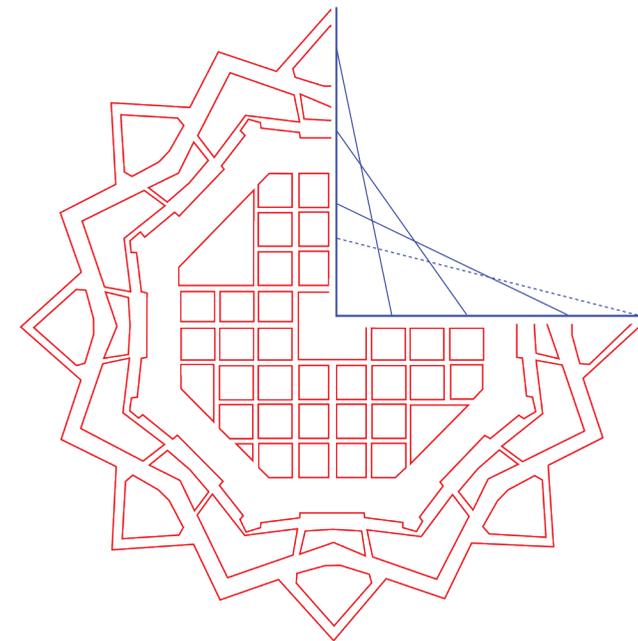


Collection « Méthodes et Approches »  
dirigée par Gérard Brun

# CONCEPTS, MÉTHODES ET MODÈLES POUR L'AMÉNAGEMENT ET LES MOBILITÉS

Jean-Philippe ANTONI

Préface d'Olivier BONIN



 ECONOMICA

Jean-Philippe ANTONI

CONCEPTS, MÉTHODES ET MODÈLES  
POUR L'AMÉNAGEMENT ET LES MOBILITÉS

L'aménagement du territoire nécessite de faire des choix pour l'organisation des transports et la répartition géographique des hommes et des activités. Dans le contexte actuel d'une transition éco-énergétique devenue urgente, ces choix peuvent s'appuyer sur les outils de prospective territoriale proposés par la modélisation et la simulation.

Pour y contribuer, cet ouvrage explore les liens entre l'aménagement et les concepts qui le définissent, mais également les méthodes qui lui sont consacrées, et qui, en économie comme en géographie, ont fait l'objet d'avancées remarquables au cours des trente dernières années.

Les concepts, les méthodes et les modèles de l'aménagement du territoire y apparaissent comme des acquis scientifiques indispensables pour réfléchir à l'avenir des territoires, construire des scénarios durables et anticiper les enjeux de demain.

\*  
\* \*

**Jean-Philippe ANTONI** est professeur de géographie et d'aménagement à l'université de Bourgogne. Ses principaux travaux de recherche concernent la prospective et l'anticipation territoriales, à travers la modélisation des interactions entre forme urbaine, politiques de transport et mobilités résidentielles.



[www.economica.fr](http://www.economica.fr)



ISBN 978-2-7178-6891-3  
29 €



CONCEPTS,  
MÉTHODES ET MODÈLES  
POUR L'AMÉNAGEMENT ET LES MOBILITÉS

Collection « Méthodes et Approches »  
dirigée par Gérard BRUN

Cette collection axée sur la recherche en transport et en urbanisme a pour ambition de publier des ouvrages contribuant à un renouveau conceptuel dans le domaine des sciences humaines, par le recours à des méthodes nouvelles et à des approches transversales.

Ouvrages déjà parus :

*Le calcul économique dans le processus de choix collectif des investissements de transport*, MAURICE Joël et CROZET Yves (dir.), 2007.

*L'environnement dans la décision publique – Refonder l'évaluation socio-économique pour des politiques de transport plus durables*, CHANEL Olivier et FABUREL Guillaume (dir.), 2010.

*Modéliser la ville – Formes urbaines et politiques de transport*, ANTONI Jean-Philippe (dir.), 2011.

*La ville morcelée – Effets de coupure en milieu urbain*, HÉRAN Frédéric, 2011.

*Pour une économie de la sécurité routière – Émergence d'une approche pour l'élaboration de politiques publiques*, CARNIS Laurent et MIGNOT Dominique (dir.), 2012.

*Ville et mobilité – Nouveaux regards*, BRUN Gérard (dir.), 2013.

*Atlas de la France périurbaine – Morphologie et desservabilité*, DREVELLE Matthieu et EMANGARD Pierre-Henri, 2015.

*Hyper-mobilité et politiques publiques – Changer d'époque ?*, CROZET Yves, 2016.

Collection « Méthodes et Approches »  
dirigée par Gérard Brun

# CONCEPTS, MÉTHODES ET MODÈLES POUR L'AMÉNAGEMENT ET LES MOBILITÉS

L'aide à la décision  
face à la transition éco-énergétique

Jean-Philippe ANTONI

Préface d'Olivier BONIN

*Ouvrage issu notamment de travaux du programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres PREDIT, publié avec le soutien de la Direction de la Recherche et de l'Innovation (service de la recherche) du Commissariat général au Développement durable du Ministère français de l'Environnement, de l'Écologie et de la Mer (MEEM/CGDD/DRI/SR).*

 ECONOMICA

49 rue Héricart, 75015 Paris



*À la mémoire d'Yves Lacoste*



## PRÉFACE

Aménager le territoire : voici une expression très volontariste, qui traduit une forme de domination de l'homme sur la nature, et une posture finaliste. La tâche peut sembler hors de portée, devant l'étendue des espaces à domestiquer, soit qu'ils soient restés vierges, soit qu'ils se soient développés dans une direction contraire à celle de l'intention de l'aménageur. Car c'est en cela que l'aménagement est finaliste : il répond toujours à plusieurs buts ou finalités, utilitaristes ou esthétiques. C'est un projet en partie démiurgique, la tentation de créer de l'ordre à partir du désordre, un monde à partir du néant. C'est aussi un projet politique, qui répond à une conception de l'ordre social et du développement des sociétés.

La plupart des grands projets d'aménagement sont durables dans le sens littéral du terme. Les grandes voies romaines sont toujours visibles aujourd'hui dans le paysage français, de même que nombre de villes fondées dans l'antiquité ont subsisté jusqu'à aujourd'hui. Les projets d'aménagement sont coûteux, en temps, en argent, en vies humaines parfois (si l'on songe aux pyramides d'Égypte), et porteurs de sens au-delà de leur aspect utilitaire. Les monuments, qui rythment le paysage et sont partie intégrante des projets d'aménagement importants, sont au sens étymologique des édifices dédiés à une commémoration, c'est-à-dire une matérialisation visible et durable du souvenir d'un événement. L'aménagement du territoire possède donc un caractère immatériel tout aussi important que son pendant physique. Remanier Paris à la fin du 19<sup>e</sup> siècle en perçant des grandes artères, aménageant des quartiers nouveaux, et créant le réseau d'assainissement, est une manière de d'affirmer un système de valeurs hygiénistes aussi efficace qu'une campagne d'information de nos jours.

Devant les enjeux de l'aménagement, les implications humaines et financières des projets urbains, et enfin le fait que ces opérations colossales ne puissent être réalisées que par l'impôt, c'est-à-dire l'argent public collecté en vue d'un bien commun, la question de l'évaluation des projets d'aménagement est cruciale. Elle était opérée le plus souvent sous l'angle de la finalité des actions humaines : l'opération

d'aménagement remplit-elle bien les objectifs (fussent-ils nombreux, ou purement religieux, ou esthétiques) qui l'ont motivée. Elle revêt un caractère beaucoup plus critique ces dernières années, où l'on questionne la domination de l'homme sur la nature pour souligner le fait que cette domination doit être une gestion responsable, dans l'intérêt général des générations actuelles et des générations futures. Ainsi, une opération d'aménagement est-elle aujourd'hui évaluée sous deux angles complémentaires : remplit-elle bien sa finalité (généralement, accroître une notion abstraite de bien-être collectif, le surplus social), et maîtrise-t-on ses impacts (avec au premier chef la consommation d'énergie fossile, les émissions de gaz à effet de serre, les polluants, la perte de biodiversité, etc.).

Il est impossible fondamentalement d'apporter des réponses à ces questions, car elles nécessitent de pouvoir déterminer ce qui va se passer, c'est-à-dire prédire l'avenir. Jean-Philippe Antoni commence ainsi avec beaucoup d'à-propos ses réflexions sur cette question par la boule de cristal et la cartomancie, et force est de reconnaître qu'éclairer les questions posées par l'aménagement relève du tour de force. Il convient de prédire sur le long terme, parfois sur plusieurs générations, les impacts d'opérations portant sur des objets matériels utiles aux activités humaines (des bâtiments, des réseaux, des infrastructures, des équipements, etc.), alors que les principaux déterminants des impacts de ces activités humaines ne sont pas les objets matériels, mais les actions d'individus par essence libres, aux finalités très diverses, et qui plus est mobiles à l'échelle de la planète. Éclairer les questions posées par l'aménagement nécessite donc de prédire le comportement d'une population diverse, aux buts multiples, évoluant (vieillissant progressivement et se rajeunissant radicalement par des naissances), et constamment renouvelée par des apports extérieurs, en fonction d'une intervention ciblée sur une partie des équipements du territoire.

