nous l'avons fait, que l'homme occupe un milieu écologique qui lui est hostile au départ en construisant son propre biotope (en l'occurrence la ville), il semble qu'il lui soit par la suite nécessaire de s'adapter lui-même aux artéfacts qui constituent ce milieu et qui, pour la majorité d'entre eux, s'associent à des prothèses techniques dont l'usage nécessite à la fois un apprentissage et une stratégie. En d'autres termes, l'homme a adapté le milieu à ses besoins et s'adapte ensuite aux modifications qu'il a mis en place pour ce faire, ce qui implique une modification de son fonctionnement social, voire**

Librairie générale de droit et de jurisprudence, Paris.].

10. On peut préciser que les systèmes simples peuvent s'analyser au sein d'un modèle stimulus-organisme-réponse (SOR), alors que les systèmes complexes privilégient un modèle stimulus-réponse (SR). L'organisme humain, dans ses caractéristiques physiologiques, intervient donc beaucoup moins dans les Systèmes hommes-machines (au pluriel) : les intuitions et les réflexes sont en quelque sorte commandés par une réflexion culturellement orientée et nécessitent, nous le verrons, la mise en place de stratégies d'action.

11. Référence introuvable.

de sa culture, les deux étant contraints de se calquer au moins en partie sur le fonctionnement de la machine urbaine. D'un point de vue théorique, nous sommes donc face à un processus rétroactif : le *principe de double adaptation*. Si la première adaptation a été largement développée dans les Chapitres 1 et 2, la seconde relève en grande partie de l'ergonomie et mérite d'être étudiée plus en détail ici.

Les contraintes et les problèmes que pose l'adaptation de l'homme à la machine traduisent donc des dysfonctionnements, et permettent de considérer les relations entre l'homme et la machine soit au sein d'un « système ouvert » dans lequel l'homme exécute une tâche en utilisant la machine, soit au sein d'un « système fermé » dans lequel l'opérateur tient compte en plus de l'action en retour (rétroaction) de la machine. Ces deux conceptions s'expriment souvent de façon complexe selon des configurations qui ont donné naissance, entre autres, au modèle de la théorie de la communications de C.E. Shannon et W. Weaver (1948) et au modèle de R.M. Gagné¹² (basé sur le fonctionnement de l'opérateur) ou encore à celui de H.P. Birmingham et F.V. Taylor (1954) qui les étudie à travers l'exemple du *tracking*¹³, etc. Mais, l'ensemble des ces modèles ne tiennent compte que des SHM au singulier, c'est-à-dire ses relations d'une seule homme avec une seule machine. Pour modéliser un SHM au pluriel, c'est-à-dire de plusieurs hommes en interaction avec plusieurs machines, on peut imaginer que celui-ci ne soit qu'une simple juxtaposition de plusieurs postes de travail. Trois types de relations sont possibles à l'intérieur d'un tel système : (i) les relations strictement techniques, qui lient les outils et les machines entre eux, si tant est qu'elles aient les moyens de le faire ; (ii) les relations homme-machine qui lient les machines et leur utilisateurs (humains) ; (iii) les relations homme-homme, dans lesquelles l'organisation sociale est omniprésente et se traduit par une hiérarchie au sein de laquelle se superposent des rôles, des fonctions et (au moins au sens social du terme) des formes de concurrence et de parasitage (cf. Chapitre 1).

D'évidence, face à une machine qui se complexifie, qui parfois se gère elle-même, et dont une partie du fonctionnement requiert l'action humaine, l'activité ou l'adaptation de l'opérateur peut prendre une forme qui dépasse son comportement rationnel, théoriquement induit par sa tâche prescrite : il s'organise, planifie son emploi du temps, privilégie des moments de forte activité ou de repos. Difficiles à analyser parce que difficiles à observer, ces stratégies face à la machine dépendent finalement d'une « situation qui suppose quelque chose comme une méta-connaissance, un savoir comprendre, une culture spécifique » (Montmollin, 1990). Ainsi, dans des systèmes à forte épaisseur sociale, les communications au sein et entre les équipes de travail qui partagent une tâche ou une série de tâches fonctionnent comme des vecteurs pour orienter ces stratégies, considérées comme des prises de positions ponctuelles face à un imprévu, fortement dépendantes des relations hiérarchiques, du pouvoir ou des convictions de chaque opérateur, qui renvoient au modèle SRK (*Skill, rules and knowledge*) de J. Rasmussen (1983)¹⁴. Le tout correspond donc bien à un système sociotechnique qui superpose deux sous-systèmes équivalents par leur

12. Cf. [Gagné R.M. et al., 1962, *Psychological principles in system development*, Holt Rinehart and Winston].

13. Les tâches de *tracking* correspondent aux tâches pour lesquelles la réponse motrice de l'opérateur doit en permanence s'adapter à un signal qui se modifie de façon continue (Montmollin, 1967). Il peut s'agir par exemple de la poursuite d'un spot lumineux sur un écran, ou, plus communément, de la conduite d'une automobile.

14. Le modèle de J. Rasmussen classe les erreurs en trois catégories, à des niveaux décroissants de familiarité avec la tâche ou avec l'environnement. Premièrement, ce sont les ratés et les lapsus (*skill based errors*), produits par la mise en défaut d'un automatisme. Deuxièmement, ce sont les fautes basées sur les règles (*rule based*), correspondant échec de la planification (le plan est inadéquat vis à vis des objectifs). Troisièmement, ce sont les fautes basées sur les connaissances déclaratives (*knowledge based*) : les erreurs sont alors dues à des connaissances incomplètes ou incorrectes.

importance : un système *technique* et un système *social*.

Pour illustrer ce propos (Figure 5.2), nous reprenons l'exemple donné par F. Guérin *et al.* (1997), qui montre l'organisation d'une entreprise (système sociotechnique), dans lequel l'implication sociale des tâches prescrites est fortement contre-balançée par les caractéristiques (elles aussi sociales) des utilisateurs et nous tentons de construire un parallèle avec la ville (autre système socio-technique). Ici, l'opérateur (A) répond à la société (B) et la ville (D) à l'entreprise (C). Entre ville et société, il existe alors une sorte de « contrat social » (cf. Chapitre 2) qui régule les activités professionnelles et les loisirs des individus par l'intermédiaire d'activités dites de travail. Par rétroaction ces activités participent d'un certain confort et d'une certaine qualité de vie, en même temps qu'elles peuvent générer des risques pour les habitants et une forme de ségrégation socio-spatiale. Si le parallèle semble fonctionner, c'est probablement parce que, de l'appareillage le plus simple (qui fait simplement intervenir un homme et son outil de travail) jusqu'au dispositif le plus complexe (dans lequel des groupes d'hommes et de machines communiquent par un échange complexe d'informations), tous les systèmes semblent pouvoir s'analyser à travers le prisme ergonomique : fondamentalement, le transfert se base presque uniquement sur un changement d'échelle. Ainsi, nous n'aurons que peu de mal à reconnaître dans la complexité d'organisation et de gestion de la ville un milieu technique (Chapitre 3), influençant et influencé par l'homme organisé en société (Chapitre 2), c'est-à-dire un système sociotechnique en tant que tel.

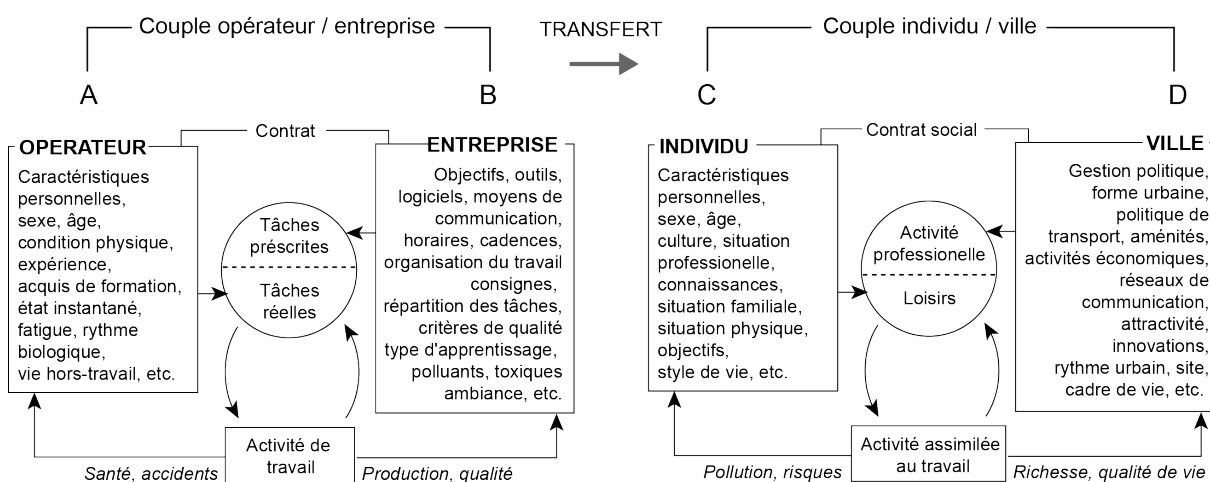


Figure 5.2 – Relations « opérateur-entreprise » et « homme-ville »

Cette figure propose un transfert des relations proposées par F. Guérin *et al.* (1997) pour le couple « opérateur-entreprise » au couple « société-ville ». Ces relations sont globalement les mêmes, mais ne s'observent pas à la même échelle, ne font pas intervenir les mêmes types de processus ni émerger les mêmes conséquences.

Si, de façon générale, il est possible de s'accorder sur l'option *ville = système socio-technique*, il apparaît beaucoup plus délicat de descendre d'un échelon pour tenter de reconnaître au sein du système les éléments qui le composent. Une telle opération reviendrait en effet à déterminer comment l'ensemble des activités et des fonctions présentes dans les villes correspondent à autant de postes de travail qui doivent être mis en relation pour que leurs interactions soient maximisées. M. Noulain (1992) écrit à ce sujet que « l'ergonomie montre que les connaissances générales sur le fonctionnement de l'homme sont nécessaires mais non suffisantes pour comprendre comment il agit dans une situation particulière. Il aborde l'activité de travail dans une approche systémique :

une situation de travail est un système dynamique, évolutif et ouvert dont les éléments ne peuvent être considérés indépendamment de leurs interactions ». L'ergonomie considère de la sorte qu'un poste de travail (quel qu'il soit) ne peut faire l'objet d'études ou d'améliorations sérieuses s'il est isolé de son environnement productif, ce que confirme également A. Laville (1976) : « la tâche attribuée à un opérateur et la manière dont il l'exécute sont dépendantes des autres tâches exécutées en amont ou en aval et des autres opérateurs avec lesquelles il est en relation directe lorsqu'il s'agit d'un travail en équipe, ou indirecte lorsqu'il reçoit ou fournit des parties de son travail à d'autres ». La considération systémique du cas d'étude implique son analyse en relativité par rapport à un groupe d'objets plus vaste, objets qui agissent en interaction. Cette analyse s'établit de fait dans le monde économique et cherche à maximiser l'efficacité des rapports entre autant d'acteurs complémentaires d'une même chaîne de production. La question n'en demeure pas moins de savoir ce qui, en ville, correspond réellement à un poste de travail. Certes, pour les industries, les zones d'activités ou les principales administrations, la question est plus ou moins triviale. Mais, pour les commerces, les lieux de culture (musées, théâtres, etc.), et surtout pour l'habitat, il convient d'apporter quelques précisions.

Parler de la ville en la comparant à un système sociotechnique construit comme un assemblage de postes de travail introduit en effet une certaine difficulté à y intégrer l'habitat, ce dernier n'étant pas directement lié à une fonction productive, même s'il occupe une place importante en proportion de l'occupation du sol urbain. Ainsi, quelle que soit la source que l'on choisisse ¹⁵, il est assez peu fréquent de voir figurer l'habitat comme un objectif direct de l'agglomération urbaine : il ne correspond pas à un « but » urbain en tant que tel, même si la ville a indéniablement comme « fonction » d'accueillir l'habitat de ceux qui y travaillent. De ce fait nous considérons l'habitat comme une activité annexe mais indispensable au travail, donc comme une fonction proprement urbaine. Pour illustrer cette idée, faisons une comparaison simple : la fonction d'une bicyclette n'est pas de s'asseoir dessus, mais de se déplacer avec ; il est néanmoins nécessaire de s'asseoir dessus pour se déplacer avec (mais on n'aurait pas l'idée de s'asseoir dessus pour une autre raison que se déplacer avec). En parallèle, l'agglomération urbaine participe à une minimisation généralisée des distances dans le but de réduire les efforts et d'augmenter le confort ; et compte tenu du principe des économies d'agglomération, il est nécessaire d'y habiter pour y minimiser les distances. Aussi, nous proposons de considérer de façon très schématique que l'habitat et les postes de travail sont indissociables, les premiers permettant le repos et la récréation (*re-crétation*) indispensables au fonctionnement des seconds (à l'instar d'une salle de repos dans une entreprise). Les relations entre les postes de travail sont alors des relations de travail, comme les relations entre postes de travail et habitat. Les relations entre zones d'habitats, quant à elles, ne concernent pas directement le travail, mais participent au fonctionnement de la ville en tant que *tout* social. On retrouve ici, à peu de choses près, les trois catégories de relations identifiées plus haut (cf. p. 104) : des relations techniques entre les postes de travail (c'est-à-dire entre les entreprises, caractérisées par le fret et le transport de marchandises), les relations entre les habitants et les postes de travail (caractérisées par les migrations domicile-travail dont on connaît aujourd'hui les conséquences sur l'efficacité et la durabilité des systèmes urbains ; cf. Chapitre 3) et les relations hommes-hommes (constituantes des réseaux sociaux et des activités

15. On pourra feuilleter à ce sujet l'énumération de G. Chabot et J. Beaujeu-Garnier (1964), au chapitre '*Comment naissent les villes ?*', même si ce dernier liste toute une série de fonctions urbaines sans réellement expliquer ni pourquoi, ni comment les villes naissent : siège politique et administratif, site de défense et de protection, maille de conquête et d'assise territoriale, lieu d'économie et d'innovation, etc. La fait d'habiter au sein de la ville constitue un corollaire obligatoire à ces fonctions.

de loisirs possibles au sein des aires urbaines).

Nous avons donc proposé un point de vue, celui que la ville peut être considérée comme un Système hommes-machines, au même titre que de nombreux autres systèmes de production mobilisant la notion de travail, contraint et/ou auto-régulé. Selon ce point de vue, la ville semble pouvoir entrer dans le champ d'étude de l'ergonomie, et ses méthodes pouvoir contribuer à une réflexion sur son aménagement, c'est-à-dire sur sa géographie ou son urbanisme. Théoriquement, il existe donc un chevauchement possible entre ergonomie et géographie (ou l'urbanisme ou l'aménagement du territoire). Ce chevauchement n'apparaît pas conflictuel *a priori* car il n'y a pas, selon nous, de divergence immédiate entre les points de vue quant à l'objet à aménager pour qu'il soit plus efficace et moins contraignant pour ses utilisateurs. Au contraire, les deux approches présentent de nombreuses similarités méthodologiques qui invitent à réfléchir à la construction d'un transfert conceptuel de l'ergonomie vers la géographie, et inversement (géographie ↔ ergonomie).

5.2 Vers un transfert conceptuel

D'après M. de Montmollin (1967), il existe deux grandes familles de modèles pour manipuler les Systèmes hommes-machines (SHM). La première correspond à un catalogue (*check-list*) des fonctions présentes dans le système, fonctions qui peuvent correspondre soit au SHM en tant que système, soit aux tâches humaines à l'intérieur du SHM. La définition et la représentation de cette catégorie de modèles nécessite évidemment que les fonctions des hommes et des machines soient connues. Or, dans le cas de systèmes sociotechniques complexes (auxquels la ville pourrait correspondre), il est difficile de créer un catalogue dans la mesure où les éléments ne répondent pas à une fonction unique, mais sont utilisés de façon plus ou moins ordonnée pour répondre à des fonctions multiples (cf. les stratégies évoquées § 5.1.2, p. 104). Ainsi, nous nous attachons essentiellement à la deuxième famille de modèles, qui tient compte exclusivement des liaisons entre les éléments du système. L'analyse de ces liaisons (*link analysis*) peut d'abord se faire dans un cadre spatial, puis dans un cadre séquentiel, pour produire un modèle spatio-temporel reproduisant le fonctionnement du SHM. Elle conduit à une sorte de géo-graphie (inscription dans l'espace terrestre) utile à l'aménagement des postes de travail.

5.2.1 Une géographie pour aménager les postes de travail

L'analyse des liaisons (*link analysis*) consiste généralement à représenter graphiquement les liaisons établies par un opérateur entre les entrées et les sorties qu'il manipule. L'étude de l'utilisation d'un tableau de bord par un opérateur humain en constitue un exemple relativement simple : il s'agit de mesurer les fréquences de passage visuel d'un élément à l'autre du tableau, c'est-à-dire d'identifier ce que l'opérateur regarde sur le tableau de bord en cartographiant la manière avec laquelle son oeil s'y déplace : les passages visuels correspondent alors aux liaisons ; la fréquence de ces liaisons peut être graphiquement rapportée à leur position dans l'espace ; le schéma permet alors de modifier ces positions, en créant éventuellement des groupes d'objets de façon à minimiser les distances des éléments fréquemment liés. Inspirée des travaux de E.F. Lind-

quist¹⁶, cette technique est utile pour définir des sous-ensembles en fonction de leur proximité en tenant compte du nombre de liaisons internes au sous-système/nombre de liaisons externes (plus ce rapport est élevé, plus le groupement est efficace). Dans le même ordre d'idée, un exemple d'une autre échelle, mais fonctionnant sur un principe identique, est donné par M. de Montmolin (1967). Il s'agit cette fois d'étudier l'organisation d'un SHM composé de plusieurs individus et de plusieurs machines en considérant les déplacements de ces individus vers les différentes machines qu'ils utilisent pour réaliser les tâches qui leur sont prescrites. L'analyse des liaisons y est quantifiée par le nombre de flux homme-homme, homme-machine ou machine-machine, avec pour objectif de « chercher une nouvelle disposition du SHM, de telle sorte que les éléments qui échangent des informations soient rapprochés les uns des autres ». C'est donc véritablement un *travail sur l'espace* (ici une considération des proximités liée au fonctionnement de l'ensemble) qui permet de transformer la configuration d'origine (système avant étude) en une configuration optimisée et *a fortiori* plus efficace (système après étude).

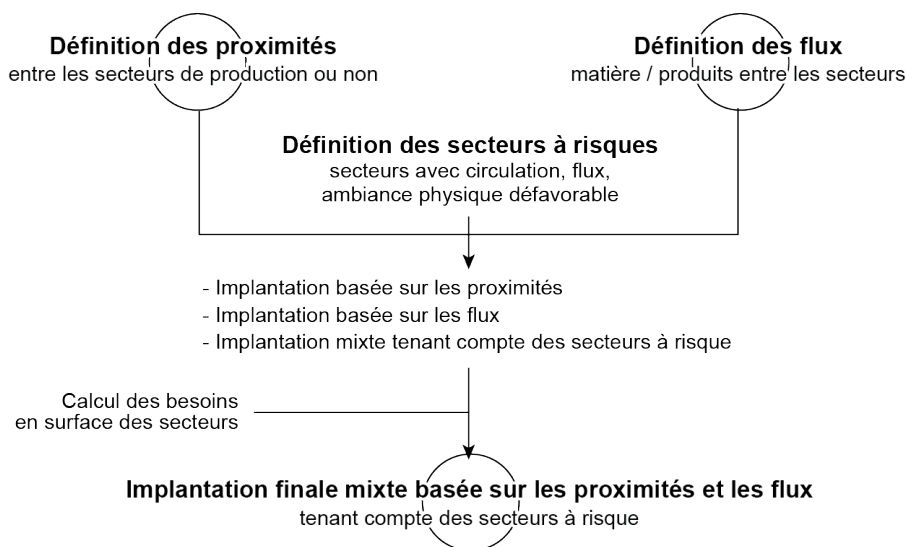
Poursuivant un objectif globalement identique, une méthode à peu près similaire est proposée par L'institut national de recherche et de sécurité (INRS)¹⁷. Il s'agit de la méthode dite « des liaisons fonctionnelles (proximité) entre les secteurs », développée pour optimiser l'implantation des postes de travail les uns par rapport aux autres dans les établissements industriels. Son principe général est présenté dans la Figure 5.3. On cherche ici à définir les emplacements de services et d'ateliers (parfois regroupés en secteurs) de façon à minimiser les distances parcourues par les matériaux, les véhicules et les engins de manutention ou le personnel, tout en facilitant les liaisons fonctionnelles entre chacun de ces éléments. Pour ce faire, la méthode préconise l'optimisation de quatre critères, afin de rapprocher les secteurs qui ont le plus de relations entre eux (flux de matières et de produits, déplacements des personnes, échanges d'informations, etc.) :

1. La minimisation des distances parcourues par les matériaux par une intervention sur la localisation des services et/ou des ateliers ;
2. La facilitation de la communication (échanges d'informations) entre les individus qui sont amenés à travailler ensemble ;
3. La réduction des risques d'accidents liés à la circulation des matériaux, des véhicules et des engins de manutention (évitement des croisements et des retours en arrière, simplification et visibilité accrue des flux) ;
4. La minimisation du risque de maladies contractées dans des ambiances physiques défavorables, par une implantation raisonnée par rapport aux sources de nuisances sonores ou aux risques de pollution chimique.

À partir de ces critères, un tableau peut être construit pour synthétiser les liaisons théoriques entre les différents espaces selon une graduation en sept niveaux (codés de A à G) allant de la *proximité absolument nécessaire* à l'*éloignement absolument nécessaire* (Figure 5.4) et, à partir de ce tableau, tous les ateliers et/ou services peuvent être qualifiés par ordre d'importance

16. Professeur d'éducation, E.F Lindquist (1901-1978) est l'inventeur de l'*Iowa test of basic skills* en 1929. Dans le cadre du développement rapide de ce genre de tests aux États-Unis, il contribue à la mise au point du premier *OMR system* (marquage optique lisible par une machine) pour IBM dans les années 1960.

17. Créé en 1947, l'INRS est une association gérée par des représentants d'employeurs et des salariés : « Organisme généraliste en santé et sécurité au travail, l'INRS intervient en lien avec les autres acteurs institutionnels de la prévention des risques professionnels. Il propose des outils et des services aux entreprises et aux 18 millions de salariés relevant du régime général de la Sécurité sociale » ; www.inrs.fr.

**Figure 5.3 – Étape 1/3 : le problème**

Sur ce schéma conceptuel, l'implantation des secteurs de travail et la localisation des secteurs à risques sont essentiellement fondées sur leurs distances respectives, (évaluées en termes de proximités) et leurs besoins en surface (Source : INRS).

décroissante des proximités les uns par rapport aux autres : les liaisons de type A (absolument nécessaire), puis de type B (spécialement importante), et ainsi de suite jusqu'à G. Cette qualification permet alors de déterminer la position relative des ateliers et des services (les uns par rapport aux autres) afin qu'elle satisfasse au mieux les nécessités de proximité ou d'éloignement. Entre proximité et éloignement, c'est bien la notion de distance qui permet au départ une réflexion sur le positionnement dans l'espace des éléments du système. *In fine*, cette méthode d'aménagement des postes de travail doit permettre de positionner les secteurs sur une structure spatiale théorique en nid d'abeille. Elle se fonde alors sur une minimisation de la somme des distances parcourues par les matières.

Ce positionnement suppose bien sûr que l'on connaisse précisément les volumes transportés ou le nombre de déplacements entre les secteurs, ce qui se calcule, dans le monde industriel, à partir du plan de production, des gammes de fabrication et des moyens de manutention. Néanmoins, à ce stade de l'étude des localisations relatives, la méthode ne tient pas compte de la taille des éléments qu'elle cherche à positionner : elle ne donne que des positions relatives optimales des secteurs les uns par rapport aux autres, selon le critère des proximités ou des flux de matière. Dans une dernière étape, il s'agit alors d'intégrer les besoins en surface aux besoins en proximité, besoins qui peuvent être évalués en fonction du nombre de postes de travail, de la taille des équipements et de l'effectif humain amené à travailler sur le site. À partir de ces résultats, plusieurs scénarios peuvent être mis au point pour intégrer les surfaces et les volumes. Les résultats obtenus, dont la Figure 5.5 montre un exemple, constituent autant de scénarios d'implantation finale que l'on pourra confronter entre eux avant de prendre une décision quant à l'aménagement à réaliser.

Techniquement, ce type de méthodes d'aménagement des postes de travail et des sites industriels trouve désormais un appui logiciel sur une série complète de produits commerciaux : les logiciels *Genimat* ou *Factory Plan* permettent par exemple d'implémenter et de simuler informatiquement des scénarios d'implantation pour les locaux industriels. Ils apparaissent comme autant

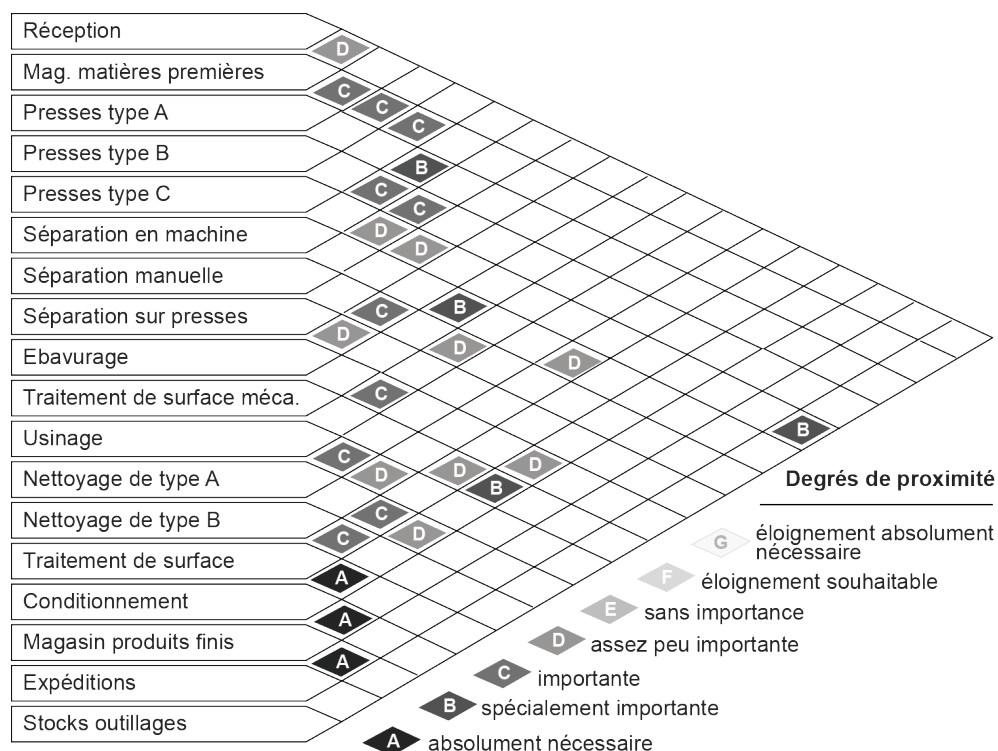


Figure 5.4 – Étape 2/3 : la solution théorique

À partir des relations qu'ils sont censés entretenir les uns avec les autres, la distance relative des secteurs est hiérarchisée entre une *proximité* et un *éloignement* absolument nécessaires en sept catégories (de A à G) (Source : INRS).

d'outils d'aide à la décision en lien avec les *process* de fabrication et le facteur humain associé. Dans le même registre, la société IncontrolSIM¹⁸ propose également une série de solutions d'aménagement et de simulation du fonctionnement de sites industriels, adaptées à des espaces dont les échelles varient : les systèmes de production (de la ligne de production automatisée aux opérations de gros volume), les chaînes logistiques (de l'entrepôt *high-speed cross-docking* au matériel de manutention automatisé), les complexes portuaires (des voies navigables au terminal de stockage des conteneurs), les complexes aéroportuaires (de la gestion des flux aériens (avions sur les pistes) à celui des bagages), la gestion de foule (des flux de personnes à la sécurité des piétons dans leur environnement), le transport public ferroviaire (de la gestion du système de transport général au détail du réseau ferré), etc.

Ainsi, l'ergonomie n'offre pas uniquement des pistes de réflexion pour l'amélioration des conditions de l'homme au travail ; elle apporte également des solutions pratiques pour l'aménagement, qui passent d'une part par la modélisation informatique, et d'autre part par la simulation de scénarios, de manière à fournir des éléments d'aide à la décision. Parfois utilisés à grande échelle (système de transport public par exemple), ces outils sont évidemment très proches des modèles de simulation qu'utilisent les géographes pour

18. Cette société développe entre autres la série de logiciels *Enterprise Dynamics*, que nous présentons par son descriptif commercial : « Enterprise Dynamics is a leading simulation software platform for business modeling ; quick and easy. With Enterprise Dynamics you can analyze and optimize the current and future behavior of your system or infrastructure. Don't speculate... Simulate! » ; www.incontrolsim.com.