Répondre à de tels défis ne peut se faire sans une approche simplificatrice des sociétés et des comportements humains, comme par exemple l'homme moyen de Quetelet, ou les idéaux-types de Weber. Car c'est là tout le paradoxe de l'observation des sociétés humaines et de leurs implantations spatiales. Malgré la diversité des buts, des croyances, des caractères, des stratégies individuelles et des actions possibles, les systèmes de peuplement humains, vus de manière agrégée, ou plus précisément avec suffisamment de distanciation sont remarquablement stables. Ainsi, il est possible de créer le concept de « navette domicile-travail » à partir de l'observation que de nombreux d'individus travaillent, qu'ils travaillent hors de leur domicile et toujours au même endroit, et enfin rentrent à leur domicile après

avoir travaillé. Étudier les navettes domicile-travail en tant que telles permet de reléguer hors du champ d'étude la motivation des hommes à travailler dans un système organisé. L'identification de concepts prégnants et la construction d'observables ouvrent la voie à une réflexion théorique sur les sociétés humaines, et par rebond sur l'aménagement. Cette réflexion théorique, qui se divise pour des raisons historiques en plusieurs branches (économie, sociologie, anthropologie, géographie, psychologie, etc.) des sciences humaines et sociales, est indispensable pour pouvoir faire des inférences, et par là même apporter des réponses aux questions de l'intérêt collectif d'une opération d'aménagement, ou de ses impacts.

Il est utile de souligner une différence ontologique entre les sciences naturelles (physique, biologie, géologie, génomique, etc.) et les sciences humaines et sociales. Les objets d'étude des sciences naturelles sont par essence cachés, à découvrir, car existant en dehors de l'intention et de l'intervention de l'homme. La découverte du principe de gravité, la formulation d'une loi de gravitation, ainsi qu'une écriture mathématique de cette loi, sont des incursions dans un monde caché à l'homme, préexistant, et dont l'évolution semble se faire en dehors de lui (si l'on songe à la trajectoire de l'univers depuis le big bang). À l'inverse, l'objet des sciences humaines et sociales est entièrement construit par les hommes, donc dépourvu de ce mystère fondamental de l'univers. Il est en revanche incroyablement complexe, sans doute au-delà de ce qu'on peut concevoir, car résultant d'un nombre gigantesque d'actions humaines aux finalités diverses, et dont la pleine compréhension nécessiterait de les replacer toutes dans l'espace et dans le temps (ce qui est déjà une tâche colossale), ainsi que de percer le cœur des hommes pour comprendre les buts et les motifs de ces actions. Les sciences humaines et sociales ne se heurtent donc pas au mur des secrets de l'univers, mais au mur des intentions des actions humaines.

La différence fondamentale entre sciences naturelles et sciences humaines et sociales n'obère pas pour autant toute possibilité d'approche théorique et modélisatrice en sciences humaines, loin sans faut. Le fait que les systèmes sociaux soient construits permet de postuler des mécanismes fondamentaux présidant ou coordonnant cette construction. Un économiste verra dans une ville le résultat de la nécessité d'établir une place de marché pour les transactions commerciales, tandis qu'un sociologue verra dans une ville le résultat d'affrontements entre différents groupes d'individus aux intérêts convergents. Ces deux approches sont assez orthogonales, mais ne traduisent pas de contradiction interne, et encore moins n'illustrent l'impossibilité de porter un regard théorique sur l'objet urbain. Ce sont simplement

deux réductions, deux projections dans des espaces d'analyse disjoints, d'une même réalité plus complexe.

En effet, la complexité est bien au cœur des questions des sciences humaines et sociales pour l'aménagement, de même qu'elle traverse les sciences naturelles. Les systèmes sociaux présentent un caractère de complexité marqué, révélé par des évolutions qui échappent aux lois de comportement des systèmes classiques, ponctuées par des phénomènes d'émergence et d'auto-organisation. Cette complexité, qui n'est pas une complication, une imbrication très touffue de choses simples, mais quelque chose de radicalement différent, est d'ailleurs une condition implicite des opérations d'aménagement, appréhendée instinctivement par les décideurs, et acceptée par tous. Sans recourir intuitivement à des principes relevant de la complexité, comment imaginer autrement que l'aménagement d'un quartier, la construction d'une route, la mise en service d'une ligne de transports en commun, même judicieusement choisis, puissent influencer sur la trajectoire de développement d'un territoire ? À l'échelle des territoires, les opérations d'aménagement prennent souvent l'apparence de gouttes d'eau dans l'océan, noyées par la masse de l'existant, et l'ensemble des autres opérations non coordonnées, allant parfois dans le sens contraire de ce qui est mis en œuvre. C'est bien une croyance dans un « effet papillon », dans un cercle vertueux, qui fait que l'aménagement continue son action interventionniste dans des territoires par ailleurs soumis aux lois du marché et aux opérations individuelles.

Les théories classiques pouvaient se construire quasiment sans données, seulement à partir des concepts proposés, des aspects réifiés des sociétés humaines, sur la base de quelques objets : la distance, l'accessibilité, l'attractivité, la densité, la population, l'emploi, le coût, le temps, etc. L'apparition de données massives, concomitante au développement de l'informatique, a déplacé la focale d'intérêt de la construction théorique des modèles vers leur mise en œuvre pratique. De manière technique, l'effort ne porte plus tant sur la spécification du modèle, que sur son estimation et sur sa calibration. Curieusement, là où la pléthore de données aurait pu bousculer violemment tous les cadres théoriques (modèle gravitaire, modèle d'Alonso-Mills-Muth, modèle de Christaller, modèles de l'École de Chicago, etc.), elle n'a fait que développer l'outillage méthodologique pour estimer ces modèles (régressions spatiales, économétrie, modèles multi-niveaux et multi-échelle).

Les bouleversements dans l'approche modélisatrice de l'aménagement sont venus du côté des informaticiens, sous deux formes radicalement opposées. La première est de cesser de penser la modélisation sur les concepts agrégés qui avaient prévalu jusque-là, pour aller vers

toujours plus de désagrégation, et au partant toujours plus de mimétisme. Pourquoi résumer la demande de déplacement par des flux entre zones quand on peut décrire l'ensemble des trajectoires détaillées de mobilité d'une population, en simulant une population synthétique et estimant des programmes d'activités ? Cette vision désagrégée du monde, et des outils de simulation, repose en grande partie sur le formalisme de la simulation multi-agents, qui permet ainsi d'approcher de manière intuitive des phénomènes complexes difficiles à appréhender autrement. La deuxième forme, qui a commencé doucement sous la forme de fouille de données (*data mining*), et se ramifie et se renforce avec le développement des données massives (*big data*), adopte une posture plus naturaliste sur les sciences sociales. Dans ces approches, plus de concept, plus de théorie, plus de postulat, mais simplement la recherche de phénomènes récurrents, de régularités, d'information, et l'interprétation *a posteriori* de ces régularités. Comment a-t-on découvert la loi de la gravitation, sinon en observant la récurrence du phénomène de chute, interprétée comme un problème d'attraction réciproque entre corps massifs dans un contexte plus général que celui des objets à la surface de la Terre ?

Le principe de l'analyse des *big data* appliqué aux sciences naturelles permet de déceler, dans la masse gigantesque des données collectées, les plus infimes régularités, elles-mêmes révélatrices d'une structure de l'univers, d'une loi naturelle. Appliqué aux sciences humaines et sociales, il permet également de déceler des corrélations multiples et faibles ayant, une fois réunies, un pouvoir explicatif important. Les premières applications à l'analyse de la criminalité en ville ont présenté des résultats étonnamment concluants, presque choquants : comment un programme aussi ignorant des mécanismes peut-il révéler des phénomènes aussi complexes ? Cependant, cette technique ne peut décrire que ce qui est, et non ce qui sera ; elle est strictement limitée à l'analyse des données existante. Toute extrapolation d'un modèle sera informationnelle, mais exempte de tout mécanisme ; elle ne se fera que toutes choses égales par ailleurs. Elle ne peut donc répondre à elle seule aux défis posés par les impératifs du développement durable. Les modèles de simulation et les théories développées en aménagement ont certes pour objet de produire des données, d'éclairer les décisions, et pour ces tâches seules la compétition entre observation toujours plus massive et simulation est sérieuse. Mais ces modèles sont aussi utiles pour leur capacité réflexive sur les pratiques d'aménagement, sur la façon d'appréhender les systèmes sociaux, la place de l'homme dans son environnement, et ses capacités d'intervention.

À ce titre, les *big data* devraient être un ferment fantastique pour la réflexion théorique en aménagement et en sciences sociales. Pour la première fois de son histoire, l'homme est en mesure de disposer de flux de données configurables en dispositifs expérimentaux dépassant de loin, par leur portée et leur intensité, tous les dispositifs précédents (enquêtes, recensements, films, photographies, etc.). Il est également en mesure, de par la puissance de l'informatique, d'aborder la complexité de manière radicale, se démarquant de ses prédécesseurs pour qui un modèle devait avoir une solution analytique, par le calcul, pour être utile. Construire de nouvelles approches théoriques en sciences sociales est le défi majeur qui s'ouvre pour les chercheurs désireux d'apporter un éclairage aux questions d'aménagement et de développement durable.

Olivier BONIN

## INTRODUCTION – LES ACQUIS

Il y a près de quarante-cinq ans, en 1972, le Club de Rome réunissait des chercheurs, des entrepreneurs et des agents de la fonction publique d'une cinquantaine de pays du monde pour réfléchir à la pertinence du système productif inauguré par la Révolution industrielle, et anticiper ses conséquences au regard d'une préoccupation nouvelle dans les pays développés : la planète Terre. Le rapport qu'ils publient (*The Limits to Growth*, traduit en français sous la forme interrogative *Halte à la croissance ?*) est cinglant : il interpelle sur la croissance mondiale à la fin des Trente Glorieuses, et fait prendre conscience de la pénurie prévisible des ressources énergétiques permettant de la maintenir, en insistant sur les conséquences écologiques du développement industriel. Le futur devient dès lors inquiétant pour l'humanité : une population attendue de plus de douze milliards d'individus au milieu du 21<sup>e</sup> siècle, des ressources alimentaires limitées, une production agricole coûteuse et incapable de pallier la disette planétaire, notamment pour l'eau potable, des ressources énergétiques (pétrole et gaz) insuffisantes pour la production économique, malgré des progrès scientifiques qui ne pourront probablement que retarder les échéances. Parallèlement, si tant est qu'elle reste possible, la poursuite de la croissance serait à l'origine d'une pollution exceptionnelle, que la planète ne pourra pas absorber entièrement. Dans ce contexte, même si tous les scénarios du Club de Rome ne mènent pas aux *effondrements* décrits par J. Diamond (2009), l'avenir n'est plus envisageable sans un arrêt de la croissance et une limite de la production industrielle. De nombreuses critiques ont certes été apportées à ces conclusions alarmantes, dont certaines ont probablement été exagérées par manque de méthode : en recevant son prix Nobel en 1974, l'économiste Friedrich Hayek (1899-1992) déclarait à ce sujet que « l'immense publicité donnée récemment par les médias à un rapport qui se prononçait au nom de la science sur les limites de la croissance, et le silence de ces mêmes médias sur la critique dévastatrice que ce rapport a reçu de la part des experts compétents, doivent forcément inspirer une certaine appréhension [...] ». Il n'empêche que le rapport du Club de Rome plaçait pour la première

fois sur la scène internationale un concept qui nourrira de nombreuses réflexions ultérieures, celui de *Croissance zéro*.