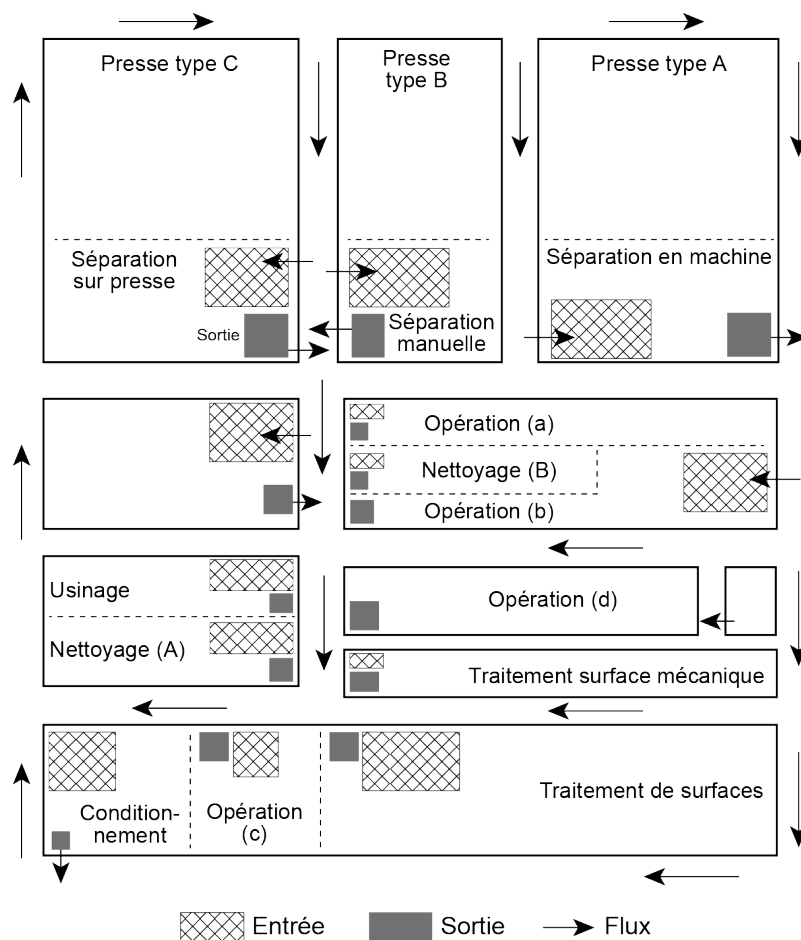


Figure 5.5 – Étape 3/3 : la solution spatialisée (concrète)

L'implantation théorique est confrontée à la réalité du terrain et des outils pour dessiner le plan d'implantation concret tenant compte des surfaces effectivement disponibles, des besoins de chaque secteur et des flux d'entrée et de sortie des matières premières et des produits finis (Source : d'après INRS).

réfléchir au fonctionnement et à l'aménagement des territoires (cf. l'Introduction générale). Cette proximité pose de fait la question de savoir si l'ergonomie et ses méthodes peuvent permettre de réfléchir à l'aménagement de l'espace et des villes.

5.2.2 Une ergonomie pour aménager le ville

Par l'intermédiaire de l'exemple précédent, on saisit bien la démarche que préconise l'INRS pour l'implantation et l'organisation des établissements industriels à partir des enseignements de l'ergonomie. Au cœur de cette préconisation empirique, l'ergonomie traite les problèmes de l'éloignement et de la proximité comme deux points primordiaux de l'efficacité des systèmes de travail. Dans ce sens, elle partage un point commun avec la géographie, dont certains modèles, notamment ceux qui concernent les questions d'interaction spatiale (Openshaw, 1975 ; Taylor,

1983 ; Pumain et Saint-Julien, 2001), visent les mêmes fins¹⁹. À titre d'exemple, on peut rappeler la formalisation d'un modèle de potentiel, développé sur la base de la loi de la gravitation universelle de I. Newton, et qui a fait l'objet de plusieurs utilisations en géographie (dont la première semble être l'étude des lois de migration de E.G. Ravenstein (1885)²⁰, puis celle sur la mobilité de S.A. Stouffer (1940), celle de K.G. Zipf en 1946 et finalement celle de J. Stewart et W. Warntz (1949) :

$$P_i = \sum_{j \neq i} \frac{m_j}{d_{ij}^\alpha} \quad (5.1)$$

La formule indique que le potentiel P d'un lieu i dépend de la somme des masses attractives m des cellules j environnantes divisées par la distance d^α qui sépare le lieu i des autres lieux j . Ce modèle, classique pour traiter des questions d'interaction spatiale, repose en fait sur la triple hypothèse (i) qu'il existe des interactions entre tous les lieux (interactions qui se caractérisent par leur masse et par leur position dans l'espace), (ii) que la probabilité d'interaction est la même entre toutes les paires de lieux et (iii) que l'intensité de l'interaction entre chaque paire de lieux est une fonction inverse de la distance qui les sépare²¹. Cette interaction peut également être envisagée sous la forme de flux entre les lieux, par l'intermédiaire du modèle de D.L. Huff (1964) par exemple, qui indique la probabilité d'un flux F entre un lieu i et un lieu j , par rapport à d'autres destinations k :

$$F_{ij} = \frac{m_j}{d_{ij}^\alpha \sum_k \frac{m_k}{d_{ik}^\alpha}} \text{ et } \sum_i F_{ij} = 1 \quad (5.2)$$

Le modèle de D.L. Huff apparaît alors très proche de l'indicateur d'accessibilité A_i proposé par W.G. Hansen (1959), courant dans la modélisation des flux et du trafic dans la théorie économique (Gaudry, 2007). Parmi de nombreux indicateurs d'accessibilité (Kwan, 1998), il se formalise de la manière suivante :

$$A_i = \sum_j D_j \exp(-\beta c_{ij}) \quad (5.3)$$

19. L'utilisation commune de la théorie des graphes (Kansky, 1963) témoigne elle aussi de convergences qu'il pourrait être intéressant d'approfondir. En effet, si nous n'avons volontairement pas insisté sur ce point pour rester concis et focaliser sur l'essentiel, il semble évident que des méthodes comme celle des liaisons (*link analysis*) demande à ce que les possibilités d'interaction soient formellement définies en termes de nœuds (origines et destinations) et d'arcs (liens) permettant de les connecter. Cette approche correspond alors nécessairement aux fondements de la théorie des graphes, même s'il est rare que l'ergonomie y fasse explicitement référence.

20. Pour mémoire, on peut rappeler les dix lois de migration de E.G. Ravenstein : « 1. Most migration is over a short distance ; 2. Migration occurs in steps ; 3. Long-range migrants usually move to urban areas ; 4. Each migration produces a movement in the opposite direction (although not necessarily of the same volume) ; 5. Rural dwellers are more migratory than urban dwellers ; 6. Within their own country females are more migratory than males, but males are more migratory over long distances ; 7. Most migrants are adults ; 8. Large towns grow more by migration than by natural increase ; 9. Migration increases with economic development ; 10. Migration is mostly due to economic causes ».

21. Le principe de l'interaction spatiale est toutefois un peu plus complexe qu'un simple rapport de masses et de distances puisqu'il se double dans de nombreux cas d'une recherche de contre-opportunités (*intervening opportunities* ; Ullmann, 1957) qui nécessite de tester les interactions possibles avant de sélectionner celle qui sera la « meilleure ».

Dans cet indicateur, $\exp(-\beta c_{ij})$ exprime une fonction de résistance de forme exponentielle négative, c_{ij} est le coût généralisé des déplacements entre i et j , et D_j est la masse attractive d'une zone de destination j par rapport à la zone émettrice i pour laquelle l'indice A est calculé (Raux, 2007). Avec un formalisme plus esthétique d'un point de vue mathématique²², la formule a l'avantage de mettre en avant la notion de coûts généralisés²³, mais l'inconvénient de ne pas intégrer explicitement la notion de distance d , quoique cette dernière y soit fondamentalement présente.

Comparativement, **il faut donc reconnaître une certaine similarité dans le traitement des distances proposé en géographie et en économie, mais également en ergonomie : chacun des modèles étudiés cherche, par un moyen ou un autre, à minimiser les distances entre les éléments destinés à interagir, dans le but de minimiser les déplacements et de générer des gains, qui se traduisent par une meilleure productivité dans le cas de l'ergonomie, par moins d'effort dans le cas de la géographie, et par un coût réduit dans le cas de l'économie.** Ainsi, ces trois disciplines offrent une illustration, sous un angle différent, du même principe : celui des économies d'agglomération, relayé par l'expression $\frac{m}{d}$ (« la masse divisée par la distance »), qui illustre en elle-même, d'une certaine manière, la première loi de W. Tobler (1970) : « tout interagit avec tout, mais deux objets proches ont plus de chance de le faire que deux objets éloignés ». Nous l'avons vu, ce principe fonctionne dans le cas des mesures anthropométriques d'une table de travail (cf. l'exemple du poste d'emballage de chocolats ; p. 86) ou de l'architecture (cf. l'exemple du Modulator, p. 87) comme dans celui de l'implantation des postes de travail au sein d'un établissement industriel, ou dans celui d'une modélisation des mobilités régionales ou urbaines. Cela montre qu'il s'affranchit *a priori* de la notion d'échelle et apparaît plus ou moins directement multi-scalaire. C'est dans ce sens qu'il s'inscrit dans l'espace selon une logique fractale : l'espace l'emboîte de différentes sortes, si bien que, quelle que soit l'échelle à laquelle on l'observe (celle de la géographie, de l'économie, de l'architecture, de l'ergonomie), on (re)découvre le principe des économies d'agglomération comme une clé de lecture des localisations.

À la lumière de ce constat, l'idée d'un transfert de l'ergonomie vers la géographie urbaine, quoique peu soulevée encore dans la littérature²⁴, semble fructueuse. Dès les années 1970, le psychologue J.C. Spérandio (1976) a en effet étudié dans quelle mesure l'ergonomie pourrait

22. Considérée comme plus esthétique parce qu'elle fait intervenir une exponentielle plutôt qu'une fraction pour décrire une fonction à peu près similaire, la formule de W.G. Hansen (1959) possède également l'avantage de rester calculable pour des distances nulles (alors qu'une division par 0 est impossible), ce qui peut s'avérer pratique dans certains cas, et justifie le fait que certains géographes y recourent plutôt que de se fonder sur la formalisation de D.L. Huff (1964), pourtant plus classique dans leur discipline. La différence entre ces deux modèles a été débattue par M. Batty and K.S. Kim (1992).

23. Courante en économie, la notion de coût généralisé implique la prise en compte monétarisée de l'ensemble des coûts qui interviennent dans un déplacement, de manière parfois très large : amortissement du véhicule, assurances, coûts d'exploitation (carburant, réparations, stationnement et péages), temps passé en déplacements, etc. (Raux, 2007). La distance de ces déplacements n'y apparaît certes pas de manière centrale mais y est néanmoins présente puisqu'elle multiplie par exemple le coût kilométrique et le coût du temps des usagers après que ce dernier a été converti en durée.

24. Cette question du transfert de l'ergonomie à une échelle qui dépasse celle des relations hommes-machines a d'ailleurs été soulevée dès 1973 par E. Grandjean : « The modern science of ergonomics is concerned with relationship between Man and the machines he has created, with the objectives of creating environments in which the man-machine system becomes efficient and the injurious effects of machinery on Man is avoided. Up to the present, most ergonomists have been concerned more with industrial situations than with the home, and the wide application of ergonomic principles to domestic situations is overdue » (Grandjean, Introduction de la version anglaise, 1973).

s'appliquer au cadre bâti, celui-ci étant entendu comme comprenant d'une part les logements et les immeubles de travail, et d'autre par « les quartiers et les villes (ou villages), y compris les voies de circulation, jusqu'à l'aménagement du territoire ». Définissant une ergonomie de l'espace urbain comme l'aménagement d'un espace donné en compatibilité avec les diverses caractéristiques des activités ou des utilisateurs en vue d'un plus grand confort ou d'une plus grande efficacité (soit une prise en compte des « facteurs humains » dans l'aménagement des espaces qui correspondrait assez étroitement à la définition de l'ergonomie)²⁵, il entreprend de lister plusieurs thématiques (qui correspondent à différentes échelles pour les géographes) pour lesquelles des travaux existent et des possibilités émergent :

- L'échelle du logement, pour laquelle il recense de nombreuses études censées améliorer la dimension physiologique de l'habitat par une réduction des nuisances sonores ou une meilleure répartition de la lumière du jour²⁶. Sceptique quant à l'approche très intuitive des architectes dans ce domaine, notamment celle de La Corbusier, il préconise le recours à une méthodologie fondée sur une analyse comportementale au sein des Systèmes hommes-machines. À cette échelle, l'apport de l'ergonomie a également été largement souligné par E. Grandjean (1973), qui y a étudié les principes et les habitudes liés au travail domestique²⁷ (en Suède, en Suisse, en France, en Allemagne et en Angleterre) avant de proposer un certain nombre de recommandations quant à l'espace utile au corps humain, au *design* physiologique du mobilier, au dimensionnement des pièces et des immeubles, au « climat » à l'intérieur des logements, à l'éclairage, au bruit, etc. ;
- L'échelle des bâtiments de service et de production, pour laquelle J.C Spérando (1976) constate que la majorité des améliorations proposées ne préconise quasiment jamais d'intervention sur les bâtiments en eux-mêmes, ceux-ci étant considérés comme des contraintes imposées qui n'entrent pas dans le champ de compétence des ergonomes, alors que « de nombreux dysfonctionnements ont pour cause une implantation spatiale inappropriée ». Il en conclut qu'une « organisation spatiale conçue en tenant compte des analyses du travail réel diminuerait évidemment une grande partie de ces dysfonctionnements [...] à condition toutefois d'intervenir dès l'élaboration des plans ». Comme précédemment, il existe également une contribution intéressante de E. Grandjean (1970) à l'échelle architecturale ;
- L'échelle de l'urbanisme, pour laquelle, après avoir fait référence aux notions de pathologie ou

25. Comme nous l'avons fait également (§ 4.1.1), J.C. Spérando (1976) émet une réserve importante à son propre propos en notant que l'activité des utilisateurs de l'espace urbain n'est pas nécessairement une activité de travail, du moins au sens social du terme, mais peut également intégrer le repos ou les loisirs. Il reconnaît néanmoins que la démarche de l'intervention ou de la recherche, les méthodes et le type de résultats attendus, peuvent former un ensemble cohérent avec l'ergonomie classique, centrée principalement sur des Systèmes hommes-machines au sens strict.

26. J.C. Spérando (1976) évoque alors la notion « de distances-seuils, au dessous desquelles l'espace personnel serait agressé », en se fondant notamment sur les travaux de R. Sommer (cf. [Sommer R., 1969, *Personal space*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs]) à rapprocher de ceux de A. Moles et E. Rohmer (1972), et plus généralement des concepts fondamentaux de la psychologie environnementale, de la géographie humaine ou de la *proxémique* de E.T. Hall (1966).

27. À l'échelle du logement, c'est effectivement la notion de travail domestique qui fait l'objet d'une approche ergonomique, en particulier, dans les années 1970, celui des femmes au foyer. Cette approche vaut à E. Grandjean une remarque que l'on ne formulerait plus de la même manière aujourd'hui : « Another focal point of the book is housework, which plays a decisive part in the well-being of the housewife, and hence indirectly in that of the rest of the family. The problem of household duties is further complicated by the ever-increasing number of housewives who go out to work, and it is one of the ironies of our time that the prestige of the housewife should stand so low » (Grandjean, Préface de l'ouvrage, 1972).

de psychopathologie des Grands ensembles²⁸ ou de la vie urbaine en général, il note que peu de travaux concrets existent, même si, ici encore, la perspective ergonomique de l'étude des Systèmes hommes-machines pourrait s'appliquer à l'analyse des espaces urbains et des relations qui y prennent place, par rapport notamment aux problèmes de la circulation routière et au rôle des places, des commerces et des services dans les relations sociales et les relations de travail.

J.C. Spérandio (1976) en conclut que « s'il en était besoin, on trouverait facilement de nombreux exemples de résultats scientifiques acquis par l'ergonomie sur le terrain, qui n'auraient pas pu l'être ailleurs, qu'ils aient eu ou non un objectif d'application. Par conséquent, nous pensons qu'ici aussi l'ergonomie du cadre bâti (ou de l'espace, ou de l'architecture, etc.) pourrait jouer ce rôle adjuvant. L'ergonomie elle-même aurait à y gagner, autant que l'architecture et la psychologie ».

Cette conclusion s'est, semble-t-il, longtemps assimilée à un vœu pieux et a fini, depuis le milieu des années 1970, par tomber dans l'oubli. En effet, près de trente ans plus tard, l'idée d'appliquer l'ergonomie au cadre urbain n'a fait l'objet, en France, et à notre connaissance, que d'une seule confrontation interdisciplinaire, celle de T. Saint-Gérard (géographe), F. Beaucire (géographe), G. Ignazi (ergonome) et F. Keravel (ergonome), dont sont issus, à la suite du mémoire de T. Saint-Gérard (2002), un rapport rédigé pour le compte du CERTU en 2002 intitulé *Entre ville et ergonomie de l'accessibilité* (Ignazi et al., 2002) et un article de vulgarisation publié dans le domaine du transport (Fleury, 2009). On peut tenter d'en résumer ici le contenu, qui s'appuie sur une partie des arguments développés plus haut.

Au départ, l'appropriation de l'ergonomie par les géographes semble liée au concept d'*ergonomie spatiale* proposé par T. Saint-Gérard (2002), concept qu'il définit comme la « capacité endogène et exogène d'un espace à pourvoir des ressources pour le moindre coût d'accès ». Dans cette optique, l'aménagement de l'espace peut faire l'objet d'une double approche classique en ergonomie : (i) celle des personnes²⁹ qui l'utilisent et qui agissent en fonction de ce que l'espace « donne à connaître », en particulier par son aménagement (les usagers) ; (ii) celle des personnes qui le conçoivent et qui agissent par rapport à l'image qu'ils se font de l'usage qui est fait de cet espace (les aménageurs). Selon D. Fleury (2009), cette double approche peut permettre d'améliorer la *cohérence* de l'espace, notion centrale qu'il définit comme une « capacité à faire tenir et fonctionner ensemble les diverses parties qui [le] composent » en tant que système. Cette amélioration apparaît d'ailleurs comme l'un des principes théoriques de l'ergonomie spatiale, susceptible de réduire les accidents (« résultats d'un manque de cohérence entre le développement de l'urbanisation, celui des infrastructures et le traitement des voies, entraînant un décalage

28. L'auteur s'appuie ici plus spécifiquement sur les travaux de M. Josserand (cf. [Josserand M., 1962, Psychopathologie des grands ensembles, *Chroniques sociales de France*, février 1962]) et de P. Sivadon (cf. [Sivadon P., 1974, La pathologie de la civilisation et de la vie urbaine, *Médecine praticienne*, 4, pp. 79-85.]), notant que le vocabulaire employé pour qualifier les dysfonctionnements urbains relève assez directement du champ d'étude psychophysiologique de l'ergonomie. Pour autant, il faut reconnaître qu'il fonde son propos sur un exemple particulier, celui des Grands ensembles, à une époque où commencent à apparaître les problèmes spécifiques à ces quartiers, qui justifient en France la mise en place d'une Politique de la ville depuis le début des années 1980, et dont on sait qu'ils ne relèvent pas seulement des conditions architecturales de logements pouvant faire l'objet d'une intervention ergonomique, mais également d'un contexte complexe dont la dimension sociale et ethnique (Guilly, 2008) est désormais très importante.

29. Ces personnes ne sont d'ailleurs pas considérées comme des êtres « parfaits » (au sens rationnel où l'entendent les économistes avec *homo œconomicus*), c'est-à-dire systématiquement capables de maîtriser leurs trajectoires à partir de ce qu'indique le code de la route, mais plutôt comme des individus qui construisent leur vision du monde et leurs stratégies avec une certaine « économie cognitive ».

entre l'activité d'un conducteur et la situation effectivement rencontrée »)³⁰ et de conduire à une certaine *résilience* (« capacité du système à permettre la récupération des erreurs, ce qui rend possible l'adaptation à l'infinie diversité des situations rencontrées ») des espaces aménagés. Dans ce contexte, l'ergonomie spatiale se conçoit alors avant tout par rapport aux mobilités des individus, chaque déplacement pouvant s'interpréter comme une tâche à accomplir pour accéder aux ressources qu'offre l'espace. Cet espace compose un système avec les éléments qui permettent de s'y mouvoir, et s'interprète comme un objet technique sur lequel une intervention ergonomique est possible. Les exemples développés dans ce cadre (Fleury, 2009) portent alors essentiellement sur la question des accidents de la route, et invitent à de nouvelles propositions pour les aménagements de voiries.

En complément à ces positions théoriques qui militent pour un transfert conceptuel de l'ergonomie vers la géographie, la question a également fait débat lors des tables rondes organisées par les services de l'État en charge des questions d'aménagement et de mobilité, en particulier au CERTU. Synthétiquement, on y retrouve un certain nombre d'hypothèses de départ : la ville, et plus spécifiquement l'espace public (H1), sont comparables à des machines dont les citoyens font usage (H2) pour atteindre les buts qu'ils se sont fixés. Ce postulat s'appuie sur l'idée que l'espace public est un outil de travail (H3) dont l'utilisation entraîne pour l'homme une dépense d'énergie physique (ce que nous interprétons dans un sens physiologique) ou mentale (ce que nous interprétons dans un sens psychologique) mobilisée pour vivre et pour circuler, et qu'il convient de minimiser en observant, dans un premier temps, les tâches réalisées régulièrement par les citoyens (ce que nous interprétons comme une *link analysis* ; cf. p. 107). Les interlocuteurs insistent ensuite sur deux points qui paraissent fondamentaux : (i) l'approche ergonomique porte son regard sur l'effort que l'usager doit faire pour atteindre son but ; (ii) cet usager n'est pas formé à l'utilisation de la ville comme il pourrait l'être à celle d'une machine (on retrouve ici l'idée de double adaptation ; p. 104). Dans le cadre du même débat, plusieurs critiques ont été formulées quant à cette conception des choses, émanant notamment de J.Y. Bion (CERTU) posant la question de savoir si la ville ne devrait pas être considérée comme *plus* qu'un outil, intégrant par exemple la notion de plaisir (H4), si l'approche ergonomique de la ville n'est pas un peu réductrice, oubliant certaines des autres dimensions urbaines (H5), et enfin si les déplacements des usagers ne doivent pas être envisagés vers d'autres lieux que ceux du travail. L'ensemble de ces points (que nous avons pris soin de *H-numéroter*) posent des questions qu'il est possible de compléter au regard de ce que nous avons dit plus haut au sujet de la ville entendue comme un Système hommes-machines :

- H1. Quelle que soit la source considérée (Grandjean, Spérando, Ignazi, etc.), il semble que le transfert ou l'utilisation des concepts de l'ergonomie pour l'aménagement de la ville ne concerne généralement que l'espace public non-bâti, celui-ci étant entendu comme l'espace

30. D. Fleury (2009) note cependant que le rapport entre la cohérence et la sécurité n'est pas univoque, dans la mesure où « certaines incohérences peuvent créer des conflits d'usage, mais ne pas dégénérer en accident, du fait des stratégies régulatrices des acteurs », notamment « lorsque le sentiment d'insécurité est tel que les riverains évitent les situations susceptibles d'être accidentogènes ». Cette idée semble se retrouver dans le principe du *space sharing* apparu récemment en urbanisme pour l'aménagement des espaces publics. Développé par l'ingénieur hollandais H. Monderman dans les années 2000, le concept de *shared space* correspond en effet à un « aménagement de voirie consistant à supprimer les règles et les contraintes des usagers en partageant l'espace, pour créer une situation d'inconfort génératrice de sécurité » (Antoni, 2009). Il est fondé sur un paradoxe identifié en sécurité routière, celui que l'insécurité ressentie crée une sécurité réelle. La suppression des séparations traditionnelles entre les modes de déplacements (voiture, piétons, deux-roues, etc.) oblige ainsi les usagers à négocier directement leurs déplacements avec les autres usagers, selon des itinéraires et des vitesses nécessairement adaptés.

dans lequel les déplacements sont possibles pour relier des lieux dont les fonctions importent pour la réalisation de tâches quotidiennes. Cette restriction peut paraître nécessaire compte tenu de la jeunesse du transfert proposé, mais il semble évident que pour être complète, l'approche ergonomique doit être étendue aux bâtiments eux-mêmes, et plus généralement au système urbain en entier.

- H2. Pour compléter les propos du CERTU, il faut ajouter que les citoyens n'en font pas seulement un usage passif de l'espace public urbain : ils le construisent activement dans l'objectif d'en faire un usage efficace (la ville étant considérée comme un outil, puis une machine, construite pour répondre à des besoins typiquement humains), faisant peut-être de l'ergonomie sans le savoir. Cette construction peut être considérée comme intuitive au départ, mais devient de plus en plus difficile à réaliser au fur et à mesure que l'outil (la ville) s'est agrandi et complexifié, comme en témoignent les dysfonctionnements de la machine urbaine identifiés dans la partie précédente (Chapitre 3).
- H3. Considérer l'espace public comme un outil de travail renvoie globalement à la critique formulée pour H1 (les bâtiments doivent être intégrés dans ces espaces de travail parce qu'ils sont à l'origine de la génération des flux de déplacement), mais également à la remarque formulée plus haut sur la fonction des lieux (cf. p. 106). En effet, si l'on peut comprendre que les déplacements contribuent à la réalisation de certaines tâches de travail, on ne peut probablement pas les considérer comme une tâche en tant que telle, tout comme il apparaît critiquable d'associer la fonction d'habitation à une fonction urbaine au même titre que celles qui concernent la production. Dans le même ordre d'idée, il est généralement nécessaire de se déplacer pour réaliser des tâches dans les espaces que la proximité urbaine permet de juxtaposer, par l'intermédiaire de l'usage de l'espace public. Mais celui-ci ne doit pas pour autant être considéré comme un outil en tant que tel.
- H4. La notion de plaisirs, que l'on peut globalement associer à l'usage des espaces de loisirs, apparaît ici dissociée de la problématique du travail et des tâches quotidiennes à effectuer. Or, on a vu que travail et non-travail peuvent conduire à un comportement identique, et donc à un usage de l'espace similaire (Chapitre 4). De surcroît, dans la société des loisirs qui caractérise le monde urbain contemporain, la réalisation d'activités récréatives occupe une place importante dans les mobilités quotidiennes et/ou hebdomadaires des usagers, et apparaît à la source de nombreux dysfonctionnements de la machine urbaine.
- H5. La remarque qui pointe le côté réducteur d'une approche ergonomique de l'espace public est d'autant plus lapidaire qu'elle est nécessairement juste. En effet, si le transfert conceptuel constitue en tant que tel une ouverture, il ne peut prétendre à l'universalisme, surtout quand il s'intéresse à un objet aussi complexe que celui du monde urbain. On retrouve ici l'un des paradigmes identifiés dès les années 1960 dans le champ de la modélisation en géographie, dont nous réservons la définition pour la Conclusion générale (p. 151).

Les cinq *H*-points soulevés ici sont ceux qui semblent faire débat quand un transfert conceptuel est proposé entre l'ergonomie et l'aménagement de l'espace urbain. Il n'est évidemment pas aisé de se positionner sur chacun d'entre eux, même si nous avons tenté de les aborder d'un point de vue critique. Pour autant, à la lecture de ces propositions, **nous souhaitons relever un point supplémentaire qui nous semble fondamental et qui ne fait l'objet, à notre connaissance, d'aucune critique ni d'aucune analyse ; il n'a semble-t-il pas retenu l'attention des géographes qui ont étudié les travaux des ergonomes ou des ergonomes qui se sont intéressés à l'aménagement de l'espace géographique : comme le**

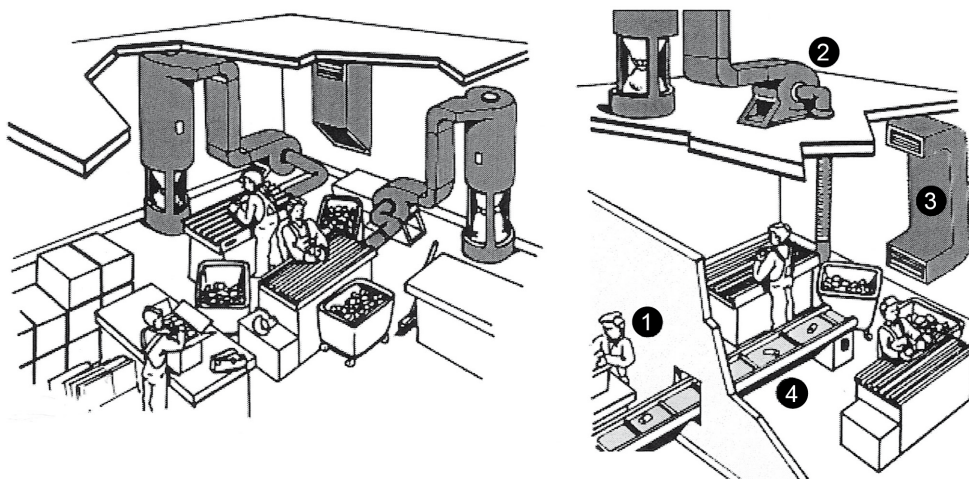


Figure 5.6 – Exemple de réorganisation sur plusieurs niveaux

La figure montre l'organisation d'un poste de travail avant (à gauche) et après (à droite) son réaménagement ergonomique. Les modifications apportées offrent plusieurs avantages : la zone d'emballage a été séparée de la zone bruyante (1) ; les extracteurs et les aérothermes ont été éloignés des zones de travail afin de diminuer le niveau sonore (2 et 3) ; l'espace libéré a permis d'espacer les postes de travail et d'installer un tapis roulant facilitant les manutentions et supprimant les bruits dus aux chutes de pièces dans les bacs (4) ; la circulation dans l'atelier a été considérablement améliorée (Source : INRS).

montre l'exemple du Modulator et des mesures anthropométriques de l'architecture, ou celui de l'emballage du chocolat (Chapitre 4), l'intervention de l'ergonomie pour créer une configuration *avant* (donnée) et *après* (optimisée) situe ses solutions dans un espace qui mobilise *trois dimensions* : la longueur, la largeur et la profondeur. Cette mobilisation est confortée par la Figure 5.6 qui nous semble ici parfaitement illustrative de ce principe général ; elle montre la réorganisation d'un poste de travail qui se déploie sur plusieurs niveaux, selon une optimisation que permet (i) de gagner de la place en surface, (ii) de cloisonner pour protéger en créant des passerelles pour communiquer et (iii) d'organiser l'ensemble comme un *volume* productif. C'est à partir de cet exemple, qui nous paraît particulièrement intéressant d'un point de vue intuitif, que nous souhaitons souligner, au-delà de ce qui en a déjà été dit, l'intérêt d'un transfert ergonomie ↔ géographie.

Conclusion

Mise à part leur échelle d'étude, il n'y a fondamentalement qu'une différence entre l'ergonomie et la géographie : la nature de l'espace qu'elles considèrent. Pourtant, si l'on s'en tient à l'axiomatique proposée par H. Béguin et J.F. Thisse (1979), cette différence n'est pas évidente ; on retrouve les mêmes attributs dans les deux cas : l'espace reste un ensemble de lieux qui correspond au substrat de toute activité humaine, ses lieux occupent des positions différentes, ils possèdent une certaine étendue spatiale, leurs attributs peuvent s'évaluer par des masses. De même, les deux font l'objet d'une *appropriation* par les usagers ou les individus qui les utilisent. Mais en revanche, si l'on suit les jalons posés par H. Isnard (1981), l'analogie devient plus délicate pour deux raisons : (i) contrairement à l'espace de l'ergonomie, l'espace géographique n'est

pas seulement déterminé par un système de production (*process*), mais par une société dans son ensemble, ce qui le rend nettement plus complexe quant aux configurations qu'il peut prendre ; (ii) l'espace géographique n'est pas un espace isotrope « à construire » (comme pourrait l'être celui d'un atelier), mais un espace donné (dont les caractéristiques écosystémiques dépendent de la physique géographique) et un espace légué (déjà construit et reconstruit par les sociétés qui s'y sont succédées). L'analogie ne peut donc s'affranchir de précautions évidentes.

Toutefois, c'est le point que nous voulons souligner, ces précautions ne doivent pas masquer **un enseignement fondamental de l'ergonomie : l'espace du travail, comme l'espace de la ville, ne sont pas réduits aux deux dimensions qui forment le plan horizontal (XY) ; ils peuvent exploiter toutes les possibilités offertes par la verticalité (Z)**. Cette approche tridimensionnelle de l'espace invite à étudier le développement vertical des villes (leurs aménagements souterrains et aériens), étude qui fait l'objet du Chapitre suivant.

Chapitre 6

L'urbanisme tridiastatique

SELON les principes de l'ergonomie, l'étude des dysfonctionnements de l'outil urbain, entendus comme autant d'inadéquations entre les objectifs (tâches) et les activités concrètement permises par la machine urbaine, doit permettre d'ouvrir un espace de solutions, considérées à partir de la connaissance des processus physiologiques et psychologiques auxquels les individus sont soumis en ville. Cet espace est celui des possibles, parmi lesquels on trouve de nombreux travaux de recherche en géographie et en urbanisme. En particulier, on peut citer ceux de H. Reymond (1998) qui propose l'idée de « ville tridiastatique », concept jusqu'à présent peu développé mais qui mérite une lecture actualisée à la lumière de l'ergonomie. Cette solution possède en effet l'avantage de ne pas considérer l'espace urbain uniquement comme un « disque » posé sur la surface terrestre, mais de le concevoir comme une « sphère » dont le volume peut être utile à l'organisation de l'écoumène, palliant en partie le problème de l'étalement urbain et de la consommation de surface qu'il génère. Dans ce sens, le concept appliqué à la ville le principe de la composition tridimensionnelle des espaces de travail, et peut se concrétiser par un urbanisme *à la fois* aérien et souterrain (cf. § 6.1). Sur de nombreux points, cet urbanisme que nous appelons vertical, crée de nouvelles séparations, en même temps que de nouvelles connexions au sein des espaces urbains. Le concept tridiastatique semble de ce fait tout à fait compatible, mais également fortement complémentaire, avec deux autres notions actuellement développées en urbanisme : (i) le *Transit oriented development* (TOD) qui propose une solution d'urbanisation calquée sur le réseau de transports en commun et construite autour de lui (§ 6.2.1) et (ii) l'urbanisme fractal (§ 6.2.2) proposé par P. Frankhauser (1994, 2012) pour réfléchir à une forme urbaine plus durable, qui dépasse la simple dichotomie compacité/étalement urbain. À l'image des postes de travail, une conception ergonomique de la ville considérée dans ses trois dimensions offre alors un potentiel de développement intéressant, quoiqu'encore mal identifié, pour réduire les dysfonctionnements de la « machine urbaine » en substituant une proximité verticale dense à son étalement horizontal diffus.

6.1 Urbanisme vertical (aérien et souterrain)

Si l'utilisation du sous-sol est née avec la sédentarisation¹, elle constitue aujourd'hui encore l'une des ressources les plus importantes pour assurer le fonctionnement de la machine urbaine. Cette utilisation, souvent méconnue, peut d'ailleurs s'appuyer sur les caractéristiques propres à l'épaisseur souterraine, en particulier sur son invisibilité et sur les possibilités de dégagement qu'elle offre. Ainsi, alors que la lecture des cartes classiques ne montre généralement rien des sous-sols urbains et les condamne à la condition de *terra incognita*², de nombreuses coupes transversales y révèlent un foisonnement d'éléments techniques très divers (eau potable, eau usée, électricité, téléphone, fibre optique, caves et stockage, transports collectifs, etc.). La majorité y a été enfouie pour y être cachée ou pour dégager un espace équivalent à leur volume en surface. Parallèlement, l'urbanisme aérien s'est développé à partir du moment où les techniques et l'artificialisation des matériaux de construction (le verre et l'acier notamment) ont permis de construire des bâtiments de grande hauteur : les gratte-ciels américains ont offert un nouveau *skyline* aux villes des pays neufs, qui se sont développées avec une densité jusqu'alors inégalée, portée par les impératifs économiques de la rentabilité foncière. Critiquables l'un comme l'autre, l'urbanisme *souterrain* et l'urbanisme *aérien* ne peuvent toutefois pas être véritablement dissociés (Bernard, 1995 ; Boivert, 1995) et il apparaît préférable de parler d'urbanisme *vertical* pour évoquer l'axe de la hauteur et de la profondeur, axe qui offre de nombreuses opportunités pour la mise en œuvre d'une ergonomie urbaine.

6.1.1 Verticalité et projets urbains

Évoquer la verticalité de l'urbanisme renvoie souvent à une dimension mythique que l'on ne peut se passer d'évoquer, notamment parce qu'elle répond à la dualité épanouissement/asservissement que nous avons déjà évoquée au sujet du travail (§ 4.1) et de la machine (§ 4.2). D'un point de vue symbolique, la ville verticale (souterraine et/ou aérienne) se trouve en effet balancée entre l'idée de grandeur ou d'épanouissement et celle d'aliénation technique (dont témoignent l'exemple de la Jérusalem céleste, celui des cathédrales et des gratte-ciels, comme celui de la

1. L. Mumford (1961), comme E. Utudjian (1952, 1966) ou S. Barles et A. Guillerme (1995), expliquent en effet que depuis les troglodytes (dont l'habitat souterrain remonte à l'antiquité égyptienne) jusqu'à l'exploitation des mines (qui explique une partie de l'« explosion » urbaine lors de la Révolution industrielle), en passant par la création de systèmes enterrés d'adduction et d'assainissement d'eau (dont l'exemple le plus illustratif est donné par les égouts romains antiques, le *cloaca maxima*, qui restent encore en partie utilisés actuellement par la ville de Rome), l'exploitation des sous-sols fait partie intégrante de la construction urbaine. C. Cetekk (1982) consacre d'ailleurs une partie de son ouvrage sur la construction de Paris à sa sphère souterraine. On rappellera également qu'à partir des années 1830, en France, les réseaux d'eau potable, d'égouts et de gaz sont systématiquement enfouis sous terre, ce qui confère aux rues un rôle qui dépasse largement celui de la circulation des hommes : elles organisent également la circulation des fluides en souterrain, selon un plan qui se calque sur celui de la surface.

2. H. Reymond (1998) explique à ce sujet que « dans nos modèles, les villes, ramenées à une cartographie bi-dimensionnelle, sont donc des êtres sans épaisseur, qui échappent à leur architecture et ignorent la représentation altimétrique de la cartographie continentale. Quant aux extensions bathymétriques que leur extension pourrait susciter, elles sont le plus souvent réduites au minimum de ce qui se trouve sous la ville pour qu'elle puisse tenir debout et assurer la vie de sa population, comme nous l'expose l'excellent livre de D. Macaulay (cf. [Macaulay D., 1979, *Sous la ville*, Les deux coqs d'or, 112 p.]), depuis les différents types de fondations jusqu'aux faisceaux distributeurs et évacuateurs propres aux diverses circulations souterraines, métro compris ». Ce problème de visualisation cartographique des espaces urbains en trois dimensions, notamment en souterrain, a fait l'objet d'un essai de représentation animée faisant appel à l'imagerie de synthèse ; cf. [Higel E. en collaboration avec Cauvin C. et Reymond H., 1998, *De la ville traditionnelle à la ville tridiastatique, en images de synthèse*, CD ROM].

tour de Babel³, ou encore les illustrations plus récentes apportées par le cinéma de science-fiction occidental ou les films d'animation japonais⁴. Ici, la verticalité architecturale oscille entre ouverture métaphysique (symbole de puissance prométhéenne) et écrasement lugubre (symbole de ségrégation sociale et d'aliénation). Au-delà de ces anticipations symboliques, la conquête de la verticalité urbaine a toutefois également fait l'objet de considérations très pragmatiques, que l'on peut considérer à travers les travaux précurseurs de l'architecte français E. Hénard (1849-1923), résumés ici en trois points :

1. Pour E. Hénard (1911), la hauteur maximale des bâtiments devrait égaler la largeur des rues adjacentes, de manière à ce que l'angle d'incidence de la lumière du soleil ne soit pas inférieur à 45 degrés. Cette capture de la lumière solaire sera également identifiée plus tard par W. Gropius et l'école du Bauhaus⁵ comme un fondement hygiéniste⁶ pour une théorie de l'architecture moderne ;
2. E. Hénard (1911) note également que les couvertures des immeubles peuvent très aisément constituer des terrasses aériennes jouant le rôle de jardins. Mais, il y ajoute une nouvelle fonction : celle de plate-formes pour le décollage d'aéroplanes individuels, qui modifieraient considérablement la forme et les mobilités urbaines (chaque toit devenant un point de départ ou d'arrivée pour ces « automobile aériennes »). Positionnées aux quatre points cardinaux de la ville, huit tours d'une hauteur de 200 mètres serviraient alors à la fois de repère aux automobilistes-aviateurs et de postes de contrôle pour la police aérienne ;
3. En ce qui concerne l'exploitation du sous-sol, il ne s'agit plus seulement d'enfouir ce que la surface ne veut ou ne peut contenir, mais bien d'utiliser le tréfonds comme la continuation verticale d'un *espace de vie*. E. Hénard propose en effet de favoriser le développement de rues à étages multiples dédiées aux services publics et aux transports, dans le but de rationaliser l'utilisation du sol et de rendre la ville plus salubre. Une partie de son idée repose sur le constat qu'au fil du temps l'accumulation anarchique et peu réfléchie des réseaux dans les égouts de Paris a rendu leur fonctionnement difficile à gérer et empêche, par sa

3. On pourra lire à ce sujet l'ouvrage de J. Ellul (1975), et plus particulièrement le chapitre qu'il consacre à l'histoire de la ville : « L'une qui part de Caïn, l'autre de l'Eden, et qui se réunissent en la Jérusalem céleste, toutes deux exprimant une forme de l'action salutaire et seigneuriale de Dieu en Jésus-Christ ». On ne manquera pas non plus de rappeler le point de vue de L.F. Céline sur les gratte-ciels : « Figurez-vous qu'elle était debout leur ville, absolument droite. New York c'est une ville debout. [...] Mais chez nous, n'est-ce pas, elles sont couchées les villes, au bord de la mer ou sur les fleuves, elles s'allongent sur le paysage, elles attendent le voyageur, tandis que celle-là l'Américaine, elle ne se pâmait pas, non, elle se tenait bien raide, là, pas baisante du tout, raide à faire peur » ; cf. [Céline L.F., 1932, 1972, *Voyage au bout de la nuit*, Gallimard, 505 p.].

4. L'idée de ville verticale a été largement exploitée par la cinéma de science-fiction, de *Metropolis* (Lang, 1936) jusqu'aux strates sans dimension physique présentées dans *Blade Runner* (Scott, 1982), *Le cinquième élément* (Besson, 1997) ou la première trilogie *Star Wars* (Lucas, 1999-2005). En ce qui concerne les films d'animation, on citera par exemple *Akira* (Otomo, 1988), *Ghost in the shell* (Oshii, 1995) ou *Metropolis* (Rintaro, 2001), qui donnent tous une image lugubre de la ville contemporaine, typiquement japonaise dans sa densité et sa verticalité, associée à une dimension catastrophiste qui renvoie au traumatisme d'Hiroshima, et plus généralement au risque nippon de tremblements de terre ; cf. [Rixens P. (ss. dir. Antoni J.P.), 2005, *Ville et Mangas. Représentation de la ville à travers le dessin animé japonais*, Mémoire de second cycle, Ecole d'architecture de Strasbourg, 63 p.].

5. Le Bauhaus est une école allemande d'art et d'architecture d'avant-garde fondée en 1919 par W. Gropius à Weimar, qui s'installera par la suite à Dessau puis à Berlin. Elle sera dirigée par W. Gropius (1883-1969), H. Meyer (1898-1954) et L. Mies van der Rohe (1886-1969), avant d'être fermée par les nationaux-socialistes en 1933. Le Bauhaus a particulièrement influencé l'esthétique moderne et le fonctionnalisme architectural.

6. Pour des raisons différentes, cette préoccupation n'est pas non plus absente des projets du baron Haussmann pour le réaménagement de Paris, l'accès à la lumière étant considéré par les hygiénistes comme l'une des conditions de l'assainissement des villes (cf. également Barles, 1999a).

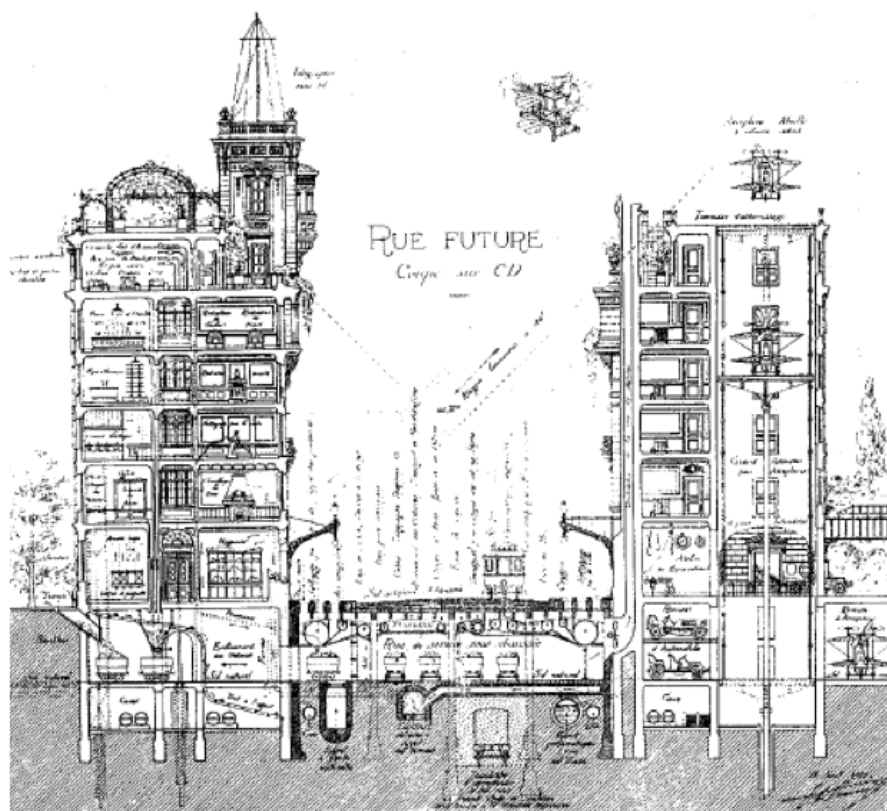


Figure 6.1 – La « rue future » d'Eugène Hénard

Sur cette illustration, la *rue future* est présentée en coupe : la verticalité des bâtiments est exploitée autant dans la strate aérienne (terrasses et plateformes) que dans la strate souterraine (évacuation des déchets, transport des personnes et des marchandises).

complication, toute possibilité d'évolution technique ou d'implantation de nouveaux tronçons. Il propose alors de ne plus concevoir la rue sur un seul niveau, mais de la construire artificiellement à une hauteur telle qu'il existe *en dessous* un espace suffisamment grand pour accueillir tous les équipements et services nécessaires.

L'exemple de la rue future (Figure 6.1)

La rue imaginée par E. Hénard est construite comme un pont monolithique sous lequel se superposent trois volumes : (i) juste en dessous du pont, il prévoit la mise en place d'un système de câblage et de tuyauterie, parmi lesquels les plus futuristes (système d'aspiration automatique des rues, air comprimé, eau stérilisée, pétrole et air liquide, acheminement du courrier, air pur, etc.) jouxtent les plus classiques (télégraphe, téléphone, électricité, etc.) ; (ii) en dessous de ce premier volume, il dessine un espace de 2,25 mètres de hauteur qui doit accueillir quatre lignes de trains, dont la principale fonction consiste à évacuer les déchets et les objets encombrants des immeubles adjacents ; l'aération de cette « rue de service sous chaussée » est assurée par un système électrique qui utilise les murs des bâtiments comme conduit ; (iii) sous ce niveau encore, les égouts réapparaissent, mais avec des dimensions réduites puisque qu'ils sont exclusivement réservés au transport des eaux usées.

En résumé, l'idée de E. Hénard (1911) consiste donc à doubler les rues de surface (principalement vouées à la circulation de véhicules légers ou de piétons) avec un ensemble de rues souterraines qui

accueilleraient les systèmes et les réseaux, l'évacuation des déchets et le transport de matériaux lourds (Figure 6.1). En extrapolant ce premier principe, il formule une seconde proposition, dans laquelle la « plate-forme » viaire (en surface) est utilisable par les piétons et les calèches, la seconde (souterraine) par les tramways, la troisième pour les réseaux divers, et la quatrième pour les transport de biens. Le système de « rues dupliquées » de E. Hénard doit alors permettre d'intervenir sur chaque type d'équipements sans « bloquer » les autres et offrir une solution possible à l'encombrement du sous-sol, solution qui préfigure l'urbanisme de dalle ⁷, tel qu'il sera mis en œuvre à la Défense (Paris) ou à la Part-Dieu (Lyon) par exemple.

Issu du courant fonctionnaliste de l'architecture moderne représenté par le Corbusier (1957), le projet de ville cybernétique proposé par N. Schöffer (1969) offre un autre exemple de verticalité, qui ne se fonde pas uniquement sur les aspects pragmatiques de l'organisation urbaine, mais tient compte de certains facteurs psychologiques. Le projet part du principe qu'une « scission » doit exister entre la ville dite *fonctionnelle* et la ville dite *résidentielle* : la première, qui correspond à une cité du travail faite de lieux de contacts et de communications rapides, devrait privilégier une forme concentrée et verticale (à l'image de l'homme qui travaille debout) dans des tours de plusieurs centaines de mètres de hauteur ; la deuxième, essentiellement faite de lieux de repos et de retrait prendrait la forme d'un dortoir organisé de manière dispersée et horizontale (à l'image de l'homme quand il dort). Même si l'on peine à imaginer sa réalisation concrète, la ville cybernétique ⁸ témoigne d'un foisonnement d'idées sur la verticalité urbaine, tant souterraine qu'aérienne, issues d'une part des possibilités techniques accrues pour construire plus haut et plus profond, et d'autre part d'un champ de réflexion nouveau sur la ville et son fonctionnement (la cybernétique), qui pose implicitement la question de son ergonomie en tant que Système hommes-machines.

Dans le cadre de ces réflexions, E. Utudjian (1952) ⁹ a proposé une théorie de l'urbanisme souterrain plus complète. Ce dernier serait voué à accueillir les futurs aménagements de la ville, partant du principe que l'« on pourra toujours s'ingénier à remodeler les villes vieilles pour leur donner un air de jeunesse, il n'en restera pas moins que les rues seront toujours trop étroites, les distances trop grandes, les constructions trop entassées, les fumées trop nombreuses. Il reste le sous-sol, et c'est là en fin de compte, qu'est l'une des chances de demain ». Il ne s'agit plus ici de dessiner une utopie, mais bien de construire une théorie raisonnée pour l'exploitation des espaces souterrains. E. Utudjian (1952) voit en effet plusieurs avantages dans l'exploitation du sous-sol (préservation des espaces verts en surface, doublement des voies de circulation, protection vis-à-vis du vent, de l'incendie, du vol, coût minoré des expropriations en profondeur,

7. L'urbanisme de dalle constitue une base pour l'urbanisme souterrain. Il consiste à séparer les espaces piétonniers de la circulation automobile et des transports en commun, qui se développent chacun sur des niveaux dédiés, à partir d'un « sol » artificiel élevé sur une dalle reposant par exemple sur des pilotis. En Europe occidentale, les réalisations les plus connues sont celles de la Défense à Paris, de Louvain-la-Neuve en Belgique, et d'une grande partie des nouveaux quartiers d'affaires construits dans les métropoles françaises (Part-Dieu à Lyon, Mériadeck à Bordeaux, Polygone à Montpellier, etc.) ; cf. [Ouvrage collectif, 1995, *L'urbanisme de dalles*, Actes du colloque des ateliers d'été de Cergy-Pontoise (1993), Presses de l'ENPC, 179 p.].

8. Même s'il propose un certain nombre de schémas qui s'inspirent de la dynamique des systèmes, l'ouvrage de N. Schöffer, qui date de 1969, ne semble compatible avec la cybernétique que dans un cadre très théorique, et témoigne plus d'une idée correspondant à l'air de son temps (la naissance de la cybernétique) que d'un véritable transfert vers l'urbanisme.

9. E. Utudjian (1905-1975) est un architecte et urbaniste français, fondateur en 1933, puis principal animateur du Groupe d'études et de coordination de l'urbanisme souterrain (GECUS), qui a publié la revue *Le monde souterrain*. Ce groupe participera aux principales réflexions sur les constructions souterraines françaises, du RER aux Halles, en passant par le tunnel sous la Manche.

etc.) et propose « d'organiser la vie urbaine non pas dans un plan horizontal mais dans les *trois dimensions* », précisant qu'il ne s'agit pas « d'enterrer l'habitat humain, mais seulement certains organes de la ville qui encombrent la surface de leur masse inerte », dans lesquels l'homme vivra périodiquement, et périodiquement seulement¹⁰. Pour concrétiser cette organisation, il propose, à travers la notion de *ville épaisse*, un aménagement fondé sur un *zoning souterrain* dont les exemples qu'il propose rappellent l'aménagement ergonomique des postes des travail (§ 5.2.1), tant pour des villes de plaines que pour des agglomérations situées sur un relief plus prononcé (Figure 6.2).

Fondés sur des principes identiques, qui consistent à éloigner les éléments dont l'usage est possiblement néfaste aux activités humaines et suffisamment peu fréquent pour autoriser leur translation dans un plan vertical, **l'ergonomie et l'urbanisme souterrain proposent donc des solutions comparables. Les potentialités de la verticalité apparaissent comme un champ à part entière de l'ergonomie urbaine, qui dépasse les prérogatives trop sectorielles identifiées au § 5.2.2, et propose une solution plus globale qui ne se réduit pas à l'espace public d'une rue ou d'un quartier mais porte bien sur les aspects physiologiques (forme et mobilités) et psychologique (émotions, bien-être, facilité d'usage) qui impactent la vie des habitants.** E. Utudjian (1952) comme R. Sterling (1993) ou encore S. Barles et A. Guillerme (1995) font d'ailleurs explicitement référence à la notion de « facteur humain » pour décrire les avantages et les limites de l'urbanisme souterrain en considérant ses atouts et ses limites physiologiques et psychologiques. Ce faisant, même s'ils ne le citent pas directement, les auteurs entrent naturellement dans le champ de l'ergonomie. Ils montrent en effet que la verticalité apparaît comme un *possible* pour un urbanisme raisonné.

6.1.2 Une solution pour un urbanisme raisonné

Après E. Utudjian (1952, 1966), plusieurs auteurs se sont penchés sur les théories urbanistiques susceptibles de soutenir les constructions aériennes et souterraines. Ainsi, même si l'étendue des réalisations en sous-sol reste difficile à évaluer du fait de leur méconnaissance (espaces peu étudiés pour lesquels on ne dispose pas d'inventaire complet ; Barles et Jardel, 2005) et de leur perception (les espaces souterrains ne se voient pas et la canopée urbaine n'est que difficilement perceptible par les usagers de la surface), des éléments de théories ont émergé à partir d'exemples concrets désormais classiques (Montréal ou Tokyo)¹¹, ou de taille plus restreinte (les Halles et la Défense à Paris). Dans la littérature dédiée¹², on trouve en général cinq arguments pour justifier les constructions verticales :

10. Ce point faisant parfois l'objet de polémiques ou de crispations vis-à-vis de l'enterrement possible de certains établissements urbains, il convient de préciser encore la position de l'auteur à ce sujet : « L'urbanisme souterrain ne doit pas entraîner la construction de véritables villes cavernées devant servir à l'habitation permanente. L'habitat souterrain ne peut être que temporaire et très réduit. Ceci tant au point de vue scientifique que social. La nature de l'homme est faite pour un milieu atmosphérique donné et la science ne permet pas actuellement de reconstituer intégralement en sous-sol ce milieu » (Utudjian, 1952). Cette position est évidemment celle que nous défendons et fait généralement l'unanimité des recherches sérieuses sur la question de l'urbanisme souterrain.

11. L'urbanisation souterraine de Montréal débute au milieu du 20^e siècle, profitant des « trous » laissés par la mise en place des chemins de fer quelques décennies plus tôt pour apporter une réponse originale à la congestion du centre-ville (Besner, 1997). L'exploitation du sous-sol tokyote débute dans les années 1920-1930, à partir des marques laissées vacantes par le tremblement de terre de 1923 et en prévision de la première ligne de chemin de fer métropolitain.

12. On citera par exemple les revues *Urban underground utilization*, *Underground space*, ou encore *Tunnelling and underground space technology*, plus technique.

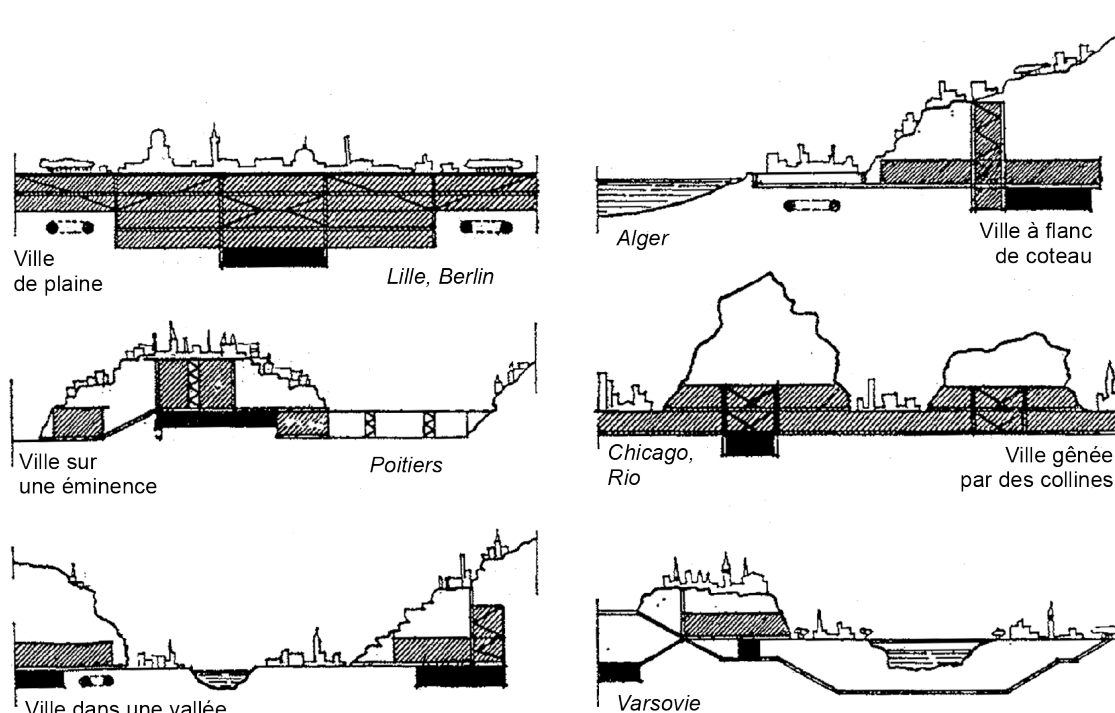


Figure 6.2 – Zoning souterrain

La figure montre le projet de *zoning souterrain* présenté par E. Utudjian, et adapté à différents sites urbains en fonction de leur configuration topographique. L'auteur y indique les zones d'extension souterraine (grisé), les zones de protection (noire) ainsi que les communications horizontales et les liaisons verticales (Source : Utudjian, 1966).