Quinze ans plus tard, en 1987, c'est un autre rapport qui interroge le système productif mondial. Publié par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement des Nations Unies, *Notre Avenir à Tous* (que l'on appelle plus communément Rapport Brundtland) pose les bases d'une politique qu'il est nécessaire de renouveler pour maintenir l'économie des pays développés. Elle se résume par deux slogans qui ont fait date : (i) répondre aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs, et (ii) penser global pour agir local. Il en découle plusieurs idées censées conduire à l'action. Premièrement, il est absolument impératif de rester en mesure de répondre aux besoins du développement, en particulier lorsque ces derniers concernent des ressources essentielles dans des régions défavorisées. Deuxièmement, il est également nécessaire de limiter le déploiement sociotechnique imposé par l'industrialisation du monde pour ne pas dépasser la capacité de l'environnement à répondre à ces besoins, actuels ou à venir. Depuis cette publication, l'expression *développement durable* s'est répandue dans le monde entier, jusqu'à devenir une condition théorique actuellement incontournable du monde socio-économique.

Vingt-sept ans plus tard, en 2014, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publie son cinquième rapport et confirme que le réchauffement du climat planétaire est sans équivoque, le nombre des changements climatiques observés étant sans précédent depuis des décennies, voire des millénaires. Avec « 95 % de certitude scientifique », il affirme de surcroît que, depuis le milieu du 20<sup>e</sup> siècle, l'activité humaine en serait la principale cause. Ce constat invite à décréter l'état d'urgence : il appelle une action immédiate pour limiter l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère afin que la hausse des températures ne dépasse pas 2° à l'horizon 2100. Désormais conscients que la croissance économique modifie le système bio-atmosphérique de manière irréversible à moyen terme, la majorité des gouvernements mondiaux envisagent dorénavant de repenser leur mode de fonctionnement pour l'adapter à une ère qui succédera à l'anthropocène (Bonneuil et Fressoz, 2013). La mise en route d'une phase de transition écologique et énergétique semble aujourd'hui définitivement actée. Mais elle annonce naturellement une modification économique de fond, centrée sur la réduction des consommations énergétiques et la généralisation de ressources renouvelables, en utilisant des énergies des flux (vent, soleil, eau) plutôt que de stocks (gaz, pétrole, uranium), pour construire l'avenir

sans en précipiter la fin. La nécessité de la *transition éco-énergétique* (c'est-à-dire à la fois écologique, économique et énergétique) apparaît de ce fait aujourd'hui comme l'un des principaux moteurs politiques de mutation des systèmes productifs et territoriaux.

Par ce qu'elles suggèrent du point de vue des évolutions sociétales souhaitables face aux enjeux du siècle dans lequel nous sommes entrés, les notions de croissance zéro, de développement durable et de transition éco-énergétique vont globalement toutes dans le même sens. Mais elles partagent un autre point commun fondamental, celui d'être complètement abstraites. Livrées sans mode d'emploi, elles nécessitent une adaptation systématique aux secteurs d'activités et aux territoires sur lesquels elles sont censées s'appliquer et qui sont eux-mêmes censés les mettre en œuvre. En France par exemple, le *Grenelle de l'Environnement* en a proposé une adaptation légale (lois de 2007 et 2010) obligeant les acteurs et les décideurs du monde socioéconomique à lutter contre les changements climatiques et à maîtriser la demande d'énergie, à préserver la biodiversité et les ressources naturelles, à instaurer un environnement respectueux de la santé, à adopter des modes de production et de consommation durables, et à construire une « démocratie écologique » qui resterait favorable à l'emploi et à la compétitivité. Pour appliquer ces mesures, les *Agendas 21* locaux ont alors été identifiés comme des outils de contractualisation volontaire permettant d'imaginer et de planifier, dans le temps et dans l'espace, les modifications à mettre en œuvre. Issus du Sommet de la Terre de Rio en 1992, ils apparaissent en effet comme des « plans d'action » fixés pour un territoire donné afin de répondre aux enjeux environnementaux en proposant des recommandations concrètes : lutte contre la pollution, gestion des déchets, agriculture propre, mais également réduction de la pauvreté, amélioration du logement, maintien de la biodiversité par la mise en place de trames vertes et bleues, etc. En 2009, plus de 200 villes françaises avaient délibérément entrepris une démarche « Agenda 21 » et précisé les moyens à mettre en œuvre pour y parvenir, en déclinant leurs objectifs sous la forme de cartographies et de stratégies locales précises.

Dans ce contexte, les objectifs de la transition éco-énergétique relèvent bel et bien aussi, et peut-être même avant tout, d'une problématique d'aménagement du territoire et de gestion des mobilités. En France, ce sont les Schémas de cohérence territoriale (SCoT) et les Plans locaux d'urbanisme (PLU) qui sont aujourd'hui censés déterminer les conditions permettant d'assurer « la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la préservation de la qualité de l'air, de l'eau, du sol et du sous-sol, des ressources naturelles, de la biodiversité, des

écosystèmes, des espaces verts, la préservation et la restauration des continuités écologiques, la prévention des risques [...], des pollutions et des nuisances de toute nature ». À l'heure actuelle, les plans d'aménagement et d'urbanisme de la majorité des grandes agglomérations françaises ont d'ailleurs été « grenellisés » (selon le jargon signifiant qu'ils intègrent désormais les objectifs du Grenelle de l'environnement) ou sont en cours de l'être. D'un point de vue juridique, il semble donc que les territoires disposent aujourd'hui d'un dispositif réglementaire efficace, capable de donner corps à leur transition éco-énergétique dans le long terme. Toutefois, compte tenu de la diversité des changements à mettre en place, il apparaît clair également que l'action ne peut pas se limiter à sa seule dimension juridique, dans la mesure où cette dernière n'offre qu'un cadre, qu'il faut bien remplir d'une manière ou d'une autre : que doit-on écrire dans ces documents, et comment dessiner les cartes qui accompagnent les plans ? Ce questionnement est d'autant plus complexe qu'il s'appuie comme il le peut sur un terrain plutôt mouvant.

D'une part, en effet, la notion de *gouvernance*, et plus spécifiquement de gouvernance territoriale (ou encore locale ou urbaine, à distinguer de la gouvernance économique internationale), a émergé dans les années 1990 comme un nouveau système de gouvernement et de gestion faisant intervenir de multiples acteurs, parmi lesquels certains n'appartiennent pas directement à la sphère des décideurs politiques (et ne sont donc pas des élus représentants du peuple ou des territoires) : les acteurs sociaux et économiques d'un secteur productif, d'un quartier de ville ou d'un système de transport, ses usagers de la vie quotidienne, et finalement la société civile dans son ensemble (les habitants), sont également impliqués dans la prise de décision. En aménagement, cette nouvelle façon d'envisager la gestion des affaires possède plusieurs avantages : elle rapproche les édiles (ceux qui construisent la ville et les réseaux) des usagers (ceux qui les utilisent), elle crée les conditions d'un partenariat souvent nécessaire entre le secteur public et le secteur privé, elle permet aux citoyens de participer à l'action publique par l'intermédiaire d'une concertation et d'une consultation renforcées. En France, sur le plan légal comme sur celui des pratiques, la gouvernance a de ce fait pris une importance grandissante depuis une trentaine d'années, en particulier pour les questions d'aménagement, de mobilité et de démocratie locale. L'État n'est indéniablement plus seul aux commandes et donne parfois clairement l'impression de naviguer à vue en essayant de recoller les morceaux. C'est probablement une bonne chose, mais sans aucun doute, c'est également plus compliqué.

D'autre part, les *innovations techniques* modifient chaque jour le fonctionnement des territoires. Dans les années 1990, la démocratisation « des télécommunications, du congélateur, de la vente par correspondance, en fait de toutes les commodités techniques », ont rendu la concentration urbaine inutile en peu de temps (Bauer, 1993). Avec la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre qui l'accompagnent, l'automobile a également été un vecteur important de recomposition territoriale. À l'heure actuelle, il est possible que les Technologies de l'information et de la communication (TIC) jouent à peu près le même rôle : la mobilité numérique de la majorité des informations nécessaires à l'économie et au commerce moderne instaure une nouvelle norme à l'organisation des activités productives, qui, presque intégralement, pourraient demain s'affranchir de la proximité spatiale. Techniquement, nous disposons aujourd'hui des moyens suffisants pour anéantir les distances et, avec elles, les proximités qui fondent l'existence même des territoires. Mais ce nomadisme territorial, que M. Lussault (2014) qualifie de « mobilisation générale », apparaît avant tout comme une contradiction. Car, dans le même temps que tout se met en mouvement, il est également possible que tout se sédentarise à nouveau : la fin des mobilités est devenue possible en même temps qu'Internet a offert de nouveaux services livrant à domicile une bonne part des informations et des fournitures nécessaires à la vie quotidienne. Mais cette nouvelle territorialité *software* n'est possible que par la réticulation numérique, et suppose un fonctionnement *hardware* qui, lui, ne se soustrait pas à l'économie et à la géographie des proximités : la machinerie indispensable à leur fonctionnement reste stratégiquement localisée là où il est possible de minimiser les coûts et de maximiser les gains. Les espaces nomades ne sont finalement possibles que s'ils sont fortement sédentarisés, ce qui revient à dire que l'on ne peut se passer des services offerts par les territoires que s'il existe des territoires permettant de disposer autrement de ces services : contradiction, ici encore, par laquelle il est possible que tout change sans que rien ne change.

Dans ce contexte mouvant, l'aménagement du territoire reste une nécessité pour toute société installée sur l'espace qu'elle s'est approprié. Il suppose toujours de faire des choix quant à la répartition géographique des hommes et des activités, à la forme de leur habitat dans les écosystèmes urbains et ruraux, et à l'organisation des transports et des mobilités. Dans l'espace, le déploiement des infrastructures qui accompagnent cet aménagement dépend évidemment des techniques et des aspirations propres à chacune de ces sociétés. Mais dans le contexte actuel, fortement contraint par la nécessité globale de

faire évoluer nos modes de production économiques et énergétiques, l'aménagement peut également s'appuyer sur de nouveaux outils de prospective territoriale, orientés vers la modélisation et la simulation informatique de scénarios durables pour le futur. C'est précisément ce lien entre l'aménagement, ses concepts et ses méthodes, que le présent ouvrage souhaite éclairer. Cette approche n'est pas fondamentalement nouvelle, mais elle a fait l'objet d'avancées remarquables au cours des trente dernières années, même si elle peine encore à s'inscrire franchement dans les procédures d'aménagement et de planification territoriale : la considération théorique et modélisatrice des territoires apparaît souvent trop réductrice ou au contraire trop compliquée pour y trouver une place stable et consensuelle. En effet, souvent fondées sur des pratiques et des thématiques orientées par un point de vue disciplinaire singulier au sein des sciences humaines (l'économie, la géographie, la psychologie), elles s'appuient généralement sur les acquis de sciences dites exactes (la physique, les mathématiques, l'informatique) dont le transfert direct reste discuté. Par ailleurs, la modélisation apparaît nécessairement contrainte par sa dimension méthodologique, qui détermine la manière de définir et de traiter les problèmes. Dans le contexte actuel d'une transition éco-énergétique souhaitable, qui nécessite par définition d'intégrer des aspects très variés du monde socio-économique, cette contrainte contribue *de facto* à en limiter la portée des résultats dans un objectif opérationnel.

Après les avoir positionnés dans leur contexte historique et conceptuel, cet ouvrage présente les méthodes et les outils de l'aménagement comme des acquis aujourd'hui indispensables pour réfléchir à l'avenir des territoires. Il propose également de discuter du niveau de confiance que l'on peut raisonnablement leur accorder, en le mettant en perspective avec les débats qu'ils peuvent ouvrir dans le cadre d'un dialogue ouvert pour l'aménagement participatif. En filigrane, il insiste sur les nombreuses possibilités désormais offertes par la modélisation pour construire les bases tangibles d'une *innovation territoriale* qui dépasserait les raccourcis idéologiques et les pré-supposés utopiques. Dans cette perspective, la modélisation présente en effet un ensemble de concepts et de méthodes extrêmement riches, même si ces dernières semblent aujourd'hui n'avoir pu avancer que jusqu'au milieu du gué. Compte tenu du vide conceptuel dans lequel se situe parfois la théorie de l'aménagement, ces méthodes et ces outils doivent aujourd'hui faire l'objet d'une appropriation interdisciplinaire renouvelée pour faire face aux enjeux de demain.

# Première partie

## **Approches conceptuelles : les convictions**

Cette première partie est consacrée aux convictions, c'est-à-dire aux principes et aux idées qui déterminent la nature de l'ordre que l'aménagement du territoire est censé organiser. Par définition, ces convictions ne relèvent pas directement de ce que l'on sait ou de ce que l'on peut démontrer, mais plutôt de ce que l'on croit. Dans ce contexte, le fait d'aménager un territoire, de l'équiper d'infrastructures, d'en contrôler l'urbanisation ou d'y organiser une politique de transport, est intrinsèquement mis en contradiction par deux catégories de convictions majeures. D'une part, l'aménagement renvoie à la planification, et donc à l'idée de « plan », intégrant l'interventionnisme et la programmation économique comme une méthode de construction. Mais, d'autre part, le libéralisme économique auquel adhèrent aujourd'hui la majorité des sociétés occidentales se construit sur l'idée d'auto-régulation par le marché (offre et demande), sans intervention ni planification de la part des autorités publiques. Dans le cadre des mutations de la gouvernance territoriale associées à la nécessité de la transition éco-énergétique, ce positionnement n'est évidemment pas sans conséquences sur l'identification des acteurs, des échelles et des moyens permettant concrètement la mise en œuvre de cette transition. Il est même à l'origine de conflits que l'on peut considérer comme « normaux », et dont on peut également parier qu'ils tendront à se généraliser.

Toutefois, si les notions de libéralisme et de planification relèvent d'une position idéologique contradictoire, le problème se trouve simplifié par le fait qu'elles partagent un objectif commun : anticiper et organiser un futur souhaitable et, si possible, meilleur que le présent, notamment d'un point de vue social et environnemental. Mais, par définition là aussi, ce futur n'est jamais perceptible de manière

immédiate : il ne peut être appréhendé que par approximations, en s'appuyant sur des instruments de « pronostic ». Parmi ces instruments, la prédiction et la prospective se distinguent également comme deux méthodes antinomiques pour visualiser le futur : la première l'introduit comme la suite « logique » du passé (toutes choses égales par ailleurs), alors que la seconde y intègre une part d'imaginaire, et se fonde sur des scénarios plus complexes. Dans un cas comme dans l'autre, cette façon de concevoir l'avenir n'échappe pas au poids des convictions, et l'utopie peut apparaître comme une façon élégante de l'envisager. Elle est d'ailleurs apparue comme une force de propositions importante à travers l'histoire, elle-même conditionnée par le niveau de développement technique des sociétés, qui en rend possible, ou non, la réalisation concrète.

Historiquement, c'est sur l'ensemble de ces choix de départ que les politiques d'aménagement du territoire ont concrètement pu s'amorcer et prendre pied. Elles n'ont pas d'autre alternative aujourd'hui que de continuer à faire de la même manière. Mais, dans l'intervalle, les avancées scientifiques, techniques et pratiques de la *modélisation spatiale* ont permis de mieux comprendre ce que l'on sait du fonctionnement des territoires et parfois de prolonger dans le temps ce que l'on connaît de leur réalité. La démarche modélisatrice apparaît pourtant plus ou moins paradoxale elle aussi : d'une part, elle vise à analyser les mécanismes à l'origine de l'occupation du sol et des mobilités pour en restituer la complexité ; d'autre part, elle ne peut le faire que par une simplification de ces mécanismes, souvent plus ou moins réduits à un point de vue qui, ici encore, traduit ce que l'on pense plus que ce que l'on sait. Dans ce contexte, il n'est pas rare que les convictions se transforment en certitudes. Et ces certitudes sont souvent nécessaires pour élaborer un projet, puisque, sans croire à rien, il devient impossible de construire quoi que ce soit. Le fait d'être conscient de ce problème constitue déjà une partie de la solution.

## CHAPITRE 1

# Aménagement et planification

« *On ne fait pas de guerres pour des territoires  
mais pour des mots* »

Arthur Koestler

Les questions que pose l'aménagement du territoire ne sont jamais simples. Pour commencer, sa définition ne fait pas l'unanimité, ni parmi les praticiens, ni parmi les théoriciens : elle se réfère à des notions complexes en elles-mêmes et parfois difficiles à envisager et à concilier d'un point de vue conceptuel. Dans son ouvrage, fondamental pour la définition francophone de l'aménagement en tant que pratique et que champ disciplinaire universitaire, P. Merlin (2002) botte d'ailleurs habilement en touche, en désignant l'aménagement comme une *praxis*, soit un statut peu clair, qui a pour principal avantage de le distinguer de la science, de la prestation technique ou encore de la performance artistique, donc de ce qu'il n'est probablement pas. Mais sans en dire beaucoup plus sur ce qu'il est précisément. Nous n'avons pas la prétention d'aller plus loin ici. Toutefois, en imaginant que l'on parvienne à donner une définition correcte de l'aménagement du territoire, nous souhaitons insister sur ce que cette définition implique en termes d'enjeux, pour ses applications concrètes comme pour la recherche scientifique. Car le fait d'aménager n'est pas anodin : il implique des acteurs, des échelles et des secteurs d'intervention difficiles à identifier *a priori*, qui ne font pas naturellement bon ménage ensemble, et que l'on marie souvent de force. Ainsi, la confrontation des fondements théoriques de l'aménagement avec les réalités de sa pratique fait émerger les conflits comme une conséquence « normale » de la discipline.

### 1. FONDEMENTS THÉORIQUES

Pour introduire l'idée d'aménagement du territoire, le plus simple est probablement de définir successivement les deux termes qui composent l'expression : aménagement et territoire. C'est évidemment une

gageure en soi puisqu'ils apparaissent fortement polysémiques l'un comme l'autre : si la notion d'aménagement correspond à peu près à ce que les Anglais appellent *planning* (dans un sens qui reste toutefois plus large), le mot territoire trouve plus difficilement son équivalent et correspond ici à une conception de l'espace et des lieux de vie qui semble typiquement française.