1. La lutte contre le froid et les intempéries : même s'il n'intervient jamais seul, le climat est souvent considéré comme l'une des motivations majeures pour un enterrement permettant de lutter contre les variations saisonnières de températures¹³. Cet argument est évidemment surtout valable dans les régions du globe où le climat présente certaines extrémités (notamment au Canada, dont la *ville intérieure* de Montréal reste l'exemple le plus connu), mais peut également se justifier sous un climat tempéré, voir sous les climats chauds où les arcades qui permettaient aux badauds de se protéger du soleil dans les rues commerçantes font désormais place à des galeries souterraines, comme par exemple à Dubaï ;
2. La lutte contre la congestion : aménagé et organisé par un réseau viaire enterré, le sous-sol apparaît comme un lieu possible pour organiser les flux de circulation, ce qui permet de réduire le trafic en surface et donc la congestion qu'il génère. Toutefois, cette organisation ne se construit pas nécessairement dans un plan unique (les contraintes n'étant pas les mêmes qu'en surface) mais peut intervenir sur différents niveaux de profondeur. Cette spécificité du sous-sol permet alors (i) d'augmenter le nombre de voies en limitant les croisements, et (ii) d'organiser verticalement le trafic par modes. Si la première possibilité

13. K. Okuyama *et al.* notent en effet que la population s'empresse souvent de rejoindre les galeries marchandes souterraines disposant d'air conditionné quand il pleut ou durant les mois d'été ; cf. [Okuyama K., Nischi J., Seiki T., 1999, Modernology study of underground urban space in Japan, *Actes de la 8e conférence internationale de l'Association des centres de recherche sur l'utilisation urbaine du sous-sol (ACUUS)*, 27-30 septembre 1999, Xi'An (Chine)].

est assez classique et correspond globalement à tous les projets de métros dans le monde, la seconde relève d'une organisation plus originale que l'on connaît dans certaines opérations d'urbanisme de dalle ;

3. La pénurie d'espace et la préservation des paysages : le fait d'enterrer certains bâtiments ou certaines infrastructures libère d'autant l'occupation à l'air libre. La solution souterraine constitue de ce fait une évidence largement exploitée pour le déploiement des réseaux ferrés de transport en commun. Dans le même temps, elle permet de conserver suffisamment de surface libre pour mettre en valeur le patrimoine architectural ou paysager de la ville. L'urbanisme souterrain est par exemple considéré au Japon (culturellement très attentif à la question paysagère) comme une solution pour protéger la visibilité du paysage : afin de réduire la hauteur d'un bâtiment qui le masquerait, il « suffit » d'en enterrer les premiers étages (Nishi *et al.*, 2000) ;
4. Les prix tréfonciers : quoiqu'assez fréquente, la critique du coût prohibitif de l'urbanisme souterrain ne correspond pas à une réalité dans le long terme, comme L. Mumford (1961) l'a fait remarquer à propos des égouts romains¹⁴. En effet, si le coût de revient des travaux en sous-sol diminue au fur et à mesure des avancées techniques, l'acquisition du souterrain ne coûte souvent que le prix d'un euro symbolique¹⁵. De surcroît, les économies d'énergie de chauffage en sous-sol peuvent justifier l'investissement, et compensent en partie le coût de l'éclairage, du renouvellement de l'air ou de la climatisation ;
5. La sécurité publique : dès les années 1930, l'intérêt de la verticalité a été identifié d'un point de vue stratégique. L'artilleur P. Vauthier (1885-1979) a par exemple proposé d'y recourir pour préserver les villes d'une menace aérienne en diminuant les surfaces bâties et en maximisant la dispersion des immeubles, afin de réduire les chances qu'une bombe ne s'écrase sur une zone habitée. En cas d'impact, cette dispersion devait permettre de ne pas propager les incendies d'un bâtiment à l'autre et de ne pas couper toute possibilité de circulation au sol. Parallèlement, P. Vauthier estime que les bâtiments de grande hauteur permettent de survoler les gaz toxiques issus des bombardements et précède sur ce point le projet de tours anti-aériennes (220 mètres) aux étages supérieurs blindés de Le Corbusier. Face aux catastrophes naturelles, en particulier les séismes¹⁶, les espaces souterrains offrent également une solution sécuritaire particulièrement bien exploitée au Japon, qui encourage les constructions de très grande profondeur, même si ces dernières obligent à re-définir fréquemment les concepts de prévention et de protection en fonction des innovations architecturales souterraines¹⁷ (Bignand, 1995).

14. Pour s'en convaincre, il suffit de citer L. Mumford (1961) : « Il est significatif que l'œuvre la plus ancienne des urbanistes de Rome soit le *cloaca maxima* [souterrain], qui date du 6^e siècle avant notre ère [...]. Plus de vingt-cinq siècles d'usage ininterrompu constitue un record qu'il est difficile d'égaler, et qui pourrait prouver qu'en matière d'urbanisme, les réalisations les plus ambitieuses sont parfois les plus économiques ».

15. Le prix du tréfonds est évalué par le barème Lassalle (du nom de l'ingénieur des Ponts et chaussées qui l'établit), construit sur le principe que l'expropriation en sous-sol handicape les possibilités d'utilisation du tréfonds de la parcelle par son propriétaire, qui subira de surcroît les conséquences de la construction d'un équipement sur celle-ci (Barles, 2000). Le barème prévoit à la fois une indemnité (dont la valeur dépend de la valeur de la surface et est inversement proportionnel à la profondeur d'expropriation), une indemnisation concernant la dépréciation du surplus et une indemnisation de remplissage.

16. S. Barles et S. Jardel (2005) illustrent cet intérêt par l'exemple du tremblement de terre de Kobe (Japon) en 1995, qui a détruit 90% des bâtiments en surface contre 10% des constructions souterraines. Elles soulignent également que le manuel de survie aux tremblements de terre édité en 2003 par le gouvernement de Tokyo considère les espaces souterrains comme plus sûrs : « In general, the underground is safer than the ground ».

17. Pour être tout à fait honnête il faut toutefois également noter, à la suite de P. Blancher (1995), que l'ur-

Au regard de cet argumentaire, l'exploitation de la verticalité urbaine apparaît donc comme une solution possible pour un urbanisme ergonomique raisonné. Mais, au delà de ces cinq atouts, elle soulève un point intéressant dans les problématiques de la ville actuelle et de son étalement. En effet, la connexion des espaces urbains aux réseaux de transport en commun (qu'il s'agisse des chemins de fers inter-urbains ou de métro et de tramway) apparaît souvent comme un enjeu de l'urbanisme vertical, qui apporte une valeur ajoutée aux stations, soit en connectant les réseaux entre eux, soit en les connectant aux réseaux de surface. À Tokyo, l'un des objectifs de l'urbanisme vertical a en effet consisté à appuyer le développement des galeries commerciales souterraines sur le réseau de métro afin d'y capter la clientèle d'usagers nécessairement piétons une fois descendus des voitures¹⁸ et de compenser le prix des investissements en sous-sols par le bénéfice retenu sur leurs achats (Barles et Jardel, 2005). Cet exemple permet de positionner l'urbanisme vertical dans le contexte plus large des interactions verticales entre la forme urbaine et les politiques de transport.

6.2 Verticalité urbanisation/transport

Dans le monde de l'urbanisme et de l'économie des transports, il est presque devenu classique, à l'heure actuelle, de considérer conjointement la question des transports et celle du développement urbain. M. Wegener (2004) a en effet montré qu'elles sont liées par de nombreuses interactions, selon un schéma déjà identifié par M. Halbwachs (1928) pour les villes du 19^e siècle (cf. p.65). La question qui se pose est alors de savoir comment s'organisent (ou peuvent s'organiser) concrètement ces connexions dans le cadre d'un projet urbain ergonomique. Ici, la verticalité apparaît comme une solution déjà partiellement mise en valeur par les réalisations fondées sur le concept TOD, solution qui offre un potentiel important si on la couple avec l'idée d'urbanisation fractale. Cet ensemble d'éléments doit évidemment être mis en perspective avec le concept de ville tridiastatique (Reymond, 1998), qui permet finalement de proposer une théorie urbaine fondée sur sa fractalité transsurfacique.

banisme souterrain génère en contrepartie des « formes de risques particulièrement typiques des villes contemporaines », parmi lesquels on peut citer quelques exemples : les remontées chroniques ou accidentelles de nappes, les risques d'attentat (gaz sarin dans le métro de Tokyo), les incendies et les explosions en sous-sol (Grand Magasin à Osaka en 1967, ligne métropolitaine à Tokyo en 1970 ou à Tokyo-Shizuoka en 1975), etc. À cela s'ajoutent les risques de la construction souterraine en elle-même, dont C. Cetek (1987) rapporte quelques exemples lors des premières expériences parisiennes d'enterrement (carrières, égouts, métro) : « Le manque de méthode, l'insouciance et l'érosion naturelle provoquèrent plusieurs catastrophes. En 1774, la rue d'Enfer s'effondra. En 1778, la rue Boyer, à Ménilmontant, fit de même et engloutit sept personnes. Il y eut des accidents de ce type en 1876, rue de la Santé, en 1877, passage Gourdon, en 1879, boulevard Saint-Michel, et d'autres encore, le plus récent ayant eu lieu à Clamart en 1953 ». Ces exemples sont considérés comme des événements conjoncturels (il s'agit en fait de risques associés à des insuffisances techniques aujourd'hui comblées ou à un aléa difficile ou impossible à évaluer) qui ne peuvent rivaliser avec les avantages structurels que l'urbanisme souterrain peut offrir.

18. S. Barles et S. Jardel (2005) notent à ce sujet que dans le cas de Paris, « le centre commercial des Halles, initialement dédié au haut de gamme, a dû adapter son offre à un public issu au mieux des classes moyennes car accédant au Forum [des Halles] par le réseau de transports publics », ce qui confirme la forte connexion entre les espaces souterrains et la captivité des usagers des réseaux de transport en commun.

6.2.1 TOD et hiérarchie fractale

En partie élaboré par l'architecte américain P. Calthorpe (1992, 1993) dans le cadre du nouvel urbanisme¹⁹, le concept de *Transit oriented development* (TOD)²⁰ vise avant tout à réduire les problèmes de circulation et de congestion urbaines en favorisant l'utilisation des transports en commun par une réorganisation de la forme de la ville et une limitation de son étalement. Reprenant l'idée de *pedestrian pocket*²¹, il propose de densifier des « centres » et des « sous-centres » urbains (comprenant une diversité fonctionnelle assez riche : logements, emplois et commerces, etc.) à une distance de marche raisonnable des principaux nœuds de connexion au système de transport collectif, afin d'y favoriser les déplacements piétons, mais sans exclure complètement l'automobile.

À partir de différentes expériences américaines menées sur cette base, R. Cervero *et al.* (2002) ont défini le *Transit oriented development* à partir des trois éléments qui en forment le noyau dur : (i) la mixité fonctionnelle, (ii) la proximité aux stations de transport en commun et (iii) l'incitation à leur usage ; auxquels s'ajoutent trois notions complémentaires que l'on retrouve dans la majorité des projets : (i) la compacité de la forme urbaine, (ii) un environnement agréable pour les cyclistes et les piétons, et (iii) la proximité aux espaces publics. Ainsi, la mixité et la compacité de l'espace permettraient l'émergence de quartiers dont le cadre de vie, conçu autour des espaces publics, des mobilités douces²² (bicyclette et marche à pied) et du commerce de proximité, correspondrait à l'échelle du piéton, mais permettrait de dépasser rapidement cette échelle par un accès aisé aux modes de transport en commun les plus rapides, adéquats pour des déplacements plus longs (mais également plus vertueux d'un point de vue environnemental) dans l'ensemble de l'agglomération. Autour de ces accès, chaque quartier s'organiserait en trois

19. Le nouvel urbanisme (*New urbanism*) est un mouvement qui prend sa source en Europe et se développe aux États-Unis à partir des années 1980. Il promeut un aménagement urbain réconcilié avec l'urbanisme classique et libéré du « tout-automobile », basé sur un retour à la marche à pieds et aux formes architecturales traditionnelles locales (*traditional neighborhood design*), qui sont censés conférer aux villes un cadre de vie plus agréable, en adéquation avec les préoccupations environnementales actuelles ; cf. [Calthorpe P., 1993, *The Next American Metropolis : Ecology, Community, and the American Dream*, Princeton Architectural Press, 176 p.]. En France, son intérêt a notamment été débattu par la revue du Mouvement anti-utilitariste dans les sciences sociales (Caillé, 1999).

20. Le concept est également connu sous d'autres appellations (*Transit village*, *Transit focused development*, *Transit supportive urban*, *Transit relative development*, *Transit friendly development*, *Transportation oriented development*, *Transit adjacent development* ou encore *Smart growth*), mais TOD semble aujourd'hui la plus communément admise ; cf. www.transitorienteddevelopment.org. P. Calthorpe (1993) définit le concept de la manière suivante : « a mixed use community within a typical 2000 feet walking distance of transit stop and core commercial area. The design, configuration, and mix of uses emphasize a pedestrian-oriented environment and reinforce the use of public transportation, without ignoring the role of automobile. TODs mix residential, retail, office, open space, and public uses within comfortable walking distance, making it convenient for residents and employees to travel by transit, bicycle or foot, as well as by car ».

21. L'idée de « poche piétonnière » élaborée par P. Calthorpe associe des constructions mixtes de faible et de haute densité sur un espace réduit (45 ha par exemple) qui favorisent la marche à pied ; cf. [Kelbaugh D. (ed.), 1989, *The pedestrian pocket book : a new suburban design strategy*, Princeton Architectural Press, 80 p.]. Dans ce sens, elle peut être rapprochée de l'idée de Cité-jardin proposée en 1898 par E. Howard, et reprise par de nombreux urbanistes du mouvement culturaliste (Choay, 1965).

22. Plutôt que de mobilités *douces* (qualifiées de la sorte parce qu'elles ne polluent pas), on parle désormais également de mobilités *actives*, pour signifier qu'elles contribuent à l'exercice et à l'entretien physiques de la population et qu'elles peuvent donc contribuer à l'hygiène et à la santé publique, *a contrario* des modes de transport motorisés, puisqu'elles nécessitent une dépense énergétique plus importante de la part des usagers ; cf. [Hiron B. et Mariotto M., 2012, *Vélo et marche : modes doux ou modes actifs ?*, CERTU, www.certu.fr], lien consulté en décembre 2012.

couronnes radioconcentriques de densité décroissante :

1. Jusqu'à 500 mètres environ autour des stations de transport en commun, le cœur du quartier est aménagé de manière compacte et mixte. Chaque pôle de transport important (infrastructures les plus lourdes et les plus efficaces : bus, tramway, métro, train de banlieue, etc.) est localisé au centre du quartier ; ces pôles apparaissent également comme les points de convergence du réseau de mobilités douces (desserte locale), dont le gabarit des rues doit être calibré pour fournir un cadre de vie plus agréable ;
2. De 500 à 1000 mètres, l'habitat est essentiellement composé de bâtiments résidentiels collectifs qui prennent la forme de plots ou de maisons en bandes. Cette zone privilégie des modes de déplacements motorisés de faible portée, alternatifs à l'automobile individuelle (triporteur, voiture électrique, taxi, auto-partage, etc.), permettant de rejoindre rapidement le pôle de transport en commun central, situé à une distance acceptable ;
3. Au-delà de cette distance, l'espace est réservé à une occupation résidentielle peu dense, essentiellement composée de maisons individuelles, où l'automobile reste le mode de transport privilégié pour les déplacements quotidiens. Son utilisation, qui concerne une population réduite par la faible densité résidentielle, est facilitée par les alternatives présentes dans les deux premiers cercles, qui contribuent à réduire la congestion. Elle est de surcroît utile pour rejoindre les lieux qui ne sont pas directement desservis par le système de transport en commun.

Appuyée sur une gradation des constructions et des aménités autour des nœuds de communication les plus importants, les principes généraux du TOD rappellent évidemment la Théorie du champ urbain émise par P. Claval (1981). Plus tôt, cette idée a d'ailleurs également été décrite par les gradients de densité tels qui ont été mis en graphiques par S. Korzybski (1952) ou en équation par C. Clark (1951) :

$$d_x = O a e^{b_x - c_x^2} \quad (6.1)$$

Dans cette équation, O est le centre de la ville et d_x la distance au centre ; a , b et c sont des paramètres permettant d'adapter la courbe aux ruptures identifiées dans le gradient de densité, ruptures qui correspondent généralement, dans le temps comme dans l'espace, à une évolution technologique des modes de transport²³. D'un certain point de vue, **il n'y a donc rien de nouveau dans la proposition TOD ; sauf que la démarche de P. Calthorpe est inversée : il ne s'agit plus de constater l'existence de gradients de densité urbaine *ex post*, mais de les programmer *ex ante* par une intervention urbanistique fondée sur les différentiels offerts par la technicité des modes de transport actuels**. L'équation 6.1 est applicable dans un cas comme dans l'autre, même si l'échelle n'est évidemment pas la même.

Cette organisation en « gradients centraux » prévoit implicitement une hiérarchisation des densités urbaines, en lien avec la forme du réseau de transport en commun : chaque nœud de transport est considéré comme un centre mais son importance en matière d'urbanisation potentielle est liée à son niveau de desserte et de fréquentation. Ainsi, l'importance et la nodalité des

23. Pour plus de renseignements à ce sujet, on se référera à l'exemple donné par C. Marchetti (1991) à partir de l'exemple de Berlin (cf. p. 65), qui montre comment la technique de déplacement influence la taille de la ville, mais sans faire référence à la notion de densité.

espaces qui environnent chaque station permettent immédiatement de distinguer les « centres » des « sous-centres », voire des « sous-sous-centres ». Dans ces espaces stratégiques, la densité est nécessairement très élevée puisqu'il s'agit d'une part d'y concentrer la majorité des logements et des activités (espace dense dans un rayon de 500 mètres) et d'autre part d'y organiser les échanges modaux entre les zones piétonnières et les infrastructures techniques complexes que représentent les systèmes de transport en commun. Pour réaliser cette organisation, de nombreux projets font appel à une architecture verticale, selon un schéma qui rappelle l'urbanisme de dalle ou celui des Halles à Paris. Dans la plupart de ces projets ²⁴, l'espace est pensé selon une logique qui se calque sur l'ergonomie des postes de travail, et construit sur différents niveaux connectés par des passerelles ou des liaisons verticales (ascenseurs, escaliers mécaniques, etc.).

Au-delà de la verticalité rendue quasi obligatoire par la densité et la complexité de ces espaces centraux, leur hiérarchie peut également être mise en rapport avec la théorie des lieux centraux de W. Christaller (1933), transposée à l'échelle intra-urbaine. En effet, selon W. Christaller, l'armature urbaine n'est pas uniquement issue des vicissitudes de l'histoire, mais s'organise hiérarchiquement en fonction de l'offre que propose chaque région. En bas de la hiérarchie, les villages sont nombreux et ne proposent qu'un petit nombre de commerces de base, auquel le recours est souvent très fréquent (une boulangerie, un café, etc.) ; ils se localisent à égales distances les uns des autres, et se trouvent relativement proches. En haut de la hiérarchie, la métropole est seule à commander l'espace régionale et dispose de tous les types de biens, même ceux auxquels le recours est rare. Entre les deux, différents niveaux de villes (sept en tout dans la théorie de W. Christaller) proposent différents niveaux de services, dont le nombre est inversement proportionnel à la distance qui les sépare. L'ensemble s'organise sous la forme d'hexagones emboîtés qui couvrent régulièrement et hiérarchiquement l'espace régional, selon un schéma généralement bien connu des géographes et des chercheurs en sciences régionales.

À partir de ces éléments, P. Frankhauser *et al.* (2007) ont proposé une lecture fractale de la hiérarchie des espaces urbains, partant du principe que la logique des lieux centraux vaut également dans les agglomérations actuelles, qui « occupent des territoires développés autour d'une ville-centre, et contiennent aussi souvent d'autres villes de tailles différentes, des communes péri-urbaines, rurales, des espaces agricoles et naturels, etc. [et] correspondent donc à un système de peuplement rassemblant différents types et niveaux de fonctions ». En suivant cette base analogique, ils proposent de compléter le schéma de W. Christaller par une approche multifractale ²⁵ fondée sur la figure d'un tapis de Sierpinski ²⁶ qui met en valeur les proximités urbaines en fonction de la fréquence de recours aux commerces et aux services. Selon les auteurs ²⁷, l'organisation

24. On citera par exemple les projets américains de la gare de Miami (Floride) ou de Winston-Salem (Caroline du Nord), dont une description est référencée sur le site www.transitorienteddevelopment.org (lien consulté en novembre 2012), qui présente de nombreux projets complémentaires alliant TOD et construction en trois dimensions de l'espace architectural.

25. Bien qu'ils soient fondamentaux pour comprendre la démarche générale, nous ne développons pas ici les aspects mathématiques de cette proposition. Nous focalisons uniquement sur la dimension conceptuelle qui en découle du point de vue de l'urbanisme.

26. Le tapis de Sierpinski est une fractale qui porte le nom du mathématicien (W. Sierpinski (1882-1969)) qui l'a « fabriqué ». Son principe de construction consiste à découper un premier carré en neuf carrés secondaires égaux selon une grille de trois par trois, puis à supprimer le carré secondaire central. Cette opération est répétée « à l'infini » sur les huit carrés restants (cf. http://fr.wikipedia.org/wiki/Tapis_de_Sierpiński).

27. À notre connaissance, la seule tentative de validation de ce modèle fractal a été apportée par C. Tannier *et al.* (2012a, 2012b), qui ont étudié l'impact de l'urbanisation sur la connectivité des habitats écologiques et l'accessibilité aux aménités urbaines (commerces et services). Les simulations montrent que les scénarios de développement résidentiel fractals apparaissent à peu près équivalents à un développement modérément compact, soit

théorique proposée par ce nouveau schéma devrait alors permettre (i) de réduire les flux de déplacement, (ii) d'optimiser l'accessibilité aux aménités urbaines et rurales, et (iii) de préserver les coulées vertes à l'intérieur de la ville²⁸. Pour ce faire, l'approche mobilise un accès privilégié aux réseaux de transport en commun ferrés (RER ou tram par exemple), en partie appuyé sur l'exemple du projet *Bahn.Ville* (L'Hostis *et al.*, 2010) qui apparaît également comme une proposition TOD adaptée au contexte des villes européennes. Ici, les liens qui relient les centres de niveau 1, 2 et 3 peuvent en effet se calquer sur un réseau de transport en site propre, les stations formant le noyau de développement de ces centres. L'ensemble de ces travaux montre qu'il existe un lien important entre la théorie des lieux centraux de W. Christaller (1933), l'approche fractale de l'urbanisation proposée par P. Frankhauser *et al.* (2007) et le concept TOD tel qu'il est défini par R. Cervero *et al.* (2012) ou R.D. Knowles (2102).

Avec tous leurs points communs, ces approches ne sont évidemment pas sans lien avec la réalité de l'espace géographique. En effet, comme ont pu l'écrire C. Cauvin et H. Reymond (1985) à partir des travaux de M.F. Dacey *et al.* (1974), ces considérations sur l'organisation de l'espace ne sont pas indépendantes de la dimension sur laquelle elles interviennent : ils le montrent en comparant les propriétés du modèle de W. Christaller sur un espace à une, puis à deux dimensions (une ligne puis une surface) suivant une logique qui vaudrait tout autant pour la ville fractale que pour le TOD. En effet, la « puissance » de la surface, comparé à celle de la ligne, est efficace avant tout parce qu'il se déploie en 2D. Préalablement, H. Reymond (1981) avait d'ailleurs déjà montré que la « puissance » géographique d'une organisation spatiale augmente en même temps que le nombre de dimensions de l'espace qui le supporte : la théorie de Christaller, tout comme la ville fractale et le concept de TOD, ne sont possibles que parce que la surface terrestre est bidimensionnelle, et qu'ils peuvent s'y inscrire en 2D. Dans le cadre du transfert ergonomique proposé au § 5.2.2 (dont on a montré qu'il pouvait se fonder sur une organisation en 3D), cette évidence conduit naturellement à poser la question de savoir dans quelle mesure les approches fractale et christallérienne, comme le TOD, pourraient être favorisées par une prise en compte tridimensionnelle de l'espace géographique des villes, en dépassant l'échelle réduite de l'architecture. Ceci nous conduit à une proposition théorique pour concevoir un espace urbain répondant à une fractalité transsurfactive, dont l'intérêt doit avant tout être considéré d'un point de vue ergonomique.

6.2.2 Ergonomie urbaine : une proposition théorique

L'idée d'envisager la ville et l'urbanisme par rapport aux sphères aériennes et souterraines, et non plus seulement comme une surface, revient à considérer les espaces urbains en trois dimensions. Pour en saisir l'intérêt, on peut recourir à la théorie des graphes et montrer sans

des résultats plus mitigés que ne le laisserait penser la présentation théorique du modèle.

28. Notons que P. Frankhauser *et al.* (2007) pour l'approche fractale, comme R. D. Knowles (2012) pour l'approche TOD, fondent une partie de leur réflexion sur l'image des doigts de gant (*Finger plan*) utilisée pour caractériser la forme urbaine de Copenhague (*Skitseforslag til engsplan for Storkøbenhavn*) (dont les digitations le long des principaux axes de transport laissent la place à de larges coulées vertes qui « aèrent » la ville des périphéries jusque dans les espaces du centre-ville) qui se marie autant avec l'une qu'avec l'autre. Dans l'intervalle, cette notion de coulée verte a été intégrée dans la législation française par l'intermédiaire des trames vertes et bleues (les trames bleues étant aux espaces en eaux ce que les trames vertes sont aux espaces végétaux) telles qu'elles apparaissent dans les lois issues du Grenelle II de l'environnement (cf. www.developpement-durable.gouv.fr/-La-Trame-verte-et-bleue,1034-.html, lien consulté en février 2013), ce qui confère une actualité française évidente au modèle.

trop de difficultés que le passage au volume (3D) permet d'emblée d'égaliser les configurations les plus efficaces en 2D. Pour ce faire, considérons 8 lieux (des villes ou des quartiers d'une même ville) qui peuvent être reliés entre eux par un réseau d'une longueur totale de 12 unités de mesure. Topologiquement, plusieurs solutions sont possibles pour y parvenir sur une surface : la configuration A présentée sur la Figure 6.3 ne contient qu'une seule possibilité de circuit (entre les points 2-3-5-4) ; la configuration B augmente la connexité du graphe en proposant trois circuits (4-5-7-8, 4-8-7-1-2-3 et 4-5-7-1-2-3-4) ; la configuration C maximise le nombre de circuits (6 circuits connectés par le point central 1, soit 15 circuits au total) ; la configuration D organise les lieux en trois dimensions sous la forme d'un cube²⁹. Dans tous les cas, le nombre de lieux et de liens sont identiques, mais l'efficacité réticulaire de l'ensemble varie considérablement : les lieux sont de mieux en mieux connectés les uns aux autres et l'accessibilité de chacun d'entre-eux augmente. L'intérêt du cube est lui aussi immédiatement révélé puisqu'il offre une configuration topologique à peu près équivalente à C, mais avec l'avantage considérable d'occuper une surface au sol largement réduite.

Cependant, alors que C résulte d'une réflexion et d'un choix qui ne sont pas évidents *a priori* (organisation d'une configuration en cercle, façon Bororo (cf. p. 49), quelque part sur la surface terrestre), l'efficacité de D est de nature strictement géométrique : la qualité des espacements est contenue dans la forme même du cube, c'est-à-dire dans la réalisation d'un espace géographique en trois dimensions. En extrapolant, on peut en conclure qu'une ville organisée en 3D est d'emblée au minimum aussi efficace (du moins du point de vue de la connectivité des lieux par les réseaux) que la meilleure des villes organisées en 2D, mais plus économe en surface. L'ajout d'une dimension agit ici comme un multiplicateur : passer de la ligne à la surface revient à multiplier les lignes possibles ; le passage de la surface au cube permet quant à lui de multiplier les surfaces (comme l'indiquent les hachures sur la Figure 6.3) et de « créer » artificiellement celles qui répondent aux besoins de l'urbanisation mais qui ne sont pas données au départ par la « nature » de la surface terrestre. De ce fait, l'intérêt de la 3D ne doit pas uniquement être considéré en termes de connectivité des réseaux : la verticalité agit également comme un générateur de surfaces au sein desquelles les éléments contenus se disposent en étages ou en strates, selon des hauteurs et des épaisseurs variables (à définir selon leur fonction et leur niveau de recours) qui peuvent être connectées par des liaisons transsurfiques.

On retrouve dans ces éléments théoriques une idée proche des enseignements de l'ergonomie pour l'organisation en trois dimensions des postes de travail, qui offre un argument supplémentaire à la verticalité urbaine³⁰, et qui conduit à envisager de nouvelles possibilités d'urbanisme dans le cadre d'une ville tridimensionnelle. Mais, comme le rappelle L. Mumford (1961), parler d'une ville en trois dimensions (ou de ville tridimensionnelle) pour qualifier ce genre d'organisation verticale est inapproprié dans la mesure où la ville et le monde, par définition, sont tridimensionnels :

29. Le nombre de circuits de cette configuration n'est pas calculable dans la mesure où le cube doit être considéré comme un graphe non-planaire (représentable dans un plan sans qu'un arc n'en croise un autre) et non d'un graphe planaire (les arcs se croisent dans différents plans) comme dans les exemples A, B et C.

30. Ceci ne va toutefois pas sans soulever un problème de fond. En effet, si l'on suppose vraie aussi pour le volume la position de H. Raymond (1981) indiquant que ne pouvant occuper la même place, il est nécessaire de les espacer, le passage de la configuration C à D (Figure 6.3) n'est pas autorisé d'une manière aussi simple que celle que nous présentons ici. Tous les enfants qui ont fabriqué un cube en papier connaissent le problème : sur un plan, le cube a au départ la forme d'une croix dont il s'agit de replier les parties et de coller les angles les uns avec les autres. Ainsi, deux angles séparés sur le plan se retrouvent unis en 3D par la colle et occupent désormais la même place. Cette contradiction, en apparence, suggère une redistribution des lieux dans le cube et un nouvel arrangement de leur séparation en contiguïté.

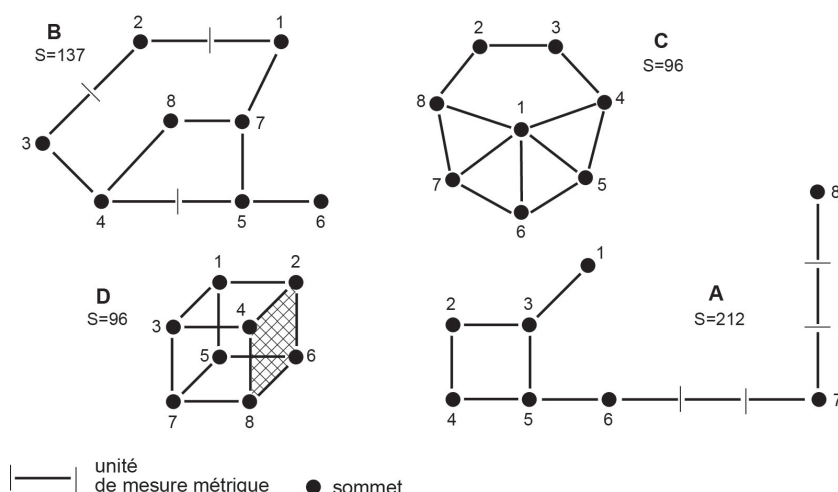


Figure 6.3 – « Pouvoir » du volume par rapport à la surface

Plusieurs configurations permettent de connecter 8 lieux à partir d'un réseau de 12 unités métriques : la configuration A est plutôt linéaire alors que B et C se déploient en surface et augmentent la connexité de l'ensemble (S indique la somme des distances de tous les points vers tous les points). La configuration du cube (D) présente un niveau de connexité identique à C mais occupe une place largement réduite en surface (J.P. Antoni, adapté en volume de H. Reymond (1981)).