### 1.1. Aménagement et territoires

La notion de *territoire*, qui ne se généralise dans la langue française qu'à l'issue de la Deuxième guerre mondiale, se révèle d'emblée pluri-voque : il s'agirait d'un espace délimité par quelque chose, mais sans que l'on ne parvienne véritablement à établir par quoi. La définition de R. Brunet *et al.* (1992), relativement consensuelle, associe le territoire à un espace approprié, incorporant le sentiment ou la conscience de son appropriation, que les hommes intègrent comme une partie d'eux-mêmes, et qu'ils sont de ce fait prêts à investir et à défendre. Dans ce sens, l'idée renvoie à l'expression géographique d'un sentiment communautaire plus ou moins fort, dont la légitimité, souvent représentée et appuyée par un État régalien, se mesure en grande partie par la garantie étatique et l'assurance militaire de l'intégrité de l'espace qu'il recouvre. Cette définition indique donc que, s'il y a action sur le territoire, celle-ci s'exerce *a priori* dans un cadre politique légitime, c'est-à-dire *sur* (ou *dans* ou *avec*) un espace approprié auquel correspond un État. C'est alors l'État qui coordonne cette action, ce qui n'exclut pas que certaines décisions soient prises au niveau local, à des échelles variées, ou au contraire à un niveau plus général, qui dépasse les frontières nationales dans le cadre d'une collaboration inter-étatique plus large.

Le terme *aménagement* est quant à lui à peine plus ancien : on emploie le mot depuis le début du 19<sup>e</sup> siècle, souvent en corollaire à l'idée d'urbanisme (elle-même encore plus récente). Toujours selon R. Brunet *et al.* (1992), il peut se définir comme l'action volontaire et réfléchie d'une collectivité (l'État par exemple) sur son territoire et, cela va presque de soi, comme le résultat de cette action. Le dictionnaire de P. Merlin et F. Choay (2015) ajoute une dimension temporelle à cette définition : il s'agit de disposer avec *ordre*, à travers l'espace d'un pays et dans une vision prospective, les hommes et leurs activités, les équipements et les moyens de communication, en prenant en compte les contraintes naturelles, humaines et économiques, voire stratégiques. De façon générale, l'aménagement organise donc les fonctions et les relations entre les hommes qui vivent sur le même territoire de la façon la plus *commode* et la plus *harmonieuse*, en tenant compte de la physique géographique dans laquelle il se situe, et de l'environnement

dans lequel il évolue. L'ordre, la commodité et l'harmonie apparaissent ici comme des notions centrales, que l'on souhaite appliquer simultanément aux hommes, aux activités et aux moyens de communication à travers une disposition spatiale qui en devient le vecteur. Comprendre l'essence de l'aménagement revient alors à interpréter ce que cet *ordre* peut être. Nous le faisons ici sous la forme d'une hypothèse : l'aménagement vise à créer une situation ordonnée, qui est à ce titre jugée préférable à une autre situation, et précisément, préférable à une situation qui résulterait de l'absence d'intervention volontaire sur l'espace.

### 1.2. Volontarisme et interventionnisme

En tant qu'action volontaire sur le territoire, l'aménagement apparaît donc immédiatement dans une opposition théorique (un rejet plus ou moins implicite) avec la doctrine libérale qui, depuis A. Smith (1723-1790), prône le laisser-faire d'une *main invisible* (libre jeu des forces économiques) pour ordonner spontanément les choses selon l'équilibre supposé du marché (situation optimale). Dès lors, comme le fait remarquer P. Merlin (2002), il n'est pas surprenant que les politiques d'aménagement les plus fortes aient souvent coïncidé avec les territoires politiques de la planification économique (l'ex-URSS, la France des Trente Glorieuses) et soient moins présentes dans les pays de tradition libérale (États-Unis, Grande-Bretagne), même si ces derniers n'en sont jamais complètement exempts : les États-Unis, par exemple, ont clairement recouru à une logique d'aménagement pour planifier le déploiement de leurs infrastructures autoroutières à l'issue de la deuxième guerre mondiale, période qui correspond paradoxalement aussi à l'expansion planétaire de l'idéologie libérale dominante en Occident.

En tant qu'intervention volontaire, l'aménagement apparaît donc nécessairement comme une forme de planification qui inscrit dans le temps et l'espace les actions et les moyens concrets qui permettent de parvenir à un futur identifié. Aménagement et planification s'inscrivent alors dans une même logique de stratégie et de prospective, qui se déroule sous la forme d'un *plan* (Destatte et Durance, 2009). Dans ce contexte, il n'y a rien d'étonnant à ce que la politique d'aménagement du territoire française, par exemple, ait correspondu au début de la période de planification économique qui s'est ouverte en 1947 avec le plan Monnet (I<sup>er</sup> plan). Sa définition « officielle » a alors été proposée par le Ministre de la reconstruction et de l'urbanisme (MRU), E. Claudius-Petit (1907-1989), au tout début des années 1950 : « 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 ». Cette définition, qui a l'avantage de distancier l'aménagement d'une simple action économique au profit de l'épanouissement populaire, n'a dès lors jamais été remise en question dans ses fondements. Même s'il existe des nuances après 60 ans de pratique française, l'aménagement reste porté par les ministères qui ont succédé au MRU (ministère de l'Équipement, puis de l'Écologie) dans une planification qui s'est assouplie en intégrant la réalité de la régionalisation (lois de décentralisation de 1982), et en s'appuyant sur une administration dite de mission dédiée à cet exercice depuis 1963 : la DATAR (Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale).

Au même titre que l'urbanisme, l'aménagement du territoire peut donc s'assimiler à une forme de planification spatiale, qui doit être distinguée de la planification économique, même si leur objectif est commun : donner un cadre aux actions des collectivités pour réaliser un futur souhaitable à plus ou moins long terme. L'aménagement vient en quelque sorte compléter la planification économique en proposant des perspectives géographiques ; il cherche à traduire le plan en termes de stratégie spatiale, donc de cartes. Sans déploiement dans l'espace, l'expérience montre en effet que la planification économique apparaît souvent incomplète et peut se révéler inefficace ou contre-productive : on ne crée pas de complémentarité ni d'échanges entre deux lieux sans une route permettant de les relier. On peut d'ailleurs se poser la question légitime de savoir si la planification a une utilité réelle quand elle ne s'accompagne pas d'une politique spatiale et d'un projet géographique. Nous sommes bien ici dans le champ des convictions.

### 1.3. Une réalité et une temporalité

D'un certain point de vue, le concept d'écoumène, fondamental en géographie, peut être considéré comme le résultat inhérent à l'aménagement du territoire. L'écoumène se définit en effet de manière relativement unanime comme la « partie de la Terre occupée par l'humanité » (Brunet *et al.*, 1992) ou encore comme l'ensemble des « lieux où les hommes se sont installés de manière permanente, incluant les activités économiques qui permettent cette installation » (George, 1970). Entendu dans ce sens, il apparaît en quelque sorte comme la « terre *en tant qu'elle* est humanisée, c'est-à-dire habitée, aménagée, représentée et imaginée par les sociétés humaines » (Berque, 1995), et renvoie donc plus ou moins

directement à l'idée d'anthropisation de l'espace terrestre, elle-même à l'origine de la création des territoires en tant que lieux de vie concrets.

Ainsi, dans le même temps que l'homme s'est émancipé sur toute la planète, l'espace écologique et « naturel » a reculé devant la progression de l'écoumène. Pour qualifier cette progression, H. Isnard (1981) évoque la notion d'*hominisation de l'espace*, qu'il résume en trois étapes. Premièrement, c'est l'adaptation de l'homme au milieu, c'est-à-dire l'utilisation passive des conditions offertes par l'espace écologique ; c'est pour l'homme la découverte de l'instrument, la pratique de la cueillette, de la chasse et de la pêche du paléolithique. Deuxièmement, c'est l'asservissement du milieu au but de l'homme (action spontanée), c'est-à-dire l'asservissement des conditions de l'espace écologique dans un but consciemment choisi ; c'est l'invention de l'agriculture, la sédentarisation et la structuration des sociétés rurales qui s'échelonnent du néolithique jusqu'au 17<sup>e</sup> siècle à peu près. Enfin, c'est la construction des territoires de façon non spontanée, c'est-à-dire la fabrication de toutes pièces d'un espace correspondant exclusivement aux besoins sociaux, qui ne doit quasiment plus rien aux mécanismes spontanés de l'espace écologique ; c'est l'invention de l'industrie, le développement des techniques et l'urbanisation des 17<sup>e</sup> et 18<sup>e</sup> siècles, puis l'époque de la révolution cybernétique et l'entrée de l'homme dans le cosmos, entraînant une modification des équilibres planétaires.

Selon ce schéma, l'aménagement du territoire (entendu au sens large) apparaît donc concrètement dès le néolithique, à partir du moment où l'homme expulse les autres êtres vivants de leur espace écologique pour y installer ses cultures, ses troupeaux, son habitat, ses réseaux de communication, etc. À force d'aménager des territoires de plus en plus vastes (à l'aide de techniques sans cesse renouvelées) pour les adapter à ses besoins, l'étendue des transformations que l'homme a apportées à l'espace écologique a conduit un certain nombre d'auteurs à souligner qu'il n'existe aujourd'hui probablement plus que des milieux écologiques naturels très restreints : les cœurs de désert, les très hautes terres de montagne, les régions polaires, etc., font partie des derniers espaces dont le fonctionnement correspond encore à ce que F. Ramade (2002) appelle des écosystèmes « vrais ». Et encore, ces milieux ne sont quasiment jamais exempts de l'action de l'homme qui, même s'il n'y est pas directement présent, contribue à leur modification à distance : la disparition de certaines espèces végétales et animales modifie par exemple les chaînes trophiques à une échelle parfois très large, la radioactivité, comme les pluies acides, se délocalisent de leur lieu de production au gré des conditions atmosphériques qui les transportent possiblement en tous lieux, etc.

À l'échelle de chaque territoire, l'aménagement (entendu à la fois comme une action et comme le résultat de cette action) apparaît ainsi comme une nouvelle réalité terrestre, qui conditionne l'ensemble de la vie quotidienne dans le temps long, mais sans que les usagers de l'espace ne soient plus nécessairement conscients des objectifs et des opérations qui ont contribué à aménager cet espace : pourquoi a-t-on construit ce port ici, cette ville nouvelle là ? Pourquoi cette route part-elle dans ce sens et pour quelle raison est-elle bordée d'arbres, etc. ? Même si toutes les opérations d'aménagement ne se sont pas conclues par un succès total en termes d'ordre et d'harmonie, et même si les choix et les convictions qui ont conduit à leur réalisation ont été oubliés, il n'en reste pas moins qu'elles ont changé (et changent encore) fondamentalement le visage des territoires et contribuent à leur donner une réalité qui leur est propre et qui perdure à l'échelle des siècles ou, au minimum, des décennies, avec des conséquences qui se mesurent parfois à l'échelle planétaire.

## 2. FONDEMENTS PRATIQUES

Pratiquement, la nouvelle réalité terrestre et les espaces de vie du long terme qu'implique l'aménagement du territoire n'apparaissent que très rarement comme le fruit d'une routine reproduite à travers les siècles : ils découlent au contraire d'une série de contraintes fortement contextualisées, qui mettent en jeu, dans un renouvellement quasi permanent, des espaces et des édiles, des échelles imbriquées les unes dans les autres et des acteurs de la vie socioéconomique. Chacun à leur niveau, l'ensemble de ces éléments conditionne le champ des possibles et permet d'inscrire dans l'espace une vision du monde et des choses. L'analyse du jeu des acteurs devient alors fondamentale pour en comprendre les fondements pratiques.

### 2.1. Des acteurs

Par définition, la planification spatiale concerne avant tout l'échelle d'un territoire dont l'intégrité est garantie par le pouvoir d'un État, qui en devient par la même occasion le principal acteur. Ce point de vue, relativement bien assis en théorie, résiste assez mal à la mise en application pratique. Dans la réalité, les politiques d'aménagement se dessinent en effet souvent à partir d'une multitude d'autres acteurs et d'autres décisions qui ne convergent pas nécessairement *a priori*, ni d'un point de vue politique (que faire et comment faire ?), ni d'un point de vue spatial (sur quel espace le faire ?). C'est d'ailleurs l'un des rôles de l'État et des collectivités territoriales que d'assurer cette convergence politique, dont les

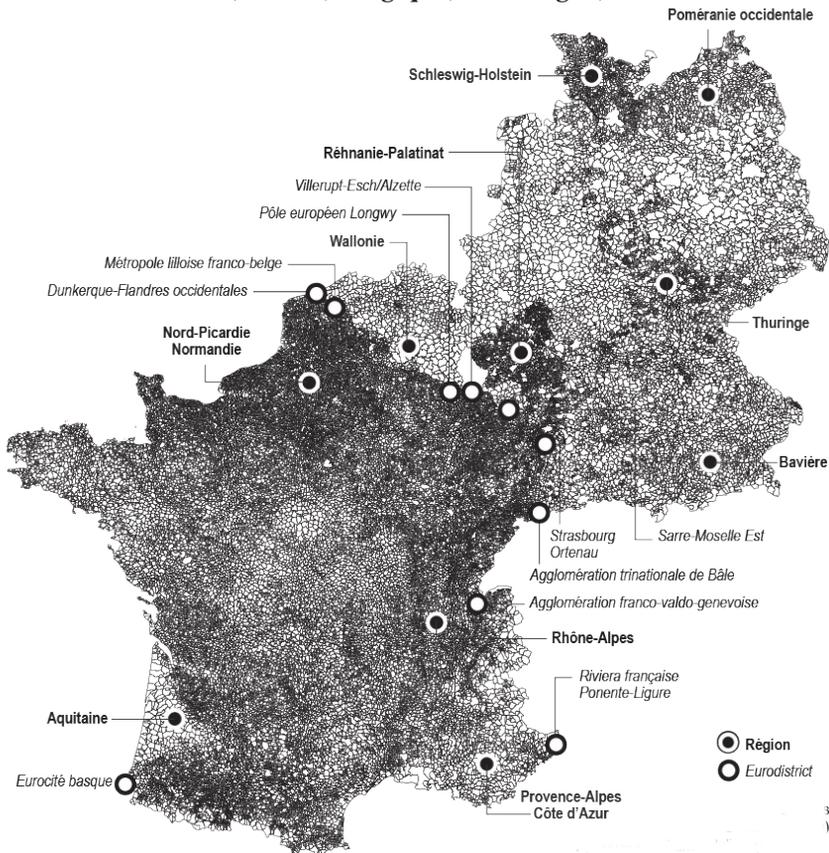
résultats peuvent avoir des conséquences et subir des contraintes à différents échelons. Du local (ville, région) au global (pays, continent, monde), les stratégies mises en place pour la planification spatiale impliquent simultanément plusieurs échelles imbriquées dans le même exercice pratique, chacune étant représentée par des hommes et des institutions dont les intérêts se situent quelque part entre le général et le particulier.

Dans ce contexte, n'importe quelle zone géographique délimitée fait en réalité l'objet d'un aménagement qui s'appuie sur une administration territoriale qui lui est propre, quelle que soit son échelle (État, pays, région, etc.). Cette administration correspond généralement à une organisation institutionnelle et administrative en charge de la gestion du territoire et de la construction de son avenir. Sa structure, sa taille et son mode de fonctionnement influencent donc nécessairement la façon dont sont conçues sa capacité et sa manière de l'administrer, de le gérer et finalement de l'organiser spatialement. Cette capacité et cette manière de faire peuvent naturellement fortement varier d'une région à l'autre, d'un pays à l'autre, en fonction des aspirations des personnes ou des régimes au pouvoir et des spécificités liées au terrain, c'est-à-dire des particularités locales. Quoi qu'il en soit et quelle que soit la forme qu'elle prend, la répartition des pouvoirs au sein d'un espace entraîne naturellement une répartition spatiale des fonctions et des compétences, ainsi que la mise en place d'un certain nombre de relais locaux. La diversité de cette répartition n'est pas très difficile à visualiser. La figure 1.1 montre par exemple la taille du plus petit échelon administratif (équivalent de la commune) en France, en Belgique et en Allemagne. Au-delà de la structure politico-administrative propre à ces trois pays voisins (centralisation ou fédéralisme), la différence de taille des communes est nettement visible selon les régions. Elle témoigne d'une histoire (ou d'une série d'histoires) dont découle une organisation différenciée qui influe nécessairement sur les politiques d'aménagement du territoire et les enjeux à différentes échelles, ainsi que le rôle et les compétences des acteurs locaux qui les mettent en œuvre.

Au cours du développement et de la démocratisation des États modernes, la France est par exemple l'archétype d'une nation qui a choisi la voie de la centralisation du pouvoir, pendant que d'autres espaces ont opté pour une organisation fédérale. Une centralisation parfaite, pour peu qu'elle puisse exister, correspondrait à la concentration de l'ensemble des compétences d'un territoire aux mains de l'État auquel elle s'associe, et de lui seul, impliquant de ce fait le rattachement à l'État de tous les actes administratifs, y compris ceux qui ne concernent que les niveaux locaux. Les pays centralisés (comme la France ou l'ex-URSS) font généralement d'abord confiance à leur

administration centrale (même si celle-ci se situe parfois en régions). Les pays décentralisés (l'Allemagne par exemple) ont en revanche plutôt tendance à laisser une marge de manœuvre importante aux instances régionales (en l'occurrence, les *Länder*). Dans d'autres cas de figure, notamment aux Pays-Bas, la planification et l'aménagement se fondent sur une communication et des relations complexes entre les différents niveaux institutionnels, et conduisent à des partenariats publics-privés fortement appuyés sur des travaux d'étude et de réflexion débouchant souvent sur un débat public (Boyer, 1989).

Figure 1.1  
**Eurodistricts et découpage communal**  
**(France, Belgique, Allemagne)**



La taille des unités administratives de base témoigne d'une histoire régionale et d'une organisation territoriale qui n'est pas strictement dépendante des frontières nationales, elles-mêmes de plus en plus ouvertes à la coopération transfrontalière. À chacune de ces spécificités locales correspondent également un jeu d'acteurs propre et des compétences particulières pour les procédures d'aménagement.

Sources des données : EuroGlobalMap, 2014 ; MOT, 2015.

De surcroît, au-delà des spécificités régionales liées aux choix locaux d'organisation et d'administration territoriales, les effets actuels de la mondialisation permettent de moins en moins de concevoir l'aménagement du territoire uniquement à l'intérieur des frontières d'un État. En Europe, de nombreuses questions se posent spécifiquement dans les zones frontalières, ce qui contribue à accroître la dimension internationale des pratiques de planification, dans un contexte institutionnel, administratif et juridique qui reste souvent à inventer, par exemple dans le cadre des Eurodistricts (figure 1.1). Le passage d'une frontière pose en effet immédiatement la question de l'aménagement des espaces frontaliers que l'on peut considérer comme des zones de contact, ou au contraire comme des zones tampons, mais qui requièrent systématiquement un aménagement (ou une absence d'aménagement) spécifique (Antoni, 2009). En résumé, sur le plan des acteurs, il existe presque autant de variations que de réalités régionales, ce qui empêche de définir d'un point de vue universel et systématique les procédures et les pratiques d'aménagement, et donc d'en donner une définition précise qui dépasserait les cas particuliers : l'aménagement est avant tout une pratique *ad hoc*. En conséquence, un problème à peu près similaire se retrouve quand on soulève la question des échelles.