« la description d'une cité ne saurait être réduite aux données d'un espace à deux dimensions : en effet, ce n'est que dans la troisième dimension, avec les dessins du relief et du mouvement, qu'apparaissent clairement les rapports esthétiques, et dans la quatrième, celle de la durée, que les relations institutionnelles se développent ». Le terrain de la ville tridimensionnelle étant sémantiquement « occupé » *de facto* par la ville réelle, il est nécessaire de qualifier différemment la proposition qu'il est possible de formuler à partir de ces conclusions.

Ce « détail » sémantique est en partie à l'origine du concept d'Urbanisation transsurfacique à synergie multistratée (UTSM) proposé en 1998 par H. Reymond, et résumé par la formule « Ville tridiastatique »³¹ (l'adjectif est construit à partir du préfixe *tri* et du grec *diastasis*, que l'on pourrait traduire par « étendu dans l'espace »), qui dépasse l'idée de ville tridimensionnelle en insistant sur son développement raisonné en trois dimensions, sous la forme d'une enveloppe et non uniquement des trois axes X , Y et Z . L'urbanisme souterrain, à la suite des travaux d'E. Utudjian et des expériences canadiennes ou japonaises (§ 6.1.2), peut évidemment y jouer un rôle important. Mais il s'accompagne d'une vision plus large de la verticalité qui s'appuie en partie sur les réflexions de M. Ragon et sur les expériences menées par certains urbanistes

31. Selon H. Reymond (1998), le véritable concept associé à la ville tridiastatique correspond à un « Système d'urbanisation transsurfacique à genèse volumique et à stratification synergique ». Par souci de simplification, il est résumé par UTSM.

français³² ou encore par les constructivistes soviétiques³³. Pour M. Ragon (1986), l'architecture spatiale telle qu'elle est techniquement permise par la maîtrise du fer et de l'acier, doit en effet être dépassée par un *urbanisme spatial* : « le gratte-ciel est typiquement une construction faite au 20^e siècle par des hommes qui pensaient 19^e siècle [...] il s'élève indépendant, non relié aux autres buildings ; obligeant d'un édifice à l'autre, à emprunter au moins deux ascenseurs et la rue qui les rejoint [...] l'architecture du gratte-ciel est une architecture certes spatiale mais c'est une architecture fermée [...] si l'on relie différents gratte-ciel à différentes hauteurs par des places ou des passerelles, voilà l'architecture spatiale qui commence à devenir un urbanisme spatial ». L'idée revient donc à développer l'urbanisation future selon la forme d'une sphère ou d'un cube (3D) plutôt que celle d'un disque ou d'un carré (2D), en maximisant les connexions verticales, dont on a montré qu'elles sont au minimum équivalentes à l'optimum en 2D (Figure 6.3).

S'il est compatible avec les enseignements de l'ergonomie, le concept de ville tridiastatique est également intéressant parce qu'il semble cohérent avec la fractalité ou le TOD évoqués précédemment. Il apparaît même fortement complémentaire. Le recours aux espaces souterrains est en effet utile pour maximiser la centralité de certains lieux en densifiant leurs fonctions au dessus et en dessous de la surface, à l'image des centres commerciaux en sous-sol qui se développent sous les grandes stations de transport en commun ferré (exemples tokyotes ou des Halles à Paris). Ainsi, l'urbanisme vertical permet de poursuivre le développement des villes même si la surface sature, et donc de créer une hiérarchie urbaine qui n'aurait plus comme limite que la technique d'exploitation de la verticalité.

De surcroît, ce qui est possible en plein l'est aussi en vide. En effet, le concept fractal proposé par P. Frankhauser à partir du tapis de Sierpinski nécessite parfois que certains espaces soient laissés vacants pour maximiser la bordure bâti/non bâti ou favoriser la pénétration de coulées vertes jusqu'au centre. Or, au centre des agglomérations surtout, l'intégralité de l'espace est souvent bâti, ce qui rend le modèle applicable essentiellement dans les franges urbaines qui seront construites dans le futur (l'espace périurbain). Dans son développement actuel, l'hypothèse sur laquelle se fonde le concept de ville fractale, malgré son intérêt et son lien avec le TOD, ne vaut donc que pour l'urbanisation à venir, c'est-à-dire uniquement pour l'écotone qui se développe entre la ville et la campagne. Le recours à la 3D offre une solution opérationnelle à ce problème. En effet, certains auteurs ont identifié les bâtiments qui, par leurs fonctions (des fonctions *chthoniennes* selon H. Reymond (1998)), et à l'instar de l'enfouissement des premiers étages de certains bâtiments japonais pour la préservation du paysage, pourraient être « translatés » à différentes profondeurs sans que cela ne nuise à leur utilisation, ce qui conforterait les modèles TOD et fractal jusque dans les centres urbains, par un recours plus systématique à l'urbanisme vertical.

32. On citera par exemple les travaux de l'architecte hongrois (installé à Paris) Y. Friedman (cf. [Friedman Y., 1970, *L'architecture mobile*, 159 p.] ou encore la maquette d'habitations-patios publiée en 1965 par huit architectes français (cf. [Andraut *et al.*, 1965, Manifeste, *L'architecture d'aujourd'hui*, 119, pp. 88-90]) et dont on trouve une déclinaison pour le quartier de Lyon Part-Dieu dans l'ouvrage de R. Gagès (cf. [Gagès R., 1988, *Les chemins de la modernité*, Mardaga, 145 p.] : une trame structurée par des liaisons verticales qui condensent les fluides et que l'on relie par une trame horizontale, soit un jeu de liaisons en trois dimensions autour desquelles les surfaces fonctionnelles se développent de manière multifonctionnelle (bureaux, commerces, logements, etc.), selon une logique de mixité qui rappelle celle du TOD (cf. p. 130).

33. Le constructivisme est une branche de l'architecture moderne, active en Union soviétique dans les années 1920 et 1930, fondée sur une ingénierie et une technologie avancées, dans le but de produire un urbanisme communiste. On lui doit en particulier le projet *Narkomtiashprom* des frères Vesnines pour la Place rouge de Moscou, ou la réalisation de la place de la liberté à Kahrkov en Ukraine (anciennement place Dzerzhinsky, du nom du précurseur du KGB, police politique communiste), notamment le Palais de l'industrie. Dans les deux cas, les réalisations relient un ou plusieurs bâtiments par l'intermédiaire de passerelles et de toits-terrasses situés à différents niveaux.

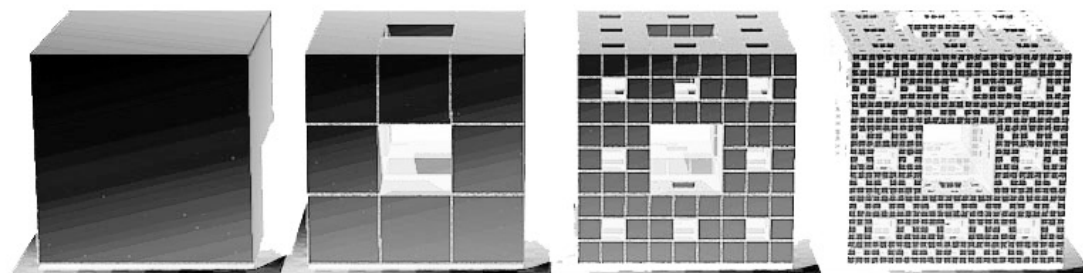


Figure 6.4 – Éponge de Menger

L'image présente les quatre premiers stades de la construction d'une éponge de Menger (également appelée éponge de Menger-Sierpinski), considérée comme une expansion en trois dimensions du tapis de Sierpinski (et parfois d'un ensemble de Cantor, également appelé poussière de Cantor). Si l'organisation fractale du tapis et de l'éponge est strictement identique, les pleins du premier sont remplacés par des vides dans la seconde, sans quoi l'éponge ne tient pas debout (Source de l'image : Wikipedia).

D. J. Boivin (1989) estime par exemple que trois strates souterraines, découpées en fonction de leur accessibilité et tenant compte des techniques d'excavation et d'étayage actuelles, pourraient accueillir différents éléments :

1. Le proche espace se situe « immédiatement sous nos pieds » et n'est épais que de quelques mètres ; il contient souvent déjà des canalisations, des câbles et des conduites divers et pourrait accueillir plus généralement de nombreuses activités commerciales (supermarchés, discothèques, cinémas, restaurants, etc.) ;
2. Le moyen espace se situe entre 10 et 200 mètres de profondeur ; il pourrait contenir certains éléments d'industrie légère, des voies de transport et des espaces de stationnement, des entrepôts, des laboratoires et des centres de recherche, des studios d'enregistrement de radio et de télévision, des installations de chauffage urbain, etc. ;
3. Le lointain espace (grandes profondeurs en dessous de 200 m) pourrait être réservé aux centrales hydro-électriques ou nucléaires, au stockage des déchets industriels et radioactifs, aux réservoirs d'hydrocarbure ou d'autres liquides, etc.

Selon ces recommandations, qui s'appuient en grande partie sur les expériences contemporaines de l'urbanisme souterrain au Canada, il devient possible de libérer une superficie bâtie importante en surface, selon le schéma du tapis de Sierpinski ou selon une logique spatiale (plan d'aménagement par exemple) qui se calquerait sur celle des coulées vertes et/ou de maximisation de la bordure bâti/non bâti, sans impacter la centralité des quartiers de ville, ni générer d'étalement urbain, et donc de mobilités supplémentaires³⁴.

34. Du moins, de mobilités horizontales, car ce système générerait automatiquement une augmentation des mobilités verticales, à laquelle correspond une consommation énergétique (essentiellement due aux systèmes d'escalator et d'ascenseurs) qui reste difficile à évaluer. Quoiqu'il en soit, ces systèmes de « voyages verticaux » s'associent aujourd'hui à un mode de transport en commun (ce qui limite ses nuisances individuelles) et fait preuve d'évolutions notables pour la préservation de l'environnement, au même titre, et globalement avec les mêmes arguments, que le monde de l'automobile : le « *Way to Green* » de la société OTIS (cf. www.otis.com/site/fr/Pages/OtisandtheEnvironment.aspx, lien consulté en juin 2013), leader mondial de la fabrication d'ascenseurs et d'escaliers mécaniques, optimise actuellement les conditions de production et de fonc-



Figure 6.5 – Exploitation des pentes et des sols artificiels

L'image est issue d'un projet japonais non réalisé : les toits des immeubles sont utilisés comme des plateformes pour le passage des routes et les immeubles se superposent en gradins sur les parois des « volumes » urbains (Source : [Schimizu, 1988, *Into the Earth*, *Shimizu bulletin*, 56]).

D'un point de vue théorique, cette perspective peut être illustrée par la figure de l'éponge de Menger (Figure 6.4), qui présente une expansion verticale du tapis de Sierpinski : elle prend la forme d'un cube percé de vides de tailles différentes, régulièrement espacés. Il est certes très difficile d'imaginer une forme urbaine à partir de ce solide. Le Palais de l'industrie de la Place de la liberté de Karkhov (réalisé en Ukraine dans le contexte politique et artistique du constructivisme soviétique) apparaît ici comme un exemple remarquable qui s'en rapproche. Cet exemple aérien peut être complété par d'autres projets, notamment souterrains, qui valorisent l'urbanisme vertical et son intérêt pour l'aménagement urbain. En effet, comme le fait remarquer R. Sterling (1993), toute création de structure souterraine (dont la superficie initialement occupée en surface peut être consacrée à d'autres fins) entraîne la création d'un nouvel espace de surface, désormais artificiel, dont les pentes latérales (nouvelles surfaces générées par la logique du cube) offrent des possibilités inédites d'exploitation. Poussée à l'extrême, et couplée avec une construction d'immeubles en gradins sur les pentes (une solution déjà identifiée par E. Hénard et envisagée par W. Gropius), cette option permet d'utiliser le plafond des immeubles comme des sols pour des nouveaux espaces urbains, et de créer des quartiers de ville sur plusieurs niveaux, comme l'illustre la Figure 6.5 qui, aussi irréaliste qu'elle puisse paraître au départ, s'approche sensiblement de l'éponge de Menger, en dépassant l'échelle du bâtiment ou du groupe de bâtiments. L'urbanisme qui en résulte n'est pas fondamentalement différent de celui qu'a proposé E. Utujian (1952), mais il a l'avantage de le compléter par une approche conceptuelle renouvelée

tionnement de ses appareils dans cet objectif (cf. [De Almeida *et al.*, 2012, Energy-efficient elevators and escalators in Europe : An analysis of energy efficiency potentials and policy measures, *Energy and buildings*, 47, pp. 151-158]).

qui associe l'urbanisation fractale et le TOD et développe de nouveaux arguments pour une ergonomie urbaine en trois dimensions.

Ainsi, pour schématiser le couplage « TOD-3D-Fractal » qui émerge de nos conclusions, nous proposons l'illustration donnée par la Figure 6.6, qui constitue une sorte de métaphore heuristique du projet d'ergonomie urbaine que nous souhaitons résumer et soutenir ici. Trois idées principales sont représentées sur cette image :

1. La hiérarchie urbaine est concrétisée par la juxtaposition de centres (1), de sous-centres (2) et de sous-sous-centres (3) qui s'organisent de manière fractale comme un tapis de Sierpinski ou une éponge de Menger. En même temps qu'ils accueillent une densité de population importante, ils centralisent les points d'entrée au réseau de transport ;
2. Le réseau de transport relie tous les centres avec un niveau de desserte (capacités et fréquences) proportionnel à leur taille (i, ii, iii et iv). Cette connexion globale n'est toutefois pas totale : elle s'appuie sur le centre principal qui devient un lieu de passage et de recours fondamental pour rejoindre les centres plus petits. Ces derniers ne sont pas tous reliés entre eux afin de préserver les « coulées » (B) et de maximiser la bordure bâti/non bâti (ils pourraient en revanche être reliés en souterrain). Si la majorité des tronçons sont horizontaux, de nombreuses connexions « aériennes » (A) permettent le déploiement de l'urbanisation en 3D ;
3. La ville verticale est en partie souterraine (S) : les éléments techniques qui la font fonctionner sont répartis en sous-sol selon une logique fractale comparable à celle de la surface. Cet enfouissement libère un espace important laissé à la « nature » (N), au sein de laquelle quelques puits (P) permettent de faire entrer l'air et la lumière solaire en souterrain. Dans la hauteur, les connexions entre les centres aériens sont optimisées et s'organisent selon la logique d'un « urbanisme spatiale » (A).

Dans le cadre d'un tel projet d'ergonomie urbaine, de nombreuses réflexions restent toutefois encore à mener au sujet des réseaux de transport et des déplacements en trois dimensions³⁵, afin d'évaluer dans quelle mesure ils pourraient également être conçus, à l'instar des bâtiments, selon une logique transsurfacique. Nous ne pouvons ici qu'ouvrir des pistes permettant de dépasser l'organisation en plans successifs, et, en particulier, de conquérir l'espace aérien. En effet, si l'idée de navettes volantes à partir des toits des immeubles de H. Hénard (1911) paraît aujourd'hui dérisoire, il existe actuellement des projets concrets qui vont dans le même sens : à Barcelone, à Cologne, à Lisbonne ou à Madrid, un système de télécabines (petits modules pouvant accueillir de 4 à 40 personnes) circule en boucle sur un câble disposant d'un système de débrayage autorisant la montée et la descente aux stations à fréquence rapide (toutes les douze secondes en heures de pointe), pour des usagers qui sont aujourd'hui essentiellement des touristes ; à Medellin, à Caracas, à Rio de Janeiro, à New-York, à Portland ou à Alger, des téléphériques (grands modules d'une capacité de 30 à 200 personnes) circulent en aller-retour avec une fréquence plus

35. En s'appuyant sur la théorie de la syntaxe spatiale (*space syntax* ; Hillier, 1976), J. Ueno *et al.* (2009) ont proposé un modèle pour comprendre les déplacements de piétons dans les grandes stations de transport en commun japonaises organisées en trois dimensions par des transitions verticales complexes, montrant que les itinéraires sont clairement influencés par la visibilité des lieux, le nombre de virages et la recherche des distances les plus courtes. Par la suite, en s'intéressant aux centres commerciaux multi-niveaux, L. Zhang *et al.* (2012) ont analysé le rôle de l'entrée, du changement d'étage et des transitions verticales sur les flux de piétons ; ils en concluent que ces transitions doivent être directement connectées aux espaces « noyaux » (*core spaces*) de ces grands centres.

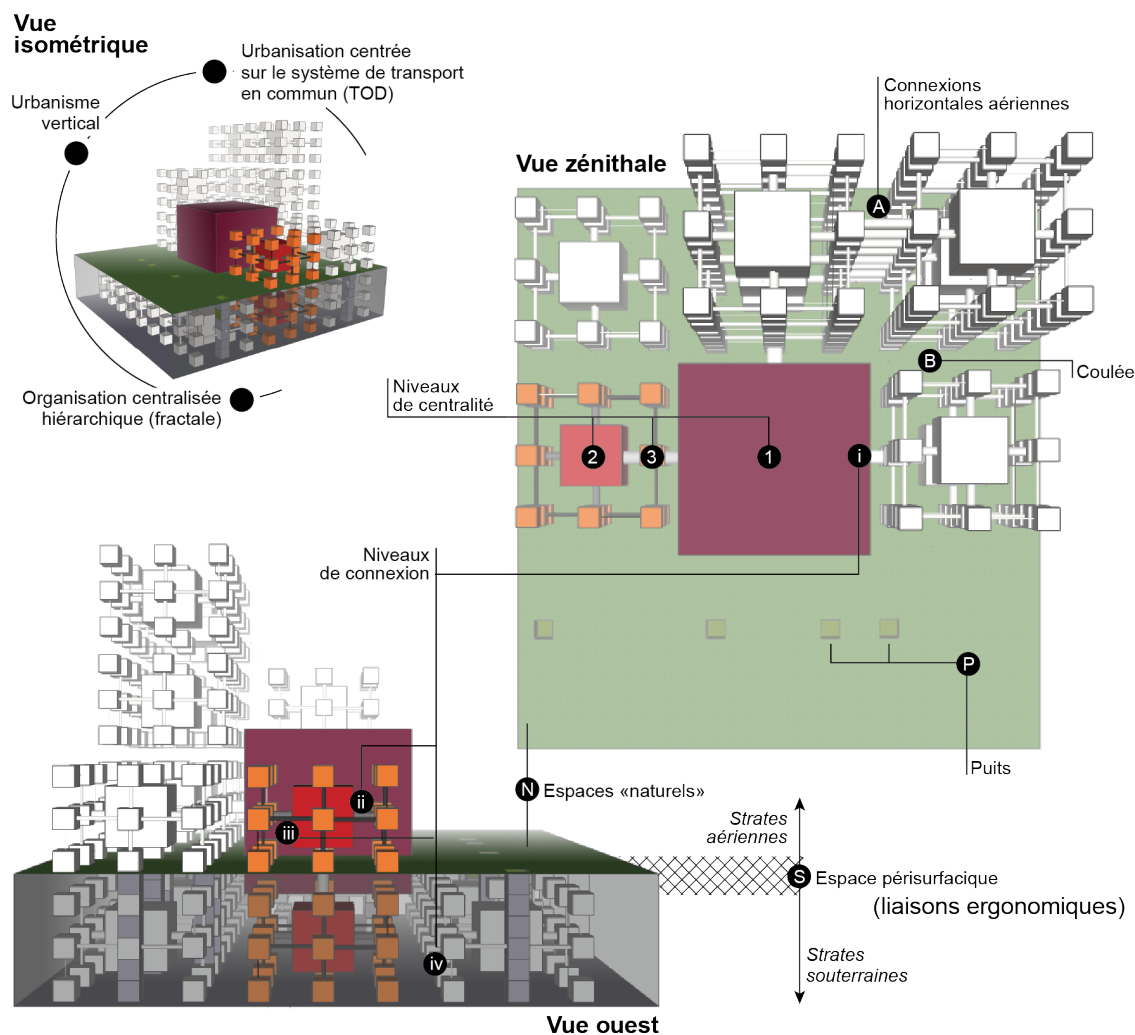


Figure 6.6 – Proposition d'ergonomie urbaine : une métaphore heuristique

Ces trois vues du même modèle 3D présentent graphiquement, sous la forme d'une métaphore, le projet géo-ergonomique couplant urbanisme vertical, organisation fractale des espaces urbains et développement hiérarchique associé aux axes de transport en commun (J.P. Antoni).

lente (toutes les huit minutes en heure de pointe), et sont généralement bien intégrés dans le réseau de transport local (Clément-Werny et Schneider, 2011, 2012).

En France, ce type de transports aériens par câble est également identifié comme une solution qui peut offrir une alternative performante pour la mobilité urbaine, notamment depuis que la loi de 2009 pour la programmation et la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, invite à réduire massivement les émissions de polluants et de gaz à effet de serre (Clément-Werny et Schneider, 2011). Outre la limitation de l'utilisation de l'automobile, l'un des principaux intérêts de ce mode de transport innovant, actuellement réservé aux stations de ski ³⁶, se situe dans

36. Sauf exception bien sûr, un téléphérique étant actuellement en construction dans la Val de Marne. Présenté au public fin 2013, cette liaison par télécabine entre Créteil et Villeneuve-Saint-Georges reliera les deux communes distantes de 4,5 km en moins de 15 minutes, sans bruit et sans émission de gaz à effet de serre, en survolant la

leur emprise au sol limitée³⁷, qui facilite la mise en place des infrastructures (en temps et en coût) et réduit la congestion des routes et l'encombrement au sol³⁸. De même, la suspension par câble permet la création d'itinéraires en lignes droites, ce qui optimise les distances à parcourir entre les lieux de départ et d'arrivée, indépendamment du tracé des rues. Ainsi, les systèmes de transport par câble peuvent rapidement rendre accessibles à moindre coût des secteurs jusqu'alors mal desservis, comme cela a été le cas à Medellín en Colombie (Brand and Dávila, 2011), mais surtout relier des lieux qui ne se situent pas au même niveau de hauteur : les sites à forte topographie (qui justifient aujourd'hui ce type d'installation, à l'instar des funiculaires, dans les espaces urbains au relief marqué) mais également les étages d'une ville aérienne dont certains bâtiments élevés nécessitent une connexion à mi-hauteur ou en terrasses (ces dernières pouvant effectivement servir de lieux d'installation pour les stations, à l'image du projet d'E. Hénard).

L'ensemble de ces spécificités pose toutefois la question de l'intégration paysagère et de l'acceptabilité sociale des lignes de transport par câble : en regardant vers l'installation, le paysage urbain est dénaturé par les câbles et peut rencontrer une opposition que l'on connaît déjà pour les tramways au nom de la conservation du patrimoine³⁹ ; depuis l'installation, le passage des usagers à proximité des espaces privés ne concerne plus seulement les rez-de-chaussée mais généralise le problème parisien du métro aérien et de l'immiscion dans la vie privée des riverains, notamment si l'installation passe à proximité de balcons ou surplombe des jardins. Comme pour l'ensemble des propositions verticales, ces propositions doivent donc faire l'objet de débats publics afin d'en peser les avantages et les inconvénients en bonne gouvernance⁴⁰.

Conclusion

S'il elle était mise en œuvre de manière massive, il est fort probable qu'une généralisation de l'urbanisation verticale engendrerait une modification de la forme urbaine, c'est-à-dire de la

RN 406 et les nombreuses voies de chemin fer qui constituent, dans ce secteur, une barrière pour les transports classiques : cf. l'article « Val-de-Marne : le futur téléphérique urbain sur les rails », paru dans *Le Parisien* du 2 mai 2012.

37. Toutefois, comme le font remarquer C. Clément-Werny et Y. Schneider (2011), les stations au sol sont assez imposantes (10x25 mètres pour les plus petites) et nécessitent des aménagements urbains spécifiques souvent délicats à intégrer d'un point de vue esthétique, notamment dans les centres-villes. Le développement de stations à embarquement en hauteur (Bolzano ou Roosevelt Island à New-York), qui permettent d'utiliser l'espace de rez-de-chaussée pour d'autres activités, apparaît ici comme une solution pour pallier ce problème.

38. Pour souligner cet avantage, il est également possible de faire référence au système de transport en commun original développé à Wuppertal en Allemagne : inauguré en 1901, le *Wuppertaler Schwebebahn* est un monorail suspendu d'une longueur de 13 km, qui calcule en grande partie son itinéraire sur le lit de la rivière Wupper à laquelle il se superpose. Il s'appuie également sur une conception multi-strates de l'espace urbain.

39. Au nom de la conservation du patrimoine, le projet de tramway présenté par la ville de Besançon a fait l'objet d'un veto préfectoral. Alerté par le Directeur national de l'architecture et du patrimoine, l'État a refusé son tracé qui demandait d'accrocher les caténaires d'alimentation électrique dans la partie sauvegardée du centre historique ; cf. l'article « Le préfet de Franche-Comté refuse le tracé du tramway » paru dans *Le Monde* du 21 septembre 2009.

40. Pour autant, ces propositions ne présentent rien d'autre qu'une adaptation pratique et locale (c'est-à-dire dans un espace concret posé sur un site et mis en mouvement par une situation) des images universelles que l'on trouve de manière récurrente dans la science-fiction, qu'il s'agisse de bandes dessinées ou de productions cinématographiques, ces dernières étant d'ailleurs globalement les mêmes que celles auxquelles nous faisons références pour souligner l'ambivalence de la ville verticale en introduction à ce chapitre. Il va sans dire que les opinions seront rapidement formées à propos de ces projets que l'imaginaire collectif accepte déjà largement de côtoyer pour son divertissement.

répartition horizontale des fonctions et des activités. En effet, pour les économistes comme pour les géographes, il est courant de considérer que la valeur des terrains est accrue dans les centres-villes, ce qui contribue à y augmenter la densité d'occupation du sol. Ainsi, l'idée d'urbaniser en-dessous et au-dessus de la surface en réfléchissant à un système de transport souterrain et aérien qui dépasserait la simple connectivité des rez-de-chaussée permettrait de maximiser cette organisation et dans le même temps de réduire l'étalement urbain, en modifiant à terme la forme de la ville, selon un modèle concentré à haute densité : « *the use of sub-surface space can help to protect the total land resource from urban sprawl by providing more efficient use of already built-up areas* » (Minnesota University, 1975). Pour autant, **cette organisation ne propose pas un simple retour à la ville dense. Elle trouve son véritable avantage par l'association de trois fondements théoriques : (i) la connexion avec les systèmes de transports (TOD), (ii) la répartition multiscale des vides et des pleins (fractalité) et (iii) une organisation tridimensionnelle permettant de souder l'ensemble dans des strates cohérentes et fonctionnelles (tridiastase).**

Cet ensemble doit en effet permettre de limiter l'étalement urbain et ses conséquences néfastes en canalisant l'urbanisation autour de pôles circonscrits et limités dans leur atteintes aux écosystèmes environnants, mais sans réduire les mobilités. Au contraire, il s'agit bien de s'appuyer sur ces mobilités, à travers les possibilités de déplacement les plus rapides, pour connecter les activités humaines au sein d'une ville dont les espaces complémentaires s'organiseraient de manière hiérarchique, en fonction du niveau de recours quotidien ou hebdomadaire des services qu'elle propose. Dans ce sens, la verticalité urbaine apparaît comme un socle fondamental pour concevoir un projet ergonomique : si l'on s'en tient à la définition de la SELF (§ 5.1, p. 97), il consiste effectivement à construire des villes conçues comme un outil ou une machine qui puisse être utilisés par le plus grand nombre avec le maximum de confort, de sécurité et d'efficacité, réduisant les atteintes physiologiques (forme et mobilités) et psychologiques (émotions, bien-être et facilité d'usage) de ses usagers, par une réorganisation de l'espace fondée sur une reconquête des trois dimensions spatiales. Nous sommes bien ici face à un projet d'ergonomie urbaine qui vise à réduire la catachrèse actuelle par un retour à une proximité qui ne s'organise plus sur une surface, mais qui demande à repenser l'espace géographique comme un volume. Au vu des exemples souterrains et aériens réalisés dans l'histoire, il est d'ailleurs indispensable de le faire, puisque c'est toujours en volume que les sociétés se sont inscrites dans leurs milieux, faisant des villes dont le développement est finalement plus sphérique que circulaire, et que l'on pourrait déjà qualifier de pré-éponges de Menger⁴¹.

41. Cette qualification de pré-éponge de Menger est d'ailleurs tout à fait banale si l'on suit la logique fractale telle qu'elle a été énoncée par B. Mandelbrot (1982). À chaque itération donnée, la forme obtenue à partir d'un initiateur et d'un générateur fractal n'est pas strictement une fractale mais une préfractale : « une fractale est un objet mathématique obtenu comme limite de la suite des préfractales quand le nombre d'itérations n tend vers l'infini » (Gouyet, 1992), même si dans le langage courant, on assimile souvent fractal à préfractal.

Conclusion

D'UN certain point de vue, il n'y a rien d'inédit dans les espaces produits par l'urbanisme vertical. Depuis l'expérience des gratte-ciel ou des centres commerciaux souterrains et les travaux plus théoriques de V. Fouchier (1995), ou même par simple déduction géométrique, on sait bien que l'empilement d'éléments les uns sur les autres permet de minimiser leur emprise au sol, et donc de gagner de la surface de plancher sans trop étaler les constructions. On le sait d'ailleurs si bien que l'on n'a pas hésité, comme nous avons tenté de l'illustrer, à recourir aux solutions aériennes et souterraines quand les nécessités de développer la ville se sont couplées avec les avancées techniques qui permettaient de le faire ; ces réalisations ont alors conforté l'idée que la ville pouvait exister autrement que comme une juxtaposition surfacique d'éléments plus ou moins connectés les uns aux autres.

Toutefois, ces développements verticaux restent ponctuels ; mis à part les travaux du Groupe d'études et de coordination de l'urbanisme souterrain (GECUS ; cf. p. 125) ils n'ont probablement jamais fait l'objet d'une *pensée verticale* préalable, ni d'un véritable projet d'urbanisation tridimensionnelle. Pour leur majorité, ils restent contraints par une approche horizontale de l'espace géographique, qui apparaît tout à fait cohérente *a priori* : rien n'est plus évident pour l'homme (comme pour ceux qui l'étudient) que de considérer les activités et l'habitat humains sur un simple plan, celui-là même qui est donné au départ comme un espace écologique, et qui s'étend sur toute la planète, c'est-à-dire sur la *surface* terrestre. Cette évidence est si banale que quand A. Dauphiné (1984) signale par exemple que « l'implantation des grandes lignes électriques qui marquent tout l'espace périurbain est décidé suivant [...] une approche purement euclidienne de la lecture des volumes urbains » pour définir les concepts-clés qui sous-tendent la notion d'espace en géographie, il n'inclut pas la troisième dimension dans sa définition. Or, l'exemple auquel il se réfère ne peut en lui-même exister que si le caractère volumique et multistraté de ce type d'implantations (les lignes électriques) est intégré. L'oubli n'est pas isolé : il n'existe à notre connaissance aucune définition de l'espace géographique ou terrestre permettant de le concevoir autrement que comme un ensemble de points, de lignes et de surfaces qui s'organisent en réseaux, en trames et en champs, toujours sur un même plan. Cette remarque vaut pour l'ensemble des définitions empiriques (Vidal de la Blache, 1948 ; etc.), théoriques (Reilly, 1931 ; Hägerstrand, 1952 ; etc.) ou axiomatiques (Beguin et Thisse, 1979) qui ont été données de l'espace géographique⁴².

42. A. Dauphiné (1984) note d'ailleurs également que l'espace géographique, qui semble pourtant faire en lui-

En mobilisant les exemples évoqués dans les pages précédentes, nous n'aurions pourtant que peu de mal à montrer que cette approche bidimensionnelle, qui sous-tend la quasi-totalité de l'analyse géographique, n'apparaît vraie qu'en partie et ne permet pas de révéler la complexité réelle de la construction de l'espace, en particulier de l'espace urbain : à toutes les époques, l'habitat humain s'est en effet développé en surface, mais également de part et d'autre de cette surface, selon des hauteurs et des profondeurs dont l'importance est fortement corrélée aux capacités techniques d'exploration et de construction de l'écoumène. À l'heure actuelle, l'histoire de cette *périsurface géographique*⁴³ n'est pas généralisée, ni même écrite : les ouvrages consacrés à l'urbanisme souterrain et aérien ne mentionnent souvent que les projets les plus marquants, parfois accompagnés de recensions plus ou moins anecdotiques (par exemple Ovenden, 2003) et très éloignées de l'exhaustivité (Barles et Jardel, 2005) ; dans tous les cas, cette histoire n'a pas fait l'objet d'une approche théorique et porte sur un objet d'étude qui ne semble pas identifié en tant que tel. Ce constat n'est pas véritablement étonnant ; il correspond à ce que l'on pourrait analyser comme une contradiction du *facteur humain* (pour employer le vocabulaire ergonomique) : en tant qu'être tridimensionnel (qui fonctionne bel et bien en trois dimensions), l'homme a su développer l'aérien et le souterrain selon différentes techniques, mais sans véritablement raisonner dans l'axe vertical. L'homme fait donc en quelque sorte de la 3D sans le savoir, ni même vouloir le reconnaître, selon une logique qui relève peut-être elle aussi d'une « loi du moindre effort » (Zipf, 1949), mais verticale cette fois.

Ainsi, nous soutenons l'idée que malgré son développement majoritairement surfacique, la ville existe depuis toujours sous la forme d'un volume périsurfacique, et que l'axe vertical qui en guide les constructions doit être intégré parmi les constituants fondamentaux de l'espace géographique : les villes actuelles sont déjà, en quelque sorte, des pré-éponges de Menger (cf. Chapitre 6). Cette intégration de l'axe vertical est d'autant plus essentielle que les volumes terrestres ne sont pas isotropes et ne constituent pas un « simple » ajout de dimension à la somme des généralités géographiques connues : s'il est habituellement plus aisé de construire en hauteur qu'en profondeur, il semble que les projets les plus éloignés en distance de la surface terrestre relèvent paradoxalement plus de la profondeur que de la hauteur. Cette intuition (qui nécessiterait d'être appuyée sur une étude exhaustive et systématique) suggère que la verticalité de l'espace (telle qu'elle est actuellement appropriée par l'homme) fonctionne selon une logique de proximités et d'espacements qui, en même temps qu'elle s'en rapproche, diffère de celle que nous connaissons pour les arrangements horizontaux, et qui ouvre un champ de recherche renouvelé à partir des connaissances actuellement acquises dans ce domaine. À l'image de l'éponge de Menger, la généralisation d'un urbanisme vertical modifierait en profondeur la logique de ces arrangements. Elle demanderait par exemple de jouer *contre*⁴⁴ la force naturelle de la gravité, selon un dispositif

même l'objet d'étude de la géographie, est souvent le grand absent des concepts clairement définis de la discipline, en particulier parmi les géographes se revendiquant d'une démarche empirique et descriptive (cf. [Derruau M., 1961, *Précis de géographie humaine*, Colin ; Meynier A., 1969, *Histoire de la pensée géographique en France*, SUP ; George P., 1970, *Dictionnaire de la géographie*, Presses universitaires de France].

43. Nous empruntons l'expression à H. Reymond (2013) qui l'emploie pour compléter la notion de pédosphère urbaine étudiée par S. Barles (1993), notion qui traite, comme son nom l'indique (du grec *pedon*, le sol), essentiellement des espaces souterrains.

44. De la même manière qu'il est plus aisé de construire dans la sphère aérienne que dans la sphère souterraine, il semble plus crédible (et pas nécessairement pessimiste) d'assimiler l'urbanisme vertical à une sorte de lutte permanente *contre* plutôt qu'une association *avec* la gravité. Pour autant, l'exemple des cheminées d'usine qui portent le plus haut possible les extractions de fumées ou d'air viciés en créant un paysage urbain typiquement vertical appuient leur architecture sur les lois physiques de la circulation des gaz chauds qui, dans son principe (*ça monte*), est identique à la gravité (*ça descend*).

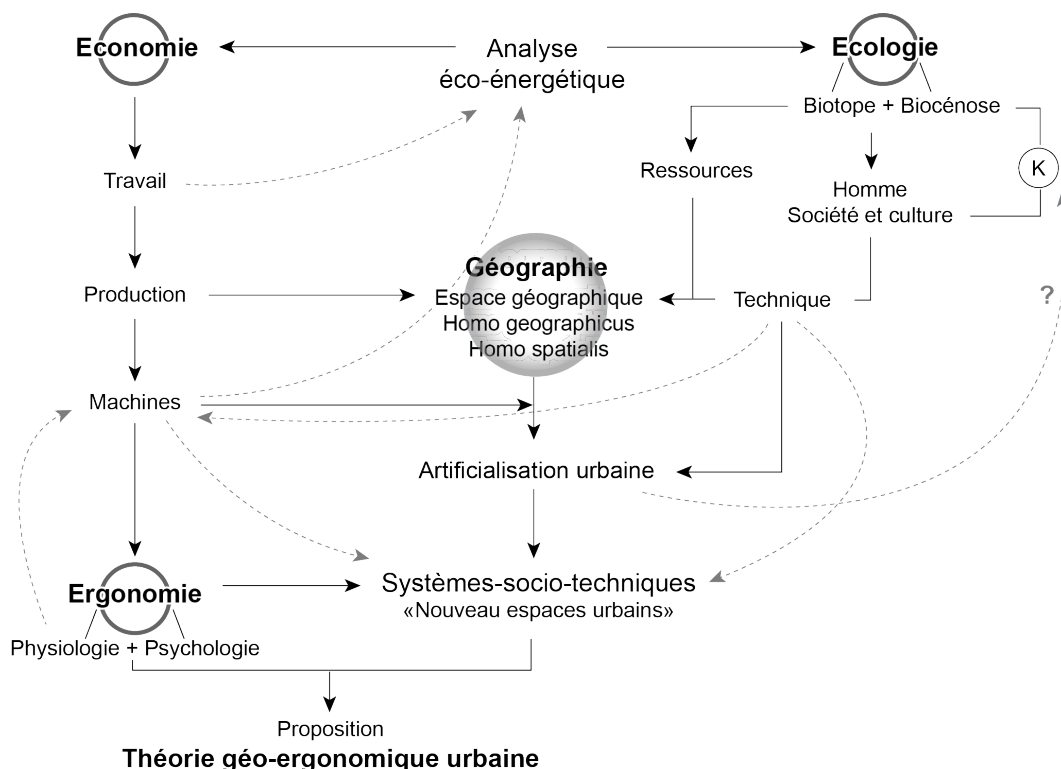


Figure 6.7 – Résumé graphique II

qui nécessite d'être inventé, produit de toute pièce par les sociétés humaines, comme un stade peut-être ultime d'artificialisation de leur habitat. Or, nous avons tenté de montrer qu'en se fondant sur une logique spatiale (au même titre que la géographie ou quasiment), **l'ergonomie est justement une discipline qui aide à penser concrètement ce type de dispositifs : en intégrant les trois dimensions de l'espace, elle apparaît comme une ressource fondamentale pour organiser efficacement le couplage des strates souterraine, surfacique et aérienne, et pourrait conduire à la conception d'espaces ergonomiques de grande échelle.**

La question qui se pose alors, dans une époque où les principes du développement durable appellent très clairement à renouer avec les enseignements de l'écologie pour le retour à une cohabitation écosystémique raisonnée à l'échelle planétaire, est évidemment de savoir si le fait de creuser encore l'écart important qui existe déjà entre la ville et les écosystèmes « vrais » (Ramade, 2002b) est une bonne ou une mauvaise chose. C'est également cette question qui sous-tend la conclusion générale, et qui ouvre des pistes de recherche pour une théorie géo-ergonomique de la ville.

Conclusion générale

Modéliser et visualiser : une nécessité

A FIN de pallier une partie des problèmes de la ville étalée actuelle et d'anticiper les possibilités de dysfonctionnements catachrétiques à venir, nous avons proposé de réfléchir à une théorie géo-ergonomique reposant sur la généralisation de dispositifs techniques avancés, incluant une hiérarchie des centralités (fractalité urbaine ; Frankhauser, 2012) et des moyens de transports urbains (*Transit oriented development* ; Calthorpe, 1992) dans un cadre volumique transsurfacique (ville tridiastatique ; Raymond, 1998). Cette proposition, que nous avons tenté de résumer par une image métaphorique (Figure 6.6), est-elle bonne ou mauvaise ? On ne peut évidemment répondre sans nuance à cette question dont les arguments relèvent probablement plus de l'opinion que de la démonstration, en particulier à l'heure où les instruments politiques incitent à renouer avec des modes de vie plus « naturels », à travers les notions de développement durable et d'éco-conception de l'habitat, toutes deux fortement médiatisées (cf. l'introduction de la Partie 1 ; p. 16). Les dispositifs ergonomiques proposés conduisent en effet à une accentuation de l'artificialisation de l'habitat, qui peut sembler à contre-courant. La réponse que nous souhaitons apporter est donc mesurée et s'organise selon le schéma « *oui* », ça peut être une bonne chose, mais « *à condition que* ».

« *Oui* » d'abord, ça peut-être une bonne chose (ou du moins pas pire). Car il faut revenir sur l'une des conclusions intermédiaires préalablement avancées (Chapitre 2) : l'altération des équilibres écologiques fait partie des actions « normales » de l'homme. Il en tire sa subsistance et elle lui permet de survivre, ce qui, nous l'avons souligné, place l'homme devant une contradiction importante mais incompressible : il est nécessaire de modifier les écosystèmes qui nous font vivre, parfois de manière importante, pour construire un espace géographique viable. Tout acte géographique constitue en lui-même une source justifiée de désordre écosystémique, et les conséquences écologiques des aménagements qui en résultent peuvent être considérées comme globalement indépendantes de la fonction de ces aménagements. En effet, même s'ils produisent des images très antagoniques d'un point de vue paysager, un terrain de golf n'est pas fondamentalement différent d'une usine de production de papier ; les deux occupent un espace totalement artificialisé, puisent dans les écosystèmes ce dont ils ont besoin et y rejettent ce dont ils ne se servent plus. Le lotissement de maisons individuelles ou la station multimodale de transport relèvent également du même principe. Aussi, il n'y a pas fondamentalement de raison à ce qu'un dispositif ergono-

mique tel que nous le proposons soit plus néfaste à l'environnement qu'un éco-quartier, sachant que, dans un cas comme dans l'autre, planter une rangée d'arbres sur un parterre engazonné ne suffit pas à reconstruire un équilibre écosystémique.

En revanche, l'argumentaire prend une autre dimension si l'on change d'échelle et que l'on analyse les rapports entre la ville et les écosystèmes qui la bordent. En observant la ville dans sa totalité (et même si, comme nous avons essayé de le montrer, cette dernière ne peut être considérée comme un écosystème en tant que tel ; Chapitre 3), nous avons souligné que son expansion au sein des espaces auto-régulés environnants conduisait à l'émergence d'une sorte d'écotone périurbain, dont on sait mal encore de quoi il se compose exactement, mais dont on peut d'ores et déjà saisir l'intérêt et les enjeux, environnementaux bien sûr, mais également économiques et sociaux. On ne connaît pas la durée de vie de cet écotone. Comme le signale H. Reymond (2011), on sait en revanche qu'au sein de la biosphère, les règles de successions écosystémiques conduisent généralement à l'absorption des plus faibles par les plus forts (Ramade 2002), ce qui condamne l'environnement à s'effacer sous la pression de l'urbanisation ; on constate depuis longtemps déjà que l'étalement urbain apparaît comme une forme d'envahissement de la campagne par la ville, et que cette succession (I. Duvernoy (2000) emploie le mot *aggression*) n'est pas à double sens : l'espace agricole périphérique n'est pour la ville qu'un espace en attente qu'elle pourra occuper au rythme de ses besoins d'extension (Prost, 1994). Cette position, que nous avons défendue plus haut sur la base réappropriée des enseignements « classiques » de l'écologie (cf. la conclusion de la Partie 1), demande ici à être confrontée à un point de vue plus neuf en écologie, qui mobilise les notions d'*autopoïèse* et de *clôture opérationnelle*.

Proposé au début des années 1970 par F.J. Varela *et al.* (1974), le concept d'autopoïèse décrit la capacité propre aux systèmes (biologiques ou non)⁴⁵ de se produire eux-même de façon permanente, en interactions (elles aussi permanentes), afin de maintenir leur structure globale malgré le changement possible de certains des éléments qui les composent. L'autopoïèse propose ici un développement dynamique à ce que l'idée de *climax* (état théorique final stable d'une succession écologique ; Clements, 1936) ne permettait de concevoir que de manière plus ou moins statique⁴⁶, développement qui n'est pas sans conséquences sur la définition des écosystèmes eux-mêmes. En effet, selon la logique autopoïétique, chaque système doit être entendu comme un réseau de processus de production qui se régénère continuellement par un jeu d'interactions et de remplacements constituant du système en lui-même. Il en découle (i) qu'une « machine autopoïétique est un système à relations stables dont l'invariant fondamental est sa propre organisation (le réseau de relations qui le définit) » et (ii) qu'il existe en tant qu'« unité concrète dans [son] espace, en spécifiant le domaine topologique où il se réalise comme réseau ». En défi-

45. À l'issue de la théorie de l'autopoïèse, H.R. Maturana et F.G. Varela (cf. [Maturana F.G., Varela F.J., 1992, *The Tree of Knowledge. The Biological Roots of Human Understanding*, Shambhala Publications Inc, 272 p.]) ont en effet développé le paradigme épistémologique de l'*énaction* (façon de concevoir les choses à partir de la manière avec laquelle les organismes, comme l'esprit humain, s'organisent eux-mêmes en interaction avec leur environnement), qui, d'abord appliqué aux neurosciences, entend explicitement dépasser les contradictions propres à l'ensemble des sciences cognitives. Les apports de l'*énaction* concernent aujourd'hui autant les sciences cognitives que la biologie ou l'intelligence artificielle.

46. Notons que pour pallier ce problème, et en particulier pour intégrer l'intervention perturbatrice de l'homme sur les écosystèmes, J. Bardat (cf. [Bardat J., 1993, *Phytosociologie et écologie des forêts de Haute-Normandie*, Publication de la Société Botanique du Centre-Ouest]) ou J.C. Rameau (cf. [Rameau J.C. *et al.*, 1998, *Flore Forestière Française. Guide écologique illustré. Tome 1 : Plaines et Collines*, Institut pour le développement forestier]) ont proposé les notions théoriques de *méta-climax* et de *maturation* afin d'intégrer la dynamique associée aux impacts des perturbations extérieures.

nissant un domaine topologique de relations, cette position est d'autant plus intéressante qu'elle fait directement intervenir l'espace dans la définition des systèmes, en même temps qu'elle pose immédiatement la question de leurs limites : la frontière topologique devient un élément essentiel pour comprendre comment l'identité des écosystèmes se maintient malgré (ou grâce à) des perturbations dans leur environnement. Pour qualifier cette frontière, F.J. Varela *et al.* (1974) recourent à la notion de *clôture opérationnelle*, nécessaire à l'émergence de l'identité, de l'unité et de l'autonomie des systèmes, l'ensemble étant mû par des relations dynamiques (le tout se crée dans un même mouvement) et interactives (le système crée sa frontière en même temps que sa frontière le crée).

Outre sa dimension écologique, la notion de clôture opérationnelle n'est pas sans intérêt pour l'aménagement urbain. En effet, si comme nous l'avons proposé, la ville correspond à un système sociotechnique qui peut s'associer à une machine (Chapitre 4), l'identification de sa limite spatiale apparaît comme un garant de son identité, de son unité et de son autonomie. Or, l'entre-ville du périurbain actuel (que T. Sieverts (2004) qualifie de *Zwischenstadt*) ne permet pas d'identification claire de cette limite : s'il peut effectivement être assimilé à un écotone d'un genre nouveau, il ne joue pas le rôle de clôture opérationnelle que le « ban »⁴⁷ urbain a gardé jusqu'au 19^e siècle ; et cette absence de limites est à l'origine d'un problème de fonds pour la définition des espaces urbains. En effet, comme le souligne par exemple M. Lussault (2007) il n'existe plus aujourd'hui dans nos sociétés de culture visuelle légitime pour qualifier la ville ni, donc, pour l'aménager⁴⁸ : l'action urbaine se perd dans le brouillard de ce que l'Urbain, au sens qu'en donne F. Choay (1993), est devenu. De ce fait, les géographes et les aménageurs se retrouvent souvent dans une situation plus ou moins schizophrénique (*sic*) : d'une part, ils sont tributaires de l'imagerie de la ville classique qui reste « un mode expressif dominant, une référence commode et recherchée dans un cadre patrimonial et identitaire » ; d'autre part, ils se trouvent confrontés à l'apparition d'une nouvelle économie de la ville, qui se cherche de nouvelles images et une nouvelle esthétique (Lussault, 2007). D'une part, ces images se construisent aujourd'hui avec un certain flou artistique, conséquence immédiate de l'absence de limite claire ; d'autre part, elles se dessinent le plus souvent en dehors des sphères de la recherche urbaine : au cinéma, dans les jeux vidéos, à la télévision, etc⁴⁹. Dans ce contexte, pourquoi ne pas appuyer l'urbanisation future sur la figure d'une éponge de Menger plutôt que sur celles du cinéma de science-fiction ? Cette remarque vaut d'autant plus que l'on se sera efforcé de montrer dans quelle mesure une ville verticale, au moins en partie, peut apporter une réponse ergonomique à la question de son étalement et conforter le développement du Système hommes-machines selon une logique à la fois

47. Rappelons qu'historiquement, le ban correspond au territoire sur lequel s'applique la juridiction ou le commandement d'une ville. Il s'étend de ce fait largement au-delà des espaces urbanisés, et contient ce qui deviendra la banlieue (littéralement la *lieue du ban*, espace d'environ une lieue qui constituait le territoire de la ville sans être la ville en elle-même) à partir de la fin du Moyen-Âge.

48. Pour illustrer la ville et son évolution, M. Lussault (2007) se réfère à quatre images : (i) la cité limitée par ses remparts, qui en font une entité discrète au sein de l'espace agraire qui l'entoure, (ii) la ville en tant que telle, qui conserve les principes d'organisation de la cité mais qui dépasse ses murailles et qui se recompose socialement autour de la révolution industrielle, (iii) l'urbain, plus large, plus hétéroclite et plus difficile à saisir, qui se fonde désormais sur les mobilités et les réseaux, à l'instar du document *Plug-in City* produit en 1964 par le groupe d'architectes Archigram (P. Cook), et (iv) le film *Lost in translation* de S. Coppola (2003) dans lequel la ville apparaît comme « un milieu dans lequel on s'immerge sans repères, sans qu'une position de surplomb (la principale protagoniste regarde la ville depuis les plus hauts étages d'un hôtel de Tokyo) ne permette de se donner de cadre, d'identifier des lignes de force ».

49. Ces images ont été évoquées dans le § 6.1 pour illustrer les crispations liées à l'urbanisme souterrain, et de manière plus générale, à l'urbanisme vertical.

TOD et fractale, logique dont on a bien saisi qu'elle visait à maximiser la bordure bâti/non-bâti sans disséminer l'habitat ni miter son environnement (Frankhauser *et al.*, 2008), ce qui revient *de facto* à consolider la clôture opérationnelle urbaine.

Conceptuellement, l'éponge de Menger peut donc servir de figure pour réfléchir à la forme des villes de demain, dont l'image, comme l'explique M. Lussault (2007) n'est pas encore identifiée en tant que réalisation archétypale. Cela étant, cette image ne doit évidemment pas être envisagée comme un *plan* (entendu ici dans le sens de planification) mais comme un cadre théorique dont on sait par avance qu'il ne pourra être réalisé dans sa forme stricte, puisqu'il apparaît immédiatement contraint par le tissu urbain hérité du passé et par la réglementation qui vise à contrôler politiquement son avenir, comme l'a dit F. Choay (1980) : « Dès lors que sont évaluées les limites des certitudes scientifiques à quoi [la théorie d'urbanisme] peut prétendre, que nous reste-t-il, pour édifier nos espaces, des fabuleux textes instaurateurs ? Essentiellement les deux procédures antithétiques de la règle⁵⁰ et du modèle, qui acculent à un choix redoutable entre deux conceptions de l'édification, l'une hédoniste, érotique, permissive, l'autre corrective, disciplinaire, médicale ». Nous n'irons pas jusqu'à soutenir qu'il y a quoi que ce soit d'érotique dans une éponge de Menger ; mais c'est une figure plaisante pour réfléchir à une théorie ergonomique urbaine : elle permet d'envisager des réponses raisonnées aux questions que pose le fonctionnement des Systèmes hommes-machines urbains, et demande, évidemment, à être confrontée à la *praxis* des réalités du terrain et aux capacités techniques permettant aujourd'hui sa mise en œuvre.

« À condition que » ensuite. Car la proposition n'en est qu'au stade de l'énoncé, et non de la démonstration. À cette étape, comme le fait H. Reymond (1998) à propos de la ville tridias-tatique, il est nécessaire de poser une question « préalable mais importante » : « étant donné les critères et les outils que nous utilisons pour connaître actuellement cette strate [tridiastatique], que pouvons nous-dire sur l'établissement de sa forme et le suivi des variations de ses limites ? ». D'une manière ou d'une autre, répondre à cette question revient à prévoir (*pré*-voir) ce que provoquerait l'enfouissement des équipements urbains les plus lourds, à anticiper les comportements individuels dans des espaces fortement tridimensionnels, à évaluer l'impact de la hauteur des passerelles et des transports aériens sur les paysages urbains, à tester l'efficacité d'une politique de rabattement des transports sur les nœuds d'un système TOD, à dessiner la forme d'espaces urbains hiérarchisés et équipés selon une logique fractale, etc. Le moyen le plus simple d'y parvenir serait évidemment de tenter l'expérience *in vivo*, juste « pour voir » : enfouir, élever, connecter, observer les conséquences. Mais une solution plus crédible (et certainement moins risquée) consiste également à recourir à la simulation, c'est-à-dire à reproduire informatiquement le fonctionnement du Système homme-machine urbain, pour tester le (ou les) scénario(s) de l'éponge de Menger en y introduisant des dispositifs nouveaux ou des processus originaux. Comme le diraient les ergonomes : *Don't speculate... Simulate!* (cf. p. 110). Reste à voir si les réponses apportées par ces simulations se rangeront du côté des avantages ou des inconvénients de l'urbanisme fractal et vertical. Dans tous les cas, ils permettront de construire

50. Dans cet ouvrage, F. Choay (1980) ne fait pas directement référence au code de l'urbanisme quand elle parle de la *règle*. Les exemples qu'elle prend pour illustrer son idée se situent à une époque où il n'existe pas de législation pour l'urbanisme et l'aménagement urbain (hormis sous la forme de prémisses). Aussi, la règle qu'elle évoque est avant tout une somme de contraintes techniques pour la construction des bâtiments. L'interprétation que nous en faisons dans le contexte qui nous intéresse ici (celui du présent et du futur de l'urbanisation) constitue de ce fait une extrapolation qui intègre le code de l'urbanisme actuel, sans pour autant trahir, à notre avis, ce qu'elle a voulu dire.

une réponse argumentée à la question du départ, « toutes choses égales par ailleurs ». Dans ce contexte, « *à condition que* » signifie qu'il est nécessaire d'évaluer *ex ante*, dans l'état actuel de nos connaissances, les conséquences possibles d'une ergonomie urbaine verticale et la réalité sociale des aménagements qui en découlent, dans le cadre d'une démarche hypothético-déductive scientifiquement construite.

Toutefois, comme le rappellent J.R. Emshoff et R.L. Sisson (1970) ou encore A. Dauphiné (1987), ce genre de simulations est généralement indissociable de la modélisation sur laquelle elle s'appuie⁵¹. Qu'est-ce alors que la modélisation⁵² ? La définition que nous retenons ici peut désormais être considérée comme classique en géographie : elle se fonde sur celle de P. Haggett et R.J. Chorley (1967) et présente un modèle comme « une représentation simplifiée d'une réalité, qui lui donne du sens et permet de mieux la comprendre ». Au centre de cette représentation, le monde n'existe donc plus comme une réalité tangible, mais prend la forme d'une connexité formelle limitée, explorable par l'intermédiaire de symboles, de règles et de processus simplifiés (Meadows, 1957). Un modèle n'est donc rien d'autre qu'une structuration simplifiée de la réalité, qui présente des caractéristiques ou des relations supposées significatives, dans une forme généralisée, c'est-à-dire une approximation finalement très subjective qui ne tient pas compte de toutes les observations ni de toutes les mesures. En conséquence, un modèle doit être (i) suffisamment simple pour être correctement manipulé et compris par ceux qui l'utilisent, (ii) suffisamment représentatif pour qualifier correctement le monde auquel il veut correspondre et (iii) suffisamment complexe pour caractériser avec une certaine exactitude le système qu'il étudie (Antoni, 2013). Défini de la sorte, chaque modèle éclaire une partie du monde comme un projecteur éclaire une scène, plongeant automatiquement d'autres parties dans l'obscurité (Bambrough, 1964) ; il possède son propre champ de conditions, à l'intérieur duquel il est valable, et en dehors duquel il ne correspond plus à rien (Skilling, 1964).

Cette sélection inhérente à l'exercice de modélisation implique naturellement que l'on définisse de manière précise comment se structurent les caractéristiques et les relations que l'on compte étudier, ce qui revient à fournir une ontologie détaillée du système modélisé. C'est ici que les choses se compliquent. Car, comme nous l'avons évoqué dès l'Introduction générale, mises à part quelques propositions d'*homo geographicus* (Reymond, 2009, 2011 ; Frankhauser *et al.*, 2012 ; Reymond et Cauvin, 2013), il manque toujours une ontologie à la géographie (Berque, 1996), ce qui pose un problème évident pour définir conceptuellement la ville et ceux qui l'habitent dans leur environnement spatial. Ici, nous nous fondons donc sur celui que D. Pumain et J.B. Racine (1999) appellent *homo spatialis*⁵³ ; il apparaît, en condensé, comme une sorte d'homme rationnel

51. Comme N. Gilbert et K.G. Troitzsch (2005), nous considérons en effet que la simulation est l'un des aboutissements pratiques de la modélisation et permet d'en exploiter les résultats selon la logique de l'aide à la décision. Dans ce sens, la modélisation et la simulation apparaissent également comme deux phases à part entière de la démarche scientifique expérimentale (Popper, 1968).

52. Employé dans de nombreux cas, le mot *modèle* apparaît fortement polysémique et son sens diverge suivant qu'on l'entend dans le langage courant ou dans le langage scientifique. On utilise par exemple le mot *modèle* comme un nom pour désigner une représentation, ou comme un adjectif pour qualifier un degré de perfection, ou encore comme un verbe qui signifie démontrer, ou montrer comment le monde s'organise (Ackoff *et al.*, 1962) ; H. Skilling (1964) conçoit un modèle comme une théorie, comme une sorte de loi, ou encore comme une hypothèse, voire même une simple idée plus ou moins structurée ; pour d'autres, il apparaît comme une relation ou plus formellement comme une équation ou un système d'équations plus ou moins complexes. Les modèles possèdent probablement chacune de ces propriétés.