## 2.2. Des échelles

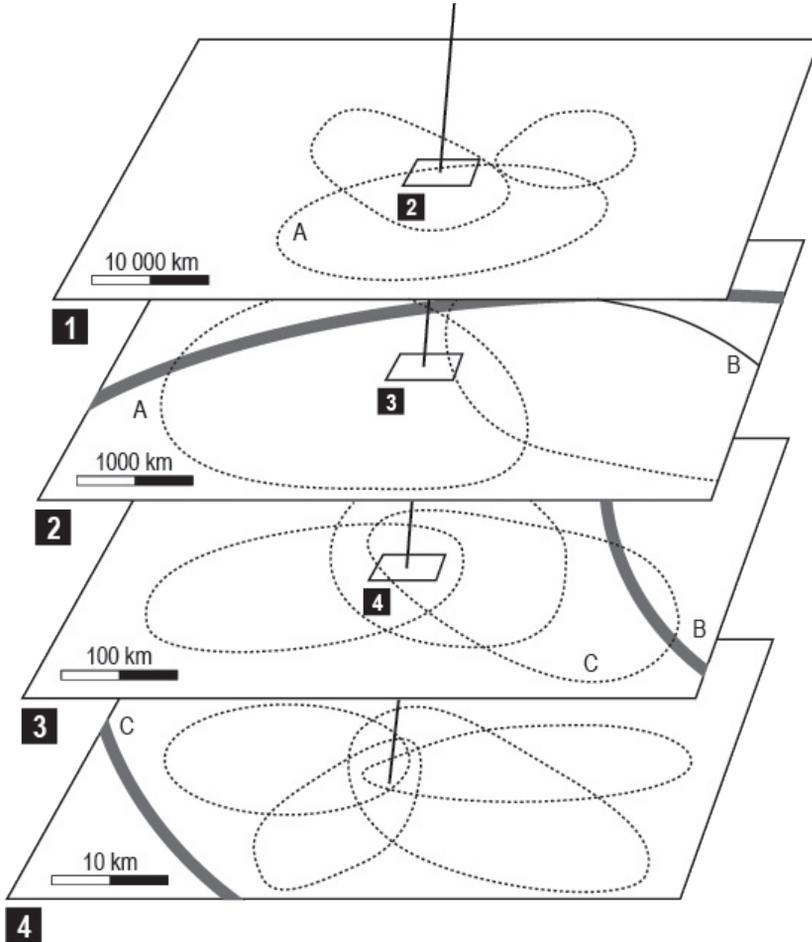
La notion d'échelle est fondamentale pour les géographes comme pour certains économistes (auxquels on pourrait ajouter de nombreux psychologues et sociologues). Elle n'en reste pas moins floue et fortement polysémique. Étymologiquement, en effet, le mot échelle vient du latin *scala* (qui signifie escalier) et désigne avant tout (au sens propre) un instrument pratique formé de deux montants parallèles (parfois légèrement convergents) réunis par une série de barreaux régulièrement espacés, qui servent de marches... soit « un dispositif permettant de se déplacer en hauteur ». Au sens figuré (et scientifique) en revanche, l'échelle s'entend comme une « suite progressive ou continue » indiquant l'existence d'un ordre ou d'une hiérarchie. On parle alors de l'échelle du vivant comme d'une série régulière et ininterrompue d'organismes (des plus simples aux plus perfectionnés), de l'échelle sociale comme de la hiérarchie des conditions et des situations au sein d'une société, de l'échelle des valeurs, des couleurs, des sons, etc. Ces deux définitions ont peu de choses en commun avec l'échelle telle qu'on l'entend généralement dans les disciplines dites spatiales. Ici, la notion est plus complexe et conduit à des malentendus

récurrents. Selon J. Levy et M. Lussault (2003), elle repose sur « une triple vulnérabilité » : (i) la prétention à un monopole universel alors qu'elle ne concerne concrètement que l'espace géographique ; (ii) une confiance ingénieuse dans l'effet causal direct supposé de la taille des phénomènes spatiaux sur leur nature ; et (iii) une méprise pénible quand l'échelle géographique (on parle de grande échelle pour désigner ce qui est grand) est confondue avec l'échelle cartographique (on parle de grande échelle pour désigner ce qui est petit).

Quoi qu'il en soit, en aménagement, l'échelle fait généralement référence à un ou plusieurs niveaux de représentation et d'organisation des événements, des phénomènes et des processus à l'œuvre au sein de l'espace géographique. Elle n'est donc pas fondamentalement très éloignée de l'escalier qui permet de relier un niveau à un autre, marche par marche. Mais elle intègre « en plus » un *dimensionnement* des espaces de la surface terrestre, et elle oblige à réfléchir aux échelons adéquats pour les observer correctement. Dans cette perspective, et à l'instar des économistes qui distinguent généralement les trois niveaux macro-méso-micro, Y. Lacoste (2014) propose un classement plus complexe en six ordres de grandeur. Le premier se mesure en dizaines de milliers de kilomètres (continent, océan, etc.) et n'est représentable que sur une carte à très petite échelle (de l'ordre du 1/20 000 000 ou moins), alors que le dernier ne concerne que quelques centaines de mètres (quartier, zone de projet, etc.) et se représente sur des cartes au 1/1000. Ainsi, l'échelle d'analyse d'un territoire apparaît avant tout comme un point de vue (au sens presque littéral) qui permet de l'observer selon des angles différents, qui révèlent des réalités différentes elles aussi.

Toutefois, ce qui vaut pour le territoire, entendu comme un ensemble de lieux qui fonctionnent en interactions, ne vaut pas nécessairement si l'on considère ces lieux individuellement : quand on réduit chaque localisation à une position localisée sur le globe terrestre, elle est nécessairement multi-scalaire et peut être analysée à toutes les échelles possibles et imaginables. Parmi ces dernières, certaines apparaissent alors naturellement plus pertinentes que d'autres pour comprendre ce qu'il s'y passe, dans une démarche qui nécessite d'intégrer les dimensions influençant concrètement la réalité de chaque lieu. Pour illustrer cette intégration spatiale, Y. Lacoste (2014) propose une analyse multi-scalaire qu'il illustre par la figure du diatope (du grec *dia* qui signifie à travers, et *topos* qui signifie lieu). Le diatope (figure 1.2) est un diagramme composé de plusieurs plans superposés et imbriqués correspondant chacun à une échelle d'analyse. À travers une série d'enveloppes inspirées de la théorie mathématique des ensembles, chacun de ces plans présente des ensembles géographiques avec « des contours infiniment

Figure 1.2  
Figure du diatope



Le diatope proposé dès 1976 par Y. Lacoste (2014) est un diagramme théorique qui superpose et qui imbrique plusieurs échelles d'analyse. À travers des enveloppes inspirées de la théorie mathématique des ensembles, chacun de ses plans correspond à un ordre de grandeur qui influence le fonctionnement des autres et qui conditionne le dimensionnement spatial des territoires.

variés : circulaires (limite d'une ville), linéaires (route, grand axe de circulation), digité (réseau fluvial), en archipel, etc. ». En haut du diagramme, le plan 1 correspond au premier ordre de grandeur (dizaines de milliers de kilomètres) : il représente l'échelle globale qui peut correspondre à un continent ou à l'ensemble du globe. Au centre de ce plan, le rectangle 2 correspond au plan d'ordre de grandeur 2, également représenté plus bas à une échelle différente. Ce deuxième plan (milliers de kilomètres) comprend des ensembles qui lui sont propres,

mais qui incluent ceux de l'ordre 1, même si ces derniers ne sont plus directement lisibles ou compréhensibles à cette échelle (exemple des ensembles A, B et C). Ainsi de suite, les éléments de l'ordre 2 se retrouvent sur le plan d'ordre 3 et ceux de l'ordre 3 sur le plan d'ordre 4 (le nombre de plans étant ici schématiquement fixé à 4). Même s'il nécessite une adaptation à chaque étude de cas (adaptation qui peut s'avérer difficile sur des territoires complexes), le schéma du diatope a l'avantage de rappeler le double enjeu de l'échelle pour l'aménagement : d'une part, il est éclairant de distinguer les différents ordres de grandeur qui influencent le fonctionnement d'un territoire ; et d'autre part, pour chacun de ces ordres, il est fondamental d'essayer de circonscrire les ensembles géographiques qui le composent, et d'identifier la manière avec laquelle ils intersectent un ensemble d'ordre supérieur ou inférieur.

Concrètement, la dimension multi-scalaire du diatope ne facilite donc pas l'épineuse question de la délimitation des terrains d'étude : si toutes les échelles peuvent potentiellement influencer un lieu, comment mener à bien une étude ou un projet d'aménagement sans systématiquement étudier le monde en entier ? L'exemple du Grand Paris apparaît ici particulièrement intéressant. En effet, dans le cadre des débats qui se succèdent depuis 2007 pour transformer la capitale française en « grande métropole mondiale », la question de l'ordre de grandeur est omniprésente : comment concilier l'image d'une agglomération qui souhaite concurrencer les plus grandes capitales mondiales (avec lesquelles elle est reliée par des infrastructures aéroportuaires de premier ordre) avec les aménagements concrets qui ne concernent que l'échelle locale ou régionale (production de logements neufs, ré-équilibre entre habitat et emploi, restructuration du système de transport) ? Les échelles d'intervention sont ici particulièrement mouvantes, sur un territoire que certains<sup>1</sup> ont proposé d'étendre le long de la vallée de la Seine jusqu'au Havre, pour valoriser, à une échelle intermédiaire, la complémentarité qu'offre cet axe naturel reliant Paris à la mer. Parallèlement, les décideurs doivent également faire face à un dilemme identifié depuis *Paris et le désert français* (Gravier, 1947), montrant que si la taille de la capitale devrait être maîtrisée pour limiter son hypertrophie à l'échelle nationale, cette réduction jouerait en sa défaveur à l'échelle européenne face à Londres, à Barcelone ou aux villes rhénanes (notamment pour l'accueil de grands événements internationaux dont

1. On peut par exemple citer le projet de A. Grumbach « Une vallée de la Seine, de Paris au Havre », réalisé dans le cadre de la consultation de 2008-2009 de l'Atelier international du Grand Paris, argumentant que « Paris, si elle veut rester dans le peloton restreint des villes de rang mondial au 21<sup>e</sup> siècle, doit se projeter dans la très grande échelle de la mondialisation, dont le transport maritime est l'épine dorsale. Toutes les métropoles internationales sont portuaires ».

les jeux olympiques sont un bon exemple). La complexité qui résulte de cette question d'échelle est aujourd'hui clairement visible dans la multiplication et le chevauchement des institutions en charge de la mise en œuvre de ces projets : Métropole du Grand Paris, Paris Métropole, Atelier international du Grand Paris, Société du Grand Paris, Grand Paris Express, etc. Dans ce contexte, chacun de ces établissements représente son propre ordre de grandeur, qui correspond aux choix et aux convictions des acteurs qui les gèrent : plus que l'emboîtement des niveaux d'influence spatiaux, ce sont finalement ces périmètres administratifs qui déterminent concrètement les échelles d'intervention possibles, ainsi que le financement de l'aménagement. En pratique, c'est une réalité pragmatique qui simplifie très nettement la question théorique de la délimitation d'un terrain d'étude.