53. Selon D. Pumain et J.B. Racine (1999), l'épistémologie de la géographie distinguerait quatre modèles pour représenter l'homme depuis la fin de la deuxième guerre mondiale : (i) l'homme prométhéen qui aménage et organise l'espace à la manière des ingénieurs, (ii) l'*homo spatialis* auquel nous faisons particulièrement référence

pour lequel la position relative dans l'espace est déterminante et qui a pu être analysé sous l'angle de la recherche du moindre effort (Zipf, 1949) en luttant contre la friction des distances (Warntz, 1967) afin de maîtriser le pouvoir de la surface (Reymond, 1981) sans perdre de vue la dimension psychologique qui le conduit à s'organiser selon différentes sphères de proximité (Hall, 1955 ; Moles et Rohmer, 1978). À l'instar d'*homo æconomicus*, embauché à moindre frais par les économistes pour construire leurs hypothèses, *homo spatialis* possède les attributs et les qualités nécessaires pour être implémenté dans un modèle (automate cellulaire, système-multi-agents, etc.) qui permet d'évaluer ses comportements, ses réactions et sa satisfaction dans un environnement urbain virtuel et contraint, au sein duquel toutes les hypothèses et tous les scénarios (ou presque) peuvent être testés.

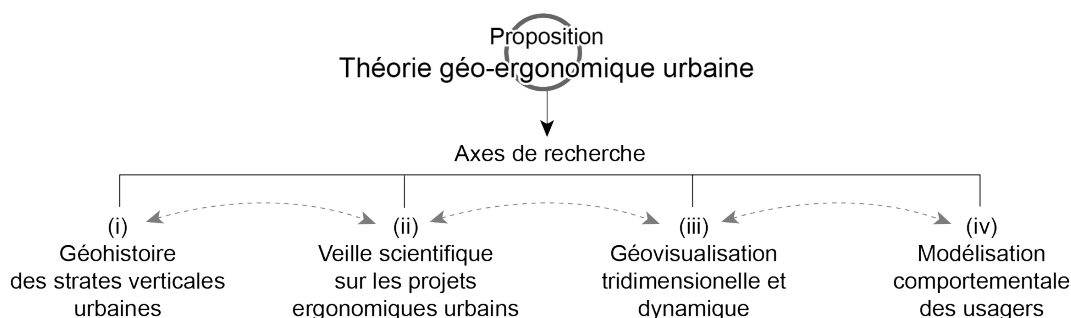


Figure 6.8 – Axes de recherche

C'est globalement sur cette définition, ou du moins selon cette logique, que le modèle MobiSim (Antoni et Vuidel, 2011) a été conçu : il apparaît aujourd'hui comme un outil opérationnel pour modéliser les comportements individuels d'agents en simulant le développement urbain et les mobilités dans une démarche intégrée, actuellement définie par l'acronyme LUTI (*Land Use and Transport Integrated models* ; Wegener, 1994). C'est en se fondant sur ce modèle que nous proposons une réponse à la deuxième question posée dans l'Introduction générale (p. 11) : les modèles de simulation ne doivent pas être considérés uniquement comme des outils d'aménagement et de planification territoriale, accolés au cadre légal des procédures administratives permettant cette planification. En tant que modèles, ils reposent sur une abstraction de la réalité à aménager, et produisent une image virtuelle du fonctionnement possible de cette réalité. Ils invitent à l'extrapoler, certes sous contraintes, mais quasiment à volonté. Il n'y a donc aucune difficulté particulière à y introduire des scénarios d'anticipation, afin d'évaluer des solutions qui ne sont pas immédiatement applicables. Il s'agit alors de les utiliser aussi dans une logique théorique qui relève de la philosophie des *serious games*⁵⁴. En d'autres termes, **les modèles de simulation**

ici, (iii) l'homme en tant qu'acteur de sa géographie, fonction de la « minorité » et du « groupe » auxquels il appartient, et (iv) l'homme comme être subjectif, dont la réalité ne peut être analysée indépendamment de sa représentation du monde. On est encore loin d'une formalisation de l'*homo geographicus* synthétisant cet ensemble, qui correspondrait, selon les auteurs à une « construction théorique qui vise à rendre compte à la fois de la dimension cognitive et de la dimension sociale de l'homme dans le cadre de l'agir territorial ». Plaidoyer pour la prise en compte des arrangements verticaux de l'espace (cf. Partie 2) ne simplifie évidemment pas ce problème.

54. Selon la terminologie proposée par C. Abt (cf. [Abt C., 1970, *Serious games*, Viking Press]), un « jeu sérieux » est une activité qui combine l'entraînement ludique à l'apprentissage pédagogique ou informatif, selon un procédé largement diffusé par le *spielkrieg* de l'armée prussienne au 19^e siècle, mais qui s'appuie désormais sur le calcul

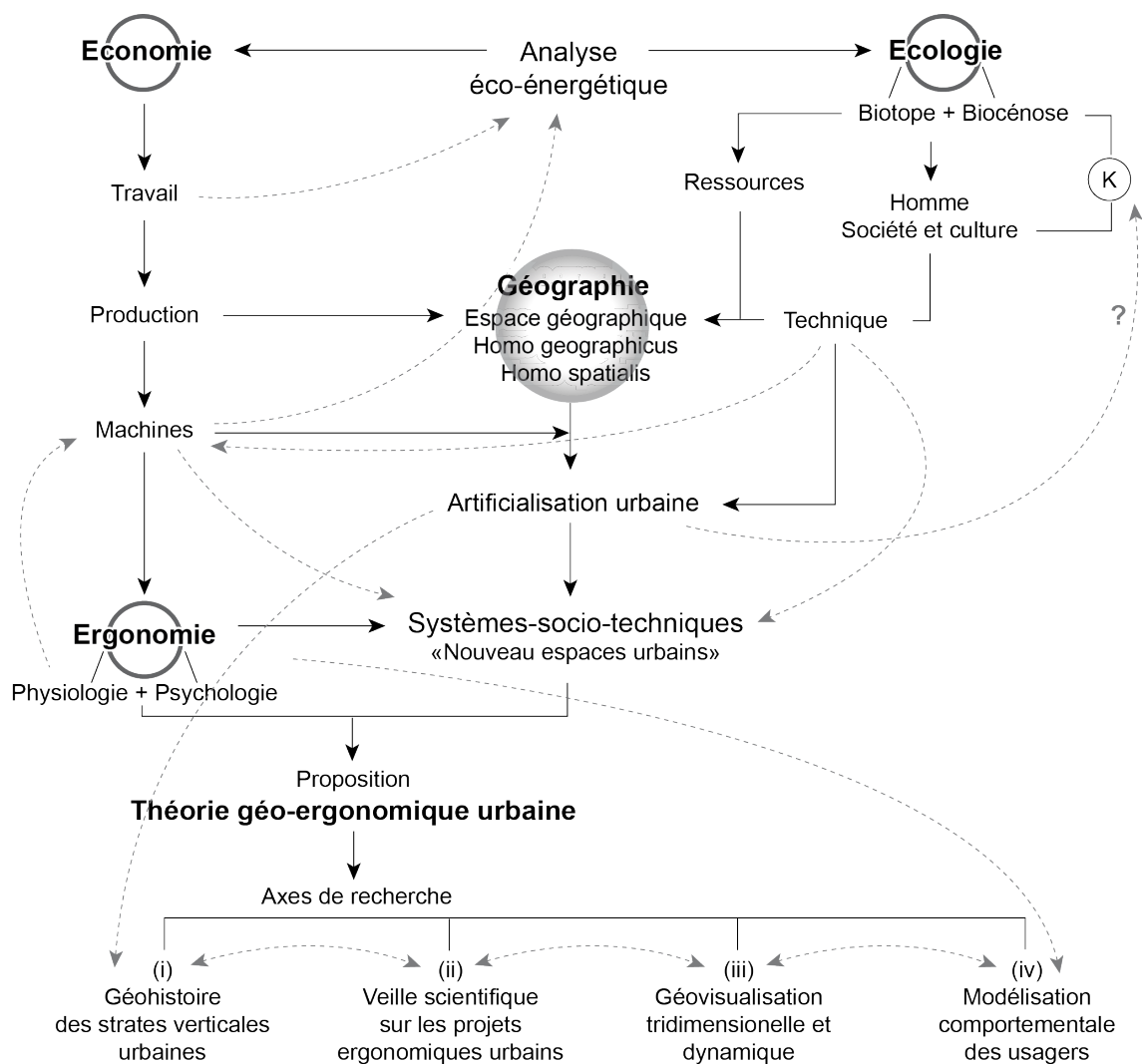
sont par définition les outils les plus adéquats pour tester toutes les hypothèses actuelles et à venir, et il serait probablement dommage de s'en priver pour proposer des anticipations audacieuses, dont ils offriraient une mesure des avantages, des inconvénients et du niveau concret de faisabilité.

Dans le cadre d'une anticipation simultanément fractale, TOD et tridiastatique des systèmes urbains, l'utilisation de MobiSim ouvre aujourd'hui quatre pistes de recherches parallèles mais interdépendantes pour consolider nos connaissances sur la validité d'une théorie ergonomique urbaine (Figure 6.8) : (i) la description géohistorique de l'exploitation des strates verticales urbaines ; (ii) la veille scientifique sur les projets d'aménagement innovants proposant une ergonomie (verticale ou non) des espaces urbains ; (iii) la géovisualisation de ces espaces (impérative pour comprendre leur dynamique tridimensionnelle, dans le cadre d'une construction cartographique analytique) et (iv) la modélisation avancée des comportements des usagers confrontés à leur utilisation en termes de mobilités quotidiennes et de choix résidentiel. Dans leurs combinaisons, ces quatre pistes constituent un programme de recherche en elles-mêmes.

informatique. Il s'agit donc de se former et d'apprendre par le jeu, en utilisant les logiciels de simulations comme des plateformes pour générer des scénarios, et pour naviguer à l'intérieur de ces scénarios en analysant les situations et les simulations produites dans ces mondes virtuels.

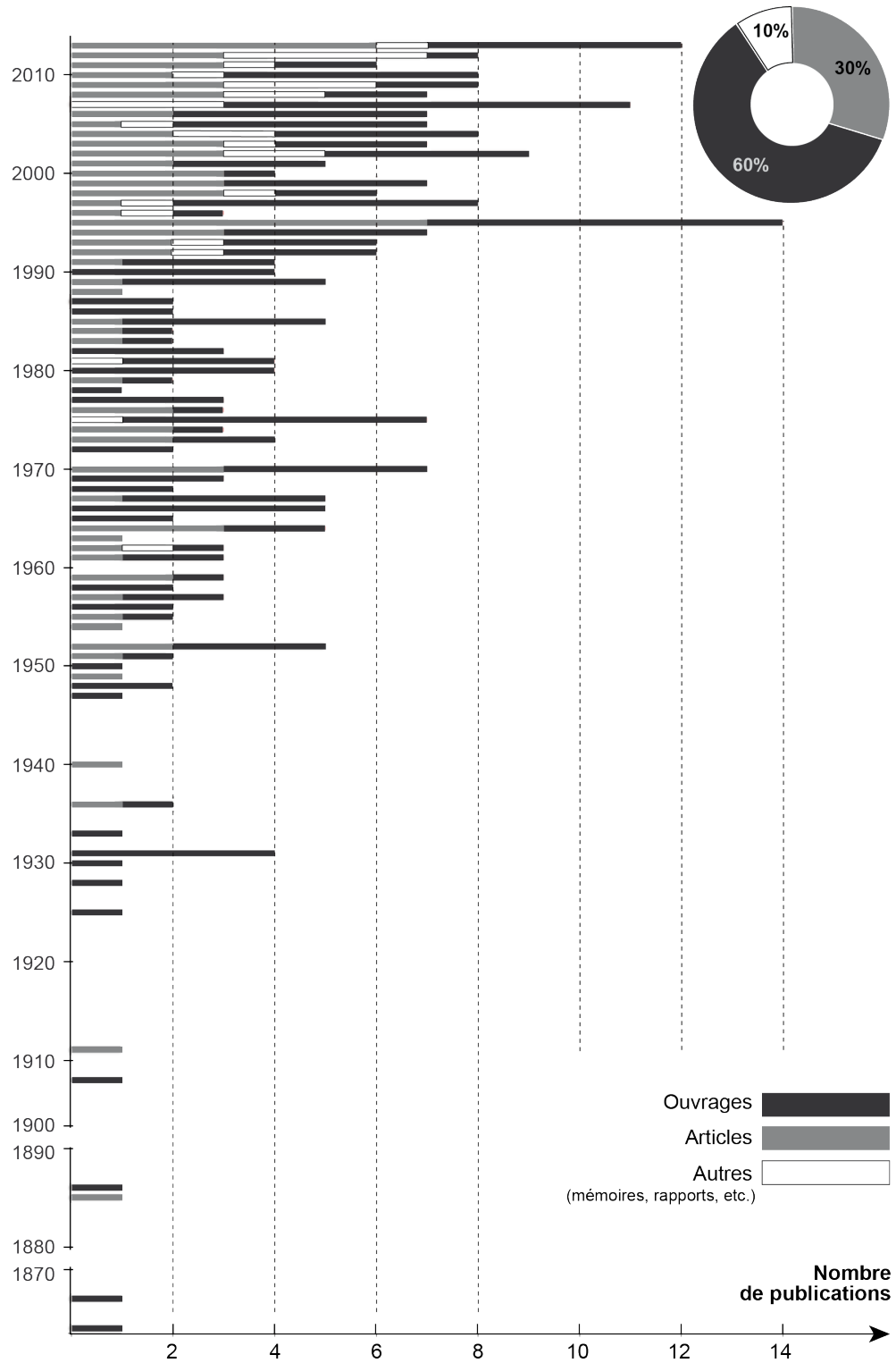
Annexes

I. Résumés graphiques (I et II) et pistes de recherches



La figure ci-dessus reprend l'ensemble des propositions théoriques exposées dans le mémoire, en associant les « résumés graphiques » présentés dans les conclusions des parties 1 et 2 (respectivement p. 75 et p. 145), ainsi que les pistes de recherche identifiées dans la conclusion générale (p. 153). Difficile à lire quand elle est présentée de manière complète, elle doit être comprise comme un déroulé dynamique construit au fur et à mesure de l'exposé.

II. Répartition des références bibliographiques



Références bibliographiques

A

- Ackoff R.L., Gupta S.K., Minas, J.S., 1962, *Scientific method : optimizing research decisions*, Wiley, 464 p.
- Alberti M., 2008, *Advances in urban ecology : integrating humans and ecological processes in urban ecosystems*, Springer, 384 p.
- Allemand S., 2009, *Sous la ville durable. Le génie urbain*, Carnets de l'info, 325 p.
- Alonso, W., 1964, *Location and Land Use*, Harvard University Press, Cambridge, MA.
- Altman I., Stokols D. (ed.), 1987, *Handbook of environmental psychology*, Wiley, 1654 p.
- Amalberti R., Montmollin (de) M., Theureau J., 1991, *Modèles en analyse du travail*, Mardaga, Coll. Psychologie en sciences humaines, 346 p.
- Amblard F., Phan D., 2006, *Modélisation et simulation multi-agents : applications pour les sciences de l'homme et de la société*, Hermès, 446 p.
- Antoni J.P., 1997, *Éléments d'histoire pour la cartographie des villes*, Mémoire de maîtrise, Université de Strasbourg, 114 p.
- Antoni J.P., 1998, *Éléments quantitatifs pour l'histoire de la cartographie des villes*, Mémoire de DEA, Université de Strasbourg, 108 p.
- Antoni J.P., 2003, *Modélisation de l'étalement urbain. Aspects conceptuels et gestionnaires.*, Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 545 p.
- Antoni J.P., Klein O., Moisy S., 2004, Cartographie interactive et multimédia : vers une aide à la réflexion géographique, *Cybergéo : revue européenne de géographie*, 288, 16 p.
- Antoni J.P., 2006, Calibrer un modèle d'évolution de l'occupation du sol urbain. L'exemple de Belfort, *Cybergéo : revue européenne de géographie*, 347, 15 p.
- Antoni J.P., 2009, *Lexique de la ville*, Ellipses, 184 p.
- Antoni J.P., (Dir.), 2010a, *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica (Méthodes et approches), 438 p.
- Antoni J.P., Vuidel G., 2010b, Mobisim : un modèle multi-agents et multi-scalaire pour simuler les mobilités urbaines. In : Antoni J-P. (Dir.), *Modéliser la ville : Formes urbaines et politiques de transport*, Economica, pp. 50-77.
- Antoni J.P., 2010c, L'étalement urbain. Wackermann G., (Dir.), *La France en villes*, Ellipses, pp. 164-176.
- Antoni J.P., Klein O., Moisy S., 2012, La discrétisation temporelle : une méthode de structuration des données pour la cartographie dynamique, *Cartes et Géomatique - Revue du Comité Français de Cartographie*, 213, pp. 27-31.
- Antoni J.P., 2013, L'ambition de modéliser la ville. In : Brun G. (Dir.), *Ville et mobilité*, Economica, pp. 227-238.
- Asher F., 2001, *Les nouveaux principes de l'urbanisme*, Aube, 110 p.
- Asher F., 2005, *La société hypermoderne*, Aube, 300 p.

Aydalot P., 1985, *Économie régionale et urbaine*, Economica, 487 p.

B

Bailly A., Huriot J.M., 1999, *Villes et croissance. Théories, modèles, perspectives*, Economica, 288 p.

Baltzer H., Braun P.W., Köhler W., 1998, Cellular automata models for vegetation dynamics, *Ecological modelling*, 107, pp. 113-125.

Bambrough R., 1964, Principia metaphysica, *Philosophy*, 39, pp. 97-109.

Barles S., 1993, *La pédosphère urbaine : le sol de Paris 18^e-20^e siècles*, Thèse de doctorat, École nationale des ponts et chaussées, 472 p.

Barles S., Guillaume A., 1995, *L'urbanisme souterrain*, Presses universitaires de France, 128 p.

Barles S., 1999a, *La ville délétère. Médecins et ingénieurs dans l'espace urbain, 18^e-19^e siècles*, Champ Vallon, 373 p.

Barles S., 1999b, La valeur du tréfonds, *Études foncières*, 85, pp. 28-32.

Barles S., 2001, Un plan d'urbanisme pour le sous-sol, *Études foncières*, 90, mars-avril 2001, pp. 26-28.

Barles S., Jardel S., 2005, *L'urbanisme souterrain : étude comparée exploratoire*, Rapport de recherche, Atelier parisien d'urbanisme, 99 p.

Batty M., Kim K.S., 1992, Form follows function : reformulating urban population density functions, *Urban Studies*, 29, 7, pp. 1043-1070.

Baumann Z., 2000, *Liquid Modernity*, Polity Press, 240 p.

Beaujeu-Garnier J., 1995, *Géographie urbaine*, Colin, 349 p.

Béguin H., Thisse J.F., 1979, An axiomatic approach to geographical space, *Geographical analysis*, 4,11, pp. 325-341.

Benevolo L., 1975, *Histoire de la ville*, Parenthèses, 509 p.

Benoist (de) A., 2007, *Demain, la décroissance !*, Edite, 199 p.

Berger G., Bourbon-Busset (de) J., Massé P., 2007, *De la prospective. Textes fondamentaux de la prospective française 1955-1966*, L'harmattan, 212 p.

Bernard D., 1995, À travers le projet Météor, évolution des liens qu'entretiennent le métro souterrain et la ville de surface, Barles S. (dir.), *Proceedings of the 6th International conference on Underground space and urban planning*, Champs-sur-Marne, France, pp. 539-545.

Berque A., 1995, Espace, milieu, paysage, environnement. In : Bailly A., Ferras R., Pumain D. (Dir.), *Encyclopédie de géographie*, pp. 349-367.

Berque A., 1996, *Être humain sur la Terre. Principes d'éthique de l'écoumène*, Gallimard, 212 p.

Berque A., 1998, *Médiance de milieux en paysages*, GIP Reclus, 159 p.

Berque A., 2000, *Écoumène. Introduction à l'étude des milieux humains*, Belin, Mappemonde, 271 p.

Bertalanffy (von) L., 1968, 1996, *Théorie générale des systèmes*, Dunod, Coll. Systémique, 308 p.

Bertrand G., Dollfus O., 1973, Le paysage et son concept, *L'espace géographique*, II, 3, pp. 161-164.

Besner J., 1997, *Genèse de la ville intérieure de Montréal*, PDF.

Birmingham H.P., Taylor F.V., 1954, A design philosophy for man-machine control systems, *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, pp. 1748-1758.

Bignand M., 1995, La sécurité dans les grands ensembles souterrains, Barles S. (dir.), *Proceedings of the 6th International conference on Underground space and urban planning*, Champs-sur-Marne, France, pp. 25-29.

Blancher P., 1995, Risque et densité, *Les annales de la recherche urbaine*, 67, pp. 109-118.

Blanquart P., 1997, *Une histoire de la ville. Pour repenser la société*, La Découverte, 193 p.

Boisvert M., 1995, D'un urbanisme souterrain à un urbanisme tridimensionnel, Barles S. (dir.), *Proceedings of the 6th International conference on Underground space and urban planning*, Champs-sur-Marne, France, pp. 73-79.

Boivin D. J., 1989, De l'occupation du sol urbain à l'urbanisme souterrain, *Cahiers de géographie du Québec*, 33, 88, pp. 37-49.

Bonneuil C., Frescoz J.B., 2013, *L'événement anthropocène*, Seuil, 312 p.

- Bonnin P., Berque A., Ghorra-Gobin C., 2006, *La ville insoutenable*, Belin, 366 p.
- Bonte P., Izard M. (ss. dir.), 1991, *Dictionnaire de l'ethnologie et de l'anthropologie*, Presses universitaires de France, 842 p.
- Brémond J., Gélédan A., 1990, *Dictionnaire économique et social*, Hatier, 416 p.
- Bussi M., Daudé É., 2005, *Le dilemme du prisonnier spatialisé : Application aux coopérations territoriales*, Actes des Rencontres de ThéoQuant, Besançon, France, 12 p.
- Brand P., Dávila J.D., 2011, Mobility innovation at the urban margins, *City : analysis of urban trends, culture, theory, policy, action*, 15, 6, pp. 647-661.
- Brossard T., Wieber J.C., 2008, *Paysage et information géographique*, Hermès-Lavoisier, 414 p.
- Brunet R., Ferras R., Théry H., 1992, *Les mots de la géographie*, Reclus - La documentation française, 518 p.
- C**
- Caillé A., 1999, Présentation, *Revue du MAUSS : Villes bonnes à vivre, villes invivables*, 14, La Découverte, pp. 5-15.
- Calthorpe P., 1992, *Transit-Oriented-Development design guidelines*, City of San Diego land guidance system, www.sandiego.gov/planning/documents/pdf/trans/todguide.pdf, consulté en septembre 2013.
- Calthorpe P., 1993, *The next american metropolis : ecology, community and the american dream*, Princeton Architectural Press, 160 p.
- Calvino I., 1972, 1996, *Les villes invisibles*, Seuil, 189 p.
- Canguilhem G., 1952, *La connaissance de la vie*, Vrin, 223 p.
- Carmody J., Sterling R., 1993, *Underground space design. A guide to subsurface utilization and design for people in underground spaces*, Van Nostrand Reinhold, 328 p.
- Casanova P., 2004, *Travaux de recherche pour l'étude prospective de la mobilité et des systèmes de déplacements quotidiens urbain*, Rapport de recherche, PREDIT, 101 p.
- Castoriadis C., 1986, *Les carrefours du labyrinthe*, Seuil, 315 p.
- Cauvin C., Raymond H., 1985, *L'espace des villes. Théorie des lieux centraux et analyse spectrale*, CNRS, 186 p.
- Cauvin C., Escobar F., Serradj A., 2007, *Cartographie thématique. Volume 2 : Des transformations incontournables*, Hermes, 269 p.
- Cauvin J. 1994, 1998, *Naissance des divinités, naissance de l'agriculture : la révolution des symboles au Néolithique*, Fammarion, 310 p.
- Cazamian P., Hubault F., Noulain M., 1996, *Traité d'ergonomie*, Octarès, 945 p.
- Cerdá I., 1867, 2005, *La théorie générale de l'urbanisation*, L'imprimeur, 231 p.
- CERTU, 2004, Et l'ergonomie de la ville, vous y avez pensé ? Pour une accessibilité à tous, *Les débats du CERTU*, 7p.
- Cervero R., Ferrell C., Murphy S., 2002, Transit-Oriented-Development and Joint Development in the United States : a literature review, *Research Results Digest*, 52, 144 p.
- Cetekk C., 1982, 1987, *Nous avons bâti Paris*, Inter-Livres, 127 p.
- Chabot G., Beaujeu-Garnier J., 1964, *Traité de géographie urbaine*, Colin, 493 p.
- Charmes E., 2011, *La ville émietlée. Essai sur la clubbisation de la vie urbaine*, Presses universitaires de France, 304 p.
- Chen Q., Mynett A.E., 2003, Effects of cell size and configuration in cellular automata based prey-predator modelling, *Simulation Modelling Practice and Theory*, 11, pp. 609-625.
- Choay F., 1965, *L'urbanisme, utopies et réalités. Une anthologie*, Seuil, 448 p.
- Choay F., 1980, 1996, *La règle et le modèle. Sur la théorie de l'architecture et de l'urbanisme*, Seuil, 382 p.
- Choay F., 1994, Le règne de l'urbain ou la mort de la ville. In : Dethier J., Guilleux A., *La ville, art et architecture en Europe*, Centre Georges Pompidou, pp. 26-35.
- Christaller W., 1933, 1977, *Central places in Southern Germany*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 229 p.

- Clark C., 1951, Urban population densities, *Journal of the Royal statistical society*, 114, 4, pp. 490-496.
- Claval P., 1981, *La logique des villes. Essai d'urbanologie*, Litec, 633 p.
- Claval P., 1995, *La géographie culturelle*, Nathan, 384 p.
- Clements F.E., 1936, Nature and structure of the climax, *The Journal of Ecology*, 24-1, pp. 252-284.
- Clément-Werny C., Schneider Y., 2011, *Aerial cableways as urban transport systems*, CERTU, STRMTG, 14 p.
- Clément-Werny C., Schneider Y., 2012, Le transport par câble aérien va-t-il investir les villes ? *Techni.Cités*, 231, pp. 29-34.
- Collectif, 1999, *Dictionnaire de l'écologie*, Encyclopaedia Universalis, 1400 p.
- Conway J., 1970, Mathematical games, *Scientific American*, October, pp. 120-127.
- Côte M., 1985, *L'Algérie ou l'espace retourné*, Flammarion, 362 p.
- Couclecis H., 1985, Cellular World : a framework for modelling micro-macro dynamics, *Environment and Planning A*, 17, pp. 585-596.
- Courson (de) J., 1999, *La prospective des territoires. Concepts, méthodes résultats*, CERTU, Coll. Débats, 22, 70 p.
- D**
- Dacey M.F. et al., 1974, One dimensional Central place theory, *Northwestern University Studies in Geography*, 21, 125 p.
- Dajoz R., 1970, 2006, *Précis d'écologie*, Dunod, 357 p.
- Dauphiné A., 1984, Espace terrestre et espace géographique. In : Bailly A. S. (dir), *Les concepts de la géographie humaine*, Masson, pp. 33-43.
- Dauphiné A., 1987, *Les modèles de simulation en géographie*, Economica, 187 p.
- Demangeot J., 1984, *Les milieux "naturels" du globe*, Colin, 364 p.
- Diamond J., 2009, 2005, *Effondrement. Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*, Folio, 896 p.
- Dijkstra E.W., 1959, A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, 1, pp. 269-271.
- Djellouli Y., Emelianoff C., Benasr A., Chevalier J., 2010, *L'étalement urbain. Un processus incontrôlable ?*, Presses universitaires de Rennes, 257 p.
- Dong C.Y., long J.T., Reiter C.A, Staten C., Umbrasas R., 2010, A cellular model for spatial population dynamics, *Computer and graphics*, 34, pp. 176-181.
- Donzelot J., Mongin O., 2013, Tous périurbains ! Tous urbains !, *Esprit*, 393, pp. 18-22.
- Doxiadis K.A., 1970, Ekistics, the Science of Human Settlements, *Science*, 170, 3956, pp. 393-404.
- Dubarry T., Hornung J., 2008, Qui sont les transhumanistes ?, *Sens public*, 3, www.sens-public.org/article.php?id_article=527, consulté en novembre 2013.
- Dubos-Paillard E., Guermond Y., Langlois P., 2003, Analyse de l'évolution urbaine par automate cellulaire, *L'espace géographique*, 2003-4, pp. 357-378.
- Duby G. (ss.dir.), 1980a, *Histoire de la France urbaine. Tome 1 : la ville antique*, Seuil, 600 p.
- Duby G. (ss.dir.), 1980b, *Histoire de la France urbaine. Tome 2 : la ville médiévale*, Seuil, 653 p.
- Duby G. (ss.dir.), 1981, *Histoire de la France urbaine. Tome 3 : la ville classique*, Seuil, 651 p.
- Duby G. (ss.dir.), 1983, *Histoire de la France urbaine. Tome 4 : la ville de l'âge industriel*, Seuil, 665 p.
- Duby G. (ss.dir.), 1985, *Histoire de la France urbaine. Tome 5 : la ville aujourd'hui*, Seuil, 668 p.
- Duvernoy I., 2000, Espace agricole périurbain et politiques communales d'aménagement : l'exemple de l'agglomération albigeoise, *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, 208, 16 p.
- Duvigneaud P., 1980, *La synthèse écologique*, Doin, 380 p.
- E**
- Ellul J., 1975, 2003, *Sans feu ni lieu. Signification biblique de la grande ville*, La Table ronde, 380 p.
- Ellul J., 1977, 2004, *Le système technicien*, Cherche-midi, 341 p.

Emshoff J.R., Sisson R.L., 1970, *Design and use of computer simulation models*, Mac Millan.

F

Ferber J., 1995, *Les systèmes multi-agents. Vers une intelligence collective*, Paris, InterEditions, 513 p.