### 2.3. *Des secteurs*

Dans la mesure où il concerne simultanément les hommes et leurs activités, ainsi que les équipements et les moyens de communication qu'ils peuvent utiliser pour les réaliser, l'aménagement du territoire apparaît comme un exercice global par définition. Pour autant, dans la pratique, on lui accole souvent un adjectif qui vient préciser ou limiter son caractère intrinsèquement global, et qui le réduit à une approche plus analytique que systémique. On parle ainsi d'aménagement urbain ou rural, d'aménagement d'un milieu (montagne, littoral, etc.), d'aménagement agricole, industriel, commercial, sanitaire, universitaire, des transports, etc. D'emblée, cette sectorisation des champs d'intervention possibles apparaît en contradiction avec la globalité et l'intégration sectorielle à laquelle l'aménagement prétend, de l'urbain au rural, du local au global, et du général au particulier.

L'approche dite analytique consiste à décomposer un objet en plusieurs parties et à les étudier indépendamment les unes des autres. Pour comprendre comment fonctionne une machine à vapeur, on peut par exemple s'intéresser d'abord à l'étude physique de son moteur thermique, puis à celle des pistons qui actionnent mécaniquement la machine. Cette sectorisation apparaît intellectuellement plus simple que l'étude intégrée de l'ensemble, sans pour autant empêcher d'en comprendre le fonctionnement général. Mais dans de nombreux cas, notamment quand il s'agit d'étudier des ensembles complexes, territoriaux par exemple, cette dissociation d'un « tout » en plusieurs parties distinctes et indépendantes empêche d'atteindre une compréhension globale. À l'instar de ce qu'enseignent aujourd'hui les modèles LUTI, l'urbanisation ne peut par exemple pas être correctement comprise si

l'on ne tient pas compte des infrastructures de transport, alors que les politiques de transport sont elles-mêmes fortement influencées par l'urbanisation : nous sommes ici face à deux éléments interdépendants et couplés de manière dynamique, dont l'étude analytique et sectorielle masquerait immédiatement la subtilité du fonctionnement. La théorie générale des systèmes proposée par L. von Bertalanffy (1968) vise justement à pallier ce problème en proposant une démarche plus ou moins universelle applicable à quasiment tous les domaines, en considérant ces ensembles sous la forme de *systèmes* connectés et emboîtés les uns dans les autres. Elle a de ce fait largement contribué à généraliser l'emploi du mot « système » pour désigner tout ce qui fonctionne de manière intégrée : système-ville, système de villes, système de transport, système territorial, etc.

Dans ce contexte théorique, il n'y a rien d'étonnant à ce que l'approche systémique soit presque toujours sollicitée pour traiter les questions d'aménagement, dans des villes qui deviennent des systèmes urbains au sein de territoires que l'on qualifie de systèmes spatiaux : l'évolution sémantique témoigne en elle-même d'un rejet de l'approche analytique, dans l'objectif de mieux appréhender la complexité. La sectorisation avec laquelle les territoires ont longtemps été analysés et enseignés, c'est-à-dire décomposés en champs supposés indépendants (économie, habitat, transport, etc.), semble désormais obsolète : l'expérience montre qu'au contraire, il est possible (voire préférable) d'intervenir sur les transports pour modifier l'habitat, sur l'économie pour modifier les transports, et de redéfinir les temporalités urbaines pour en améliorer le fonctionnement sans intervenir directement sur l'espace. Les territoires s'envisagent donc aujourd'hui comme un ensemble spatio-temporel, c'est-à-dire une « totalité » dont on ne peut séparer les parties sans en perdre la signification. Dans la théorie générale des systèmes, quatre axiomes suffisent à justifier ce point de vue : (i) le tout est plus que la somme des parties, (ii) la totalité détermine la nature de ces parties, (iii) les parties ne peuvent pas être comprises lorsqu'on les considère isolément sans référence à la totalité, (iv) elles sont dynamiquement reliées entre elles dans une interaction et une interdépendance incessantes (Fondi, 1986). Les notions d'aménagement intégré et de transversalité, voire de gouvernance, renvoient d'ailleurs fondamentalement elles aussi à une prise en compte *en totalité* des territoires considérés comme des systèmes.

Dans la pratique, cependant, les problématiques de l'aménagement sont souvent analysées par des approches thématiques qui restent fortement sectorisées : les projets sont étudiés en parallèle sous l'angle des déplacements, des logements, de l'économie (etc.), mais plus rarement

appréhendés de façon transversale comme le voudraient les études dites de « développement intégré ». Dans son ouvrage synthétique sur l'urbanisme, P. Merlin (1995) n'échappe d'ailleurs pas non plus à cette sectorisation dont il se sert presque comme d'un prisme pour décomposer les problématiques de l'aménagement en différents volets : l'habitat, les activités, les transports, les équipements, etc. Parallèlement, la Fédération nationale des agences d'urbanisme (FNAU), qui représente une partie des professionnels de l'aménagement, fait également remarquer que les politiques sectorielles menées par l'État et les collectivités territoriales manquent parfois singulièrement de cohérence, et peuvent de ce fait apparaître contradictoires : comment, par exemple, le secteur de l'urbanisme peut-il promouvoir le renouvellement urbain si le secteur économique favorise des dispositifs financiers (prêts à taux réduits) pour des acquisitions foncières qui contribuent à la périurbanisation ? Comment le secteur de l'urbanisme peut-il quant à lui mettre en œuvre une politique de valorisation des mobilités douces (et courtes) et favoriser les transports en commun, si, parallèlement et sans concertation, le secteur des transports construit des rocade autoroutières qui encouragent implicitement des déplacements automobiles plus longs ? Ici, ce sont souvent les procédures et les mécanismes de concertation en eux-mêmes qui interdisent une réflexion globale et une approche systémique des territoires, selon une logique de guichet dont les effets pervers sont relativement bien connus.

Le fait de dénoncer l'écueil d'une démarche trop analytique pour l'étude des systèmes territoriaux ne suffit donc pas à s'en affranchir complètement : la sectorisation des problèmes et des compétences reste souvent fondamentalement inscrite dans les procédures et les financements de l'aménagement, et conditionne le mode opératoire à travers lequel les questions posées peuvent être administrativement traitées. En France, cette situation résulte d'une histoire complexe qui a produit et sédimenté, depuis plus de 50 ans, des règlements et des façons de faire tout à fait pertinentes au moment de leur mise en place, mais qui apparaissent aujourd'hui parfois trop cloisonnés et trop rigides. Une solution pour sortir de l'impasse consisterait à prendre en compte les objectifs généraux d'aménagement du territoire *avant* la mise en place de ces politiques sectorielles, ce qui suppose un effort important de consultation, de concertation et de négociation entre les acteurs impliqués à différents échelons. Cette concertation constitue d'ailleurs en elle-même un champ de l'aménagement à part entière, qui mobilise des compétences et des savoir-faire propres, avec cette difficulté supplémentaire qu'en faisant de la négociation son objectif, elle conduit nécessairement à des conflits.

### 3. FONDEMENTS CONFLICTUELS

De par son positionnement, à cheval entre les acteurs, les échelles et les secteurs d'intervention, l'aménagement du territoire poursuit des objectifs conflictuels par essence. Le premier conflit, qui apparaît immédiatement d'un point de vue théorique, oppose les pratiques d'intervention volontaire sur l'espace géographique à la doctrine libérale non interventionniste qui mise sur l'équilibre produit par le laisser-faire. Mais d'autres contradictions sont sous-jacentes *a priori*, notamment quand elles concernent l'application des principes d'égalité, d'équité ou d'efficacité spatiales, en particulier si elles impliquent une modification de l'environnement et des écosystèmes au profit d'infrastructures et d'aménagements des lieux de vie. Ces contradictions, qui peuvent dans certains cas conduire à des situations de blocage juridique ou d'affrontement physique, doivent être considérées comme une conséquence normale de la volonté d'aménager, et donc comme une partie intégrante des politiques d'aménagement.

#### 3.1. L'économie contre l'égalité

Là où elles sont mises en place, les politiques d'aménagement du territoire poursuivent globalement toutes le même objectif : contribuer au rétablissement de l'égalité des chances sur le plan spatial. Elles recherchent donc une forme d'équité, qui se rapproche de l'idée d'égalité sociale et qui consiste, *a minima*, à ne pas ajouter aux inégalités *naturelles* du système économique d'autres inégalités qui seraient d'ordre spatial, c'est-à-dire dépendantes du lieu où l'on vit. Cette égalité des chances doit toutefois s'entendre de différentes manières car elle concerne des acteurs très différents : (i) pour les habitants