Fischer G.N., 1989, *Psychologie des espaces de travail*, Colin, 217 p.

Fischer G.N., 1998, Espace de travail et appropriation. In : De Coster M., Pichault F., 1994, 1998, *Traité de sociologie du travail*, De Boeck Université, pp. 475-496.

Fischesser B., Dupuis-Tate M.F., 2007, *Le guide illustré de l'écologie*, La Martinière, 349 p.

Fistola R., 2011, The city from the wire the aerial cable transport for the urban mobility, *Tema : Journal of Land use, Mobility and Environment*, 4, SP, pp. 59-65.

Fleury D., 2009, L'ergonomie spatiale, réflexion sur une avancée conceptuelle, *Transports urbains*, 116, pp. 3-8.

Foltête J.C., Girardet X., Clauzel C., Tournant P., Vuidel G., Bannwarth C., Roué S., Afonso E., Giraudous P., 2013, Estimer l'impact des grandes infrastructures de transport sur la distribution des espèces : proposition et test d'un protocole méthodologique. In : Luginbühl Y. (ss. dir), *Infrastructures de transport terrestres, écosystèmes et paysages, des liaisons dangereuses*, La Documentation française, pp. 201-218.

Forrester J.W., 1969, 1979, *Dynamique urbaine*, Economica, 329 p.

Fouchier V., 1995, La densification : une comparaison internationale entre politiques contrastées, *Les annales de la recherche urbaine*, 67, pp. 95-108.

Frankhauser P., 1994, *La fractalité des structures urbaines*, Economica, 291 p.

Frankhauser P., Houot H., Tannier C., Vuidel G., 2007, *Vers des déplacements péri-urbains plus durables : propositions de modèles fractals opérationnels d'urbanisation*, Rapport de recherche, PRE-DIT, 114 p.

Frankhauser P., 2008, Approche fractale de l'urbanisation. Méthodes d'analyse d'accessibilité et simulations multi-échelles, *Proceedings of the 11th World Conference on Transportation Research*, june 2007,

Berkeley, United States, 21 p.

Frankhauser P., Antoni J.P., Vuidel G., 2009, Contribution to a mathematical frame formalizing agent-space, *16th European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography*, Maynooth, Ireland, 4-8 september 2009.

Frankhauser P., 2012, *The Fractalopolis model. A sustainable approach for a central place system*, Hal : Hyper articles en lignes, (<http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00758864/>), [PDF en ligne consulté en juillet 2013], 19 p.

Frankhauser P., Antoni J. P., Vuidel G., 2012, EBO-GeoS : Reflexions about an Epistemology-Based Ontology of Geographic Space, Concepts behind models, *4th workshop of S4 working group MODUS*, Nice, France.

Frankhauser P., Ancel D. (ss.dir.), 2013, *La décision d'habiter ici ou ailleurs*, Economica, 400 p.

Friedmann G., Naville P., 1961, *Traité de sociologie du travail*, 1, Colin, 441 p.

Fritsch J., 1995, Le travail, *Encyclopédie Universalis*, CD-ROM.

Fustel de Coulanges N.D., 1864, 1984, *La cité antique*, Flammarion, 494 p.

G

Gago E.J., Roldan J., Pacheco-Torres R., Ordonez J., 2013, The city and urban heat islands : a review of strategies to mitigate adverse effects, *Renewable and Sustainable Energy Review*, 25, pp. 749-758.

Gaillard A., 1997, *L'imaginaire du souterrain*, L'Harmattan, 208 p.

Gauchet M., 1985, *Le désenchantement du monde. Une histoire politique de la religion*, Gallimard, 306 p.

Gaudry M., 2007, Structure de la modélisation du trafic et théorie économique. In : Maurice J., Crozet Y., *Le calcul économique dans les processus de choix collectif des investissements de transport*, pp. 6-97.

Gault G., Bedeau L., 2007, *Les Français et leur habitat. Perception de la densité et des formes d'habitat*, TNS-Sofres, 11 p.

George P., 1970, 1990, *Dictionnaire de la géographie*, Presses universitaires de France, 512 p.

Gorra-Gobin C. (Dir.), 1994, *Penser la ville de de-*

- main. *Qu'est-ce qui institue la ville ?*, L'harmattan, 266 p.
- Gilbert N., Troitzsch, 2005, *Simulation for the social scientist*, Open University Press, 312 p.
- Gouyet J.F., 1992, *Physique et structures fractales*, Masson, 234 p.
- Grandjean E., 1970, Ergonomic principles for dwellings and town design. *Ergonomics and architecture, Ergonomics*, 13, 3, pp. 385-389.
- Grandjean E., 1973, *Ergonomics of the home*, Taylor and Francis, 344 p.
- Gropius W., 1931a, Construction horizontale, verticale ou de hauteur intermédiaire ? Recueil des CIAM, Verlag Englert und Schlosser (texte présenté et annotés par L. Richard, 1995, *Walter Gropius, architecture et société*, Lintea).).
- Gropius W., 1931b, Des logements au milieu d'espaces verts ; un habitat d'avenir dans les grandes agglomérations urbaines, *Zentralblatt der Bauverwaltung*, 49-50, (texte présenté et annotés par L. Richard, 1995, *Walter Gropius, architecture et société*, Lintea).).
- Guérin F., Laville A., Daniellou F., Duraffourg J., Kerguelen A., 1997, *Comprendre le travail pour le transformer : la pratique de l'ergonomie*, Montrouge, ANACT, 318 p.
- Guilluy C., 2010, *Fractures françaises*, Bourin, 198 p.
- ## H
- Hagen A., 2003, Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps, *International Journal of Geographical Information Science*, 17, pp. 235-249.
- Hägerstrand T., 1952, The propagation of innovation waves, *Lund studies in geography*, Série B, 4.
- Haggett P., Chorley R.J., 1967, Models, paradigms and the new geography. In : Haggett P., Chorley R.J., *Models in geography*, The Trinity Press, pp. 19-41.
- Halbwachs M., 1928, *La population et les tracés de voies à Paris depuis un siècle*, Presses Universitaires de France.
- Hall E.T., 1966, *La dimension cachée*, Seuil, 254 p.
- Hamelin E., Razemon O., 2012, *La tentation du bi-*
- tume. Où s'arrêtera l'étalement urbain ?*, Rue de l'échiquier, 160 p.
- Hansen W.G., 1959, How accessibility shapes land use, *Journal of the American Institute of Planners*, 25, pp. 73-76.
- Heidegger M., 1930, 1992, *Les concepts fondamentaux de la métaphysique*, Bibliothèque de philosophie, Gallimard, 548 p.
- Heidegger M., 1962, 2000, Technique, *Krisis*, 24, pp. 237-248.
- Hély V., 2012, *Les modèles LUTI : historique, typologie et perspectives*, Mémoire de Master 2, Université de Franche-Comté, 102 p.
- Hénard E., 1911, The cities of the future, *Transaction*, The Royal Institute of British Architects, pp. 345-367.
- Héran F., 2011, *La ville morcelée. Effets de coupure en milieu urbain*, Economica, 224 p.
- Hillier B., Leaman A., Stansall P., Bedford M., 1976, Space syntax, *Environment and Planning B*, 3, 2, pp. 147-185.
- Hogeweg P., 1988, Cellular automata as a paradigm for ecological modeling, *Applied mathematics and computation*, 27, pp. 81-100.
- Holling C.S., 1973, Resilience and stability of ecological systems, *Annual review of ecology and systematics*, 4, pp. 1-23.
- Hornborg, 2005, *Cultural ecology*, Berkshire Encyclopedia of World History, 2, pp. 465-467.
- Huff D. L., 1964, Defining and Estimating a Trading Area, *Journal of Marketing*, 28, p. 38.
- Huriot J.M. (ss. dir.), 1998, *La ville ou la proximité organisée*, Economica, 237 p.
- ## I
- Ignazi G., Beaucire F., Lanteri R., Libilbehety M.M., 2002, *Étude Ville et ergonomie de l'accessibilité*, Rapport PREDIT (non publié), 90 p.
- INRS, 1997, Conception des lieux de travail. Démarches, méthodes et connaissances techniques, ED 178, Coll. La ligne prévention, 93 p.
- Isard W., 1956, *Location and Space-economy*, Technology Press of Massachusetts Institute of Technology and Wiley & sons, 369 p.

Isnard H., 1981, Une problématique empiriste de la géographie. In : Isnard H., Racine J.B., Raymond H., *Problématiques de la géographie*, pp. 15-83.

J

Jean G., 1994, 2001, *Voyages en Utopie*, Gallimard, 176 p.

K

Kamps S., 2013, *Dual-agent simulation model of the residential development process. An institutional approach to explaining the spatial patterns of residential development in France, England and the Netherlands*, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 264 p.

Kansky K., 1963, *Structure of transportation networks : relationships between network geography and regional characteristics*, University of Chicago, Department of Geography, Research Papers 84.

Kauffmann V., Jemelin C., Guidez J.M., 2001, *Automobile et modes de vie urbains : quel degré de liberté ?* La Documentation française, 167 p.

Kirman, A. (1992). Whom of what does representative agent represent? *Journal of Economic Perspectives*, 6, 117-136.

Knowles R.D., 2012, Transit Oriented Development in Copenhagen, Denmark : from the finger plan to Orestad, *Journal of transport geography*, 22, pp. 251-261.

Koestler A., 1967, 1968, *Le cheval dans la locomotive*, Calmann-Levy, 345 p.

Koning M., 2009, *La congestion du boulevard périphérique parisien*, Working paper, Centre d'économie de la Sorbone, 48 p.

Korzybski S., 1952, Les peuplement des grandes agglomérations urbaines. Londres et Paris aux 19^e et 20^e siècles, *Population*, 47, pp. 458-520.

Krugman P., 1997, *Development, geography and economy theory*, MIT Press, 127 p.

Kwan, M., 1998, Space-time and integral measures of individual accessibility : a comparative analysis using a pointbased framework, *Geographical Analysis*, 30, 3, pp. 191-216.

L

Lammoglia A., Josselin D., 2013, Simulation multi-agents d'un transport à la demande dynamique,

L'exemple du Modulobus, 11^e Rencontres de Théo Quant, 20-22 février, Besançon, France.

Langlois P., 2006, Approche conceptuelle de l'espace : structuration de l'espace, du temps et des objets dans un contexte de modélisation multi-agents. In : Amblard P., Phan D., *Modélisation et simulation multi-agents*, Hermès-Lavoisier, pp. 363-384.

Larrère C., Larrère R., 1994, *La crise environnementale*, INRA, 80, 302 p.

Latouche S., 1986, *Faut-il refuser le développement ?*, Presses universitaires de France, 224 p.

Latouche S., 2004, *La Méga-machine. Raison technoscientifique, raison économique et mythe du progrès*, La Découverte, 204 p.

Latour B., 1989, 2005, *La science en action. Introduction à la sociologie des sciences*, La Découverte, 664 p.

Laville A., 1976, *L'ergonomie*, Presses universitaires de France, 128 p.

Lavedan P., 1936, *Géographie des villes*, Gallimard, 289 p.

Lazzarotti O., 2006, *Habiter. La condition géographique*, Belin, 288 p.

Le Corbusier, 1925, 1996, *L'art décoratif d'aujourd'hui*, Flammarion, 220 p.

Le Corbusier, 1957, 1971, *La charte d'Athènes*, Seuil, 185 p.

Lefebvre H., 1970, *Le manifeste différentialiste*, Gallimard, 192 p.

Lefranc G., 1975, *Histoire du travail et des travailleurs*, Flammarion, 475 p.

Le Goff J.P., 2009, Au nom du développement durable, *Le Débat*, 156, pp. 80-97.

Le Goix R., 2006, Les Gated communities aux Etats-Unis et en France : une innovation dans le développement périurbain ?, *Hérodote*, 122, pp. 107-137.

Leiris M., 1951, *Race et civilisation*, Unesco, 47 p.

Leplat J., 1995, *Ergonomie*, Encyclopédie Universalis, CD Rom.

Leontiev K., Lerner A., Ochanine D., 1961, Sur quelques tâches dans l'investigation du système 'homme-machine automatique', *Vop. Psikhol*, 1, pp.

13-21.

Levi-Strauss C., 1955, *Tristes tropiques*, Plon, 504 p.

Levy J., Lussault M., 2003, *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*, Belin, 1033 p.

L'Hostis A., Wulhorst G. *et al.*, 2010, An urbanism oriented towards rail in Germany and France : selected findings of the Bhan.Ville project, *Proceedings of the 12th World Conference on Transportation Research*, July 2010, Lisbon, Portugal, 33 p.

Lorenz K., 1970, *Trois essais sur le comportement animal et humain*, Seuil, 240 p.

Lussault M., 2007, *L'homme spatial. La construction sociale de l'espace humain*, Seuil, 363 p.

Lussault M., 2013, *L'avènement du monde. Essai sur l'habitation humaine de la Terre*, Seuil, 296 p.

M

Madoré F., 2004, Modes de vie périurbains en France, *Noröis*, 193, <http://noröis.revues.org/789> (consulté en juin 2010).

Mandelbrot B., 1982, *The fractal geometry of nature*, Freeman, 460 p.

Marchetti C., 1991, Voyager dans le temps. Considérations pour une meilleure exploitation de la liaison fixe, *Futuribles*, 156, p. 19-29.

Markou E., 2001, Militaires et urbanistes durant les années trente. L'aménagement urbain et la menace aérienne, *Les annales de la recherche urbaine*, 91, décembre 2001, pp. 18-26.

Meadows P., 1957, Models, systems and science, *American sociological review*, 22, pp. 3-9.

Merenne-Schoumaker B., 1981, *La localisation des industries en milieu urbain*, Conférence du 6 mai 1981, Université de Fribourg.

Merlin P., 2002, *L'aménagement du territoire*, Presses universitaires de France, 448 p.

Meyerson I., 1955, Le travail, fonction psychologique, *Journal de psychologie*, LII, pp. 375-383.

Minnesota University, 1975, *Preliminary design information for underground space*, Vol. 2., Dept. of civil and mineral engineering, 93 p.

Moles A., Rohmer E., 1972, 1996, *Psychologie de l'espace*, Casterman, 245 p.

Molina M.M., Moreno-Armendariz M.A., Mora J., 2013, On the spatial dynamics and oscillatory behavior of a predator-prey model based on cellular automata and local particle swarm optimization, *Journal of theoretical biology*, 336, pp. 173-184.

Mongin O., 1995, *Vers la troisième ville ?*, Hachette, 140 p.

Monkkonen E. H., 1990, *America becomes urban*, University of California Press, 336 p.

Monod J., 1970, 1973, *Le hasard et la nécessité. Essai sur la philosophie naturelle de la biologie moderne*, Seuil, 244 p.

Montmollin (de) M. (ss. Dir.), 1995, 1997, *Vocabulaire de l'ergonomie*, Octares, Coll. Travail, 287 p.

Montmollin (de) M., 1967, *Les systèmes hommes-machines*, PUF, 248 p.

Montmollin (de) M., 1990, *L'ergonomie*, La Découverte, 124 p.

Morin E., 1977, *La méthode. T1 : la vie de la vie*, Seuil, 398 p.

Mottez B., 1987, *La sociologie industrielle*, Presses universitaires de France, 128 p.

Mumford L., 1950, *Technique et civilisation*, Seuil, 415 p.

Mumford L., 1961, 1964, *La cité à travers l'histoire*, Seuil, 777 p.

Mumford L., 1973, *Le mythe de la machine. Tome 1 : la technologie et le développement humain*, Fayard, 404 p.

Mumford L., 1974, *Le mythe de la machine. Tome 2 : le pentagone de la puissance*, Fayard, 643 p.

N

Neumann (von) J., 1966, *Theory of self-reproducing automata*, University of Illinois Press, 399 p. (publication *a posteriori*)

Nietzsche F., 1886,

Nishi T. *et al.*, 2000, Estimation of the value of the internal and external environment in underground space use, *Tunneling and underground space technology*, p. 85.

Noulin M., 1992, *L'ergonomie*, Technip, 173 p.

O

- Oakley A.C., 1956, *Men at Work*, Hodder and Stoughton, University of London Press, 301 p.
- Obertone L., 2013, *La France Orange mécanique*, Ring, 350 p.
- Ochanine D., 1962, Le système homme-automate, *Recherches internationales à la lumière du marxisme*, 5, 29, La cybernétique, pp. 105-121.
- Odum E.P., Odum H.T., 1959, *Fundamentals of ecology*, Saunders, 546 p.
- Ovenden M., 2003, *Metro maps of the world*, Capital Transport Publishing, 136 p.
- P**
- Paquot T., 1990, *Homo urbanus : essai sur l'urbanisation du monde et des moeurs*, Félin, 177 p.
- Pillet G., Odum H.T., 1997, *E³. Énergie, écologie, économie*, Georg, 257 p.
- Pitte J.R., 2003, *La France*, Colin, 256 p.
- Pitte J.R., 2009, *Histoire du paysage français de la préhistoire à nos jours*, Tallandier, 550 p.
- Popper R.K., 1968, 1989, *La logique de la découverte scientifique*, Payot, 480 p.
- Prost B., 1994, L'agriculture périurbaine : analyse d'une marginalité, *Bulletin de l'association des géographes français*, 2, pp. 114-151.
- Pumain D., Sanders L., Saint-Julien T., 1989, *Ville et auto-organisation*, Economica, 191 p.
- Pumain D., Racine J.B., 1999, L'homo géographique : de l'emprunt à l'empreinte, *Revue européenne des sciences sociales*, 37, 113, pp. 77-86.
- Pumain D., Saint-Julien T., 2001, *Analyse spatiale : les interactions*, Colin, 224 p.
- Pumain D., Robic M.C., 2002, Le rôle des mathématiques dans une "révolution" théorique et quantitative : la géographie française depuis les années 1970, *Revue d'histoire des sciences humaines*, 6, pp. 123-144.
- Pumain D., 2006, Alternative explanations of hierarchical differentiation in urban systems. In : Pumain D. (ed.), *Hierarchy in natural and social sciences*, 3, Springer, pp. 169-222.
- Q**
- Qu S., Chen Q., Recknagel F., 2008, Cellular au-
- tomata based simulation of random versus selective harvesting strategies in predator-prey systems, *Ecological informatics*, 3, pp. 252-258.
- R**
- Ragon M., 1978, *Histoire mondiale de l'architecture et de l'urbanisme moderne. Tome 3 : Prospective et futurologie*, Casterman, 437 p.
- Ramade F., 2002a, *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*, Dunod, 1075 p.
- Ramade F., 2002b, *Ecologie appliquée*, Dunod, 864 p.
- Ramnaud P., 1969, *Société rurale et urbanisation*, Seuil, 1969, 318 p.
- Rasmussen J., 1983, Skills, rules and knowledge : signals, signs and symbols, and other distinctions on human performance models, *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*, 3, pp. 257-266.
- Raux C., Mercier A., Ovtracht N., 2007, La pertinence des mesures d'accessibilité gravitaire aux aménités urbaines, *Actes de la conférence SAGEO'2007 - Rencontres internationales Géomatique et territoire*, 19 p.
- Raux C., 2007, *Le péage urbain*, La Documentation française, 92 p.
- Raux C., Mercier A., Ovtracht N., 2008, Évaluation économique des politiques de transport et indicateurs d'accessibilité spatiale : l'apport des SIG, *Cybergeo : European Journal of Geography*, (consulté le 06 mars 2013).
- Ravenstein E.G., 1885, The laws of migration, *Journal of the statistical society of London*, 48, 2, pp. 167-235.
- Reilly W. J., 1931, *The law of retail gravitation*, Pillsbury.
- Rémy J., 1966, 2000, *La ville : phénomène économique*, Anthropos, 284 p.
- Reymond H., 1981, Une problématique théorique de la géographie : plaidoyer pour une chorotaxie expérimentale. In : Isnard H., Racine J.B., Reymond H., *Problématiques de la géographie*, pp. 163-249.
- Reymond H., 1998, Approches nouvelles de la coalescence. In : Reymond H., Cauvin C., Kleinschmager R., *L'espace géographique des villes. Pour une synergie multistrate*, pp.21-48.

- Reymond H., 2009, L'intérêt géographique de la logique de S. Lupasco et de la théorie de la néoténie : proposition d'un crible transdisciplinaire pour l'étude de la résilience des géosystèmes urbains, *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, 451, 25 p.
- Reymond H., 2011, "T-Shère" et médiane espace/étendue. l'antagonisme contradictoire et le concept de géoanthroposystème, *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, Débats, 34 p.
- Reymond H., Cauvin C., 2013, La logique ternaire de S. Lupasco et le raisonnement géocartographique bioculturel d'Homo geographicus, *Cybergeo : Revue européenne de géographie*, 647, 30 p.
- Rogers R., 2007, *Des villes durables pour une petite planète*, Le Moniteur, 215 p.
- Rosnay (de) J., 1966, *Les origines de la vie*, Seuil, 192 p.
- Rosnay (de) J., 1975, *Le macrospore. Vers une vision globale*, Seuil, 346 p.
- Rougerie G., 1975, *Les cadres de vie*, Presses universitaires de France, 264 p.
- Rougerie G., 1991, *Géosystèmes et paysages*, Colin, 302 p.
- S**
- Saint-Gérard T., 2002, *SIG : Structures conceptuelles pour l'analyse spatiale*, Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, 1, Université de Rouen, 187 p.
- Sanders L. Pumain D. Mathian H. Guérin-Pace F. Bura S., 1997, Simpop : a multi-agents system for the study of urbanism, *Environment and Planning B*, 24, pp. 287-305.
- Scherrer J., 1967, *Physiologie du travail (ergonomie). Tome 2 : Ambiances physiques, travail psycho-sensoriel*, Masson, 342 p.
- Schöffner N., 1969, 1972, *La ville cybernétique*, Denoël, 220 p.
- Shannon C. E., Weaver W., 1949, *The mathematical theory of communication*, University of Illinois Press, 117 p.
- Sieverts T., 2004, *Entre-ville. Une lecture de la Zwischenstadt*, Parenthèses, 188 p.
- Simondon G., 1958, 2012, *Du mode d'existence des objets techniques*, Aubier, 367 p.
- Skilling H., 1964, An operational view, *American scientist*, 52, pp. 388-396.
- Sorre M., 1947, *Les fondements de la géographie humaine. Tome 1 : les fondements biologiques (1)*, Colin, 447 p.
- Sorre M., 1948, *Les fondements de la géographie humaine. Tome 2 : les fondements techniques*, Colin, 1031 p.
- Sorre M., 1952, *Les fondements de la géographie humaine. Tome 3 : L'habitat*, Colin, 499 p.
- Spengler O., 1931, *Le déclin de l'Occident. esquisse d'une morphologie de l'histoire universelle*, Gallimard, 880 p.
- Spérandio J.C., 1976, L'ergonomie du cadre bâti, *Le Travail humain*, 39, 2, pp. 227-248
- Spérandio J.C., 1984, *L'ergonomie du travail mental*, Masson, 130 p.
- Sterling R., 1993, Introduction to underground space utilization. In : Carmody J., Sterling R., *Underground space design. A guide to subsurface utilization and design for people in underground spaces*, pp. 2-23.
- Stewart J., Warntz W., 1949, Some parameters of the geographical distribution of population, *Geographical review*, 49, pp.270-273.
- Steward J., 1977, *Evolution and ecology. Essays on social transformation*, University of Illinois Press, 416 p.
- Stouffer SA., 1940, Intervening opportunities a theory relating mobility and distance, *American Sociological Review*, 5, 6, pp 845-867.
- T**
- Tannier C., Foltête J.C., Girardet X., 2012a, Assessing the capacity of different urban forms to preserve the connectivity of ecological habitats, *Land-scape and Urban Planning*, 105, pp. 128-139.
- Tannier C., Vuidel G., Houot H., Frankhauser P., 2012b, Spatial accessibility to amenities in fractal and nonfractal patterns, *Environment and Planning B*, 39, pp. 801-819.
- Thisse J.F., 2010, Towards a Unified Theory of Economic Geography and Urban Economics, *Journal of Regional Science*, 50, 1, pp. 281-96.
- Thompson W., 1965, *A preface to urban economics*,

Hopkins, Baltimore, 413 p.

Tobler W.R., 1970, A computer movie simulating urban growth in the Detroit region, *Economic Geography* (suppl.), pp. 234-240.

Tobler W. R., 1979, Cellular geography. In : Gale S., Olsson G, 1979, *Philosophy in geography*, Reidel Pub., Dordrecht, Holland, pp. 379-386.

Touffet J., 1982, *Dictionnaire essentiel d'écologie*, Ouest-France, 108 p.

Tétriack P., 2001, *Faut-il pendre les architectes ?*, Points, 221 p.

Tricart J., 1958, *Cours de géographie. Tome 2 : l'habitat urbain*, Centre de documentation universitaire, 295 p.

U

Ueno J., Nakazawa A., Kishimoto T., 2009, An analysis of pedestrian movement on multilevel complex by space syntax theory - In the case of Shibuya station, *Proceedings of the 7th international Space syntax symposium*, Daniel Koch (ed.), Stockholm, 12 p.

Ullman E.L., 1957, *American Commodity Flow. A geographic Interpretation of Rail and Water Traffic based on Principles of Spatial Interchange*, University of Washington Press, 214 p.

Utudjian E., 1952, *L'urbanisme souterrain*, Presses universitaires de France, 128 p.

Utudjian E., 1966, *Architecture et urbanisme souterrains*, Lafont, 105 p.

V

Varela F.G., Maturana H.R., Uribea A., 1974, Autopoiesis : The organization of living systems, its characterization and a model, *Biosystems*, 5, 4, pp. 187-196.

Vernant J.P., 1965, Travail et nature dans la Grèce ancienne. In : Vernant J.P., 1965, 2005, *Mythe et pensée chez les Grecs. Étude de psychologie historique*, Maspéro, 428 p.

Véron J., 2006, *L'urbanisation du monde*, La décou-

verte, 122 p.

Vidal de la Blache P., 1908, 1994, *Tableau géographique de la France*, La Table ronde, 560 p.

Vidal de la Blache P., 1948, *Principes de géographie humaine* (édités d'après les manuscrits de l'auteurs par E. de Martonne), A. Colin, 327 p.

W

Waddell P., 2002, URBANSIM : Modeling urban development for land use, transportation and environmental planning, *Journal of the American Planning Association*, 68, pp. 297-314.

Warntz W., 1967, Global science and the tyranny of space, *Papers, Regional Science Society*, 19, pp. 7-19.

Wegener M., 2004, Overview of land-use transport models. In : Hensher D.A., Button K., *Handbook in transport*, 9, Transport geography and spatial systems, Pergamon-Elsevier, pp. 127-146.

Weil-Barais A., 1993, *L'homme cognitif*, Presses universitaires de France, 576 p.

White L. A., 2005, *The Science of Culture : A study of Man and Civilization*, Percheron Press, 502 p.

White R., Engelen G., 1993, Cellular automata and fractal urban form : a cellular modelling approach to the evolution of urban land use patterns, *Environment and planning A*, 25, 8, pp. 1175-1199.

White, R., Engelen, G., 1994, Cellular Dynamics and GIS : Modelling Spatial Complexity, *Geographical System*, 1, pp. 237-253.

Wiel M., 2010, *Étalement urbain et mobilité*, La documentation française, 88 p.

Z

Zhang L., Zhuang Y., Dai X., 2012, A configurational study of pedestrian flows in multi-level commercial space, *Proceedings of the 8th international Space syntax symposium*, Greene M. (ed.), Santiago de Chile, 16 p.

Zipf G.K., 1949, 2012, *Human behavior and the principle of least effort*, Addison Wesley, 588 p.

Table des matières

Avertissements	4
Remerciements	5
Introduction générale Corpus théorique et projet : un préalable	7
I L'espace géographique des villes	13
Introduction	15
1 L'espace écologique	19
1.1 L'écosystème	20
1.1.1 Le lieu « espace-matière-énergie »	20
1.1.2 Auto-organisation et résistance (K)	24
1.2 La nécessité de l'aménagement	29
1.2.1 De la compétition à l'appropriation	30
1.2.2 De l'organisation à l'aménagement	32
Conclusion	34
2 L'espace géographique	37
2.1 Hominisation de l'espace : l'écoumène	38
2.1.1 Domestication écologique	38
2.1.2 Mondes humains	42
2.2 Une géographie culturelle	44
2.2.1 Spécificités culturelles	45
2.2.2 Diversités spatiales	47
Conclusion	51

3 L'espace urbain	53
3.1 La médiation technique	54
3.1.1 Artificialisation « utile »	54
3.1.2 Le milieu technique	57
3.2 Le paradoxe de la ville	63
3.2.1 Écotone périurbain	63
3.2.2 Catachrèse urbaine	67
Conclusion	70
Conclusion	73
 II L'espace ergonomique des villes	 77
Introduction	79
 4 La machine urbaine	 81
4.1 L'organisation socio-spatiale du travail	82
4.1.1 Ville et travail	82
4.1.2 L'aménagement des postes de travail	84
4.2 Travailler avec la machine	87
4.2.1 La ville parmi les machines	88
4.2.2 L'ambivalence de la machine	92
Conclusion	94
 5 L'approche ergonomique	 97
5.1 L'ergonomie : une discipline spatiale	97
5.1.1 Une technique empirique de conception	98
5.1.2 La ville : un système hommes-machines	102
5.2 Vers un transfert conceptuel	107
5.2.1 Une géographie pour aménager les postes de travail	107
5.2.2 Une ergonomie pour aménager le ville	111
Conclusion	118
 6 L'urbanisme tridiastatique	 121
6.1 Urbanisme vertical (aérien et souterrain)	122
6.1.1 Verticalité et projets urbains	122
6.1.2 Une solution pour un urbanisme raisonné	126
6.2 Verticalité urbanisation/transport	129

<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	171
6.2.1 TOD et hiérarchie fractale	130
6.2.2 Ergonomie urbaine : une proposition théorique	133
Conclusion	141
Conclusion	143
Conclusion générale	
Modéliser et visualiser : une nécessité	147
Annexes	154
Références bibliographiques	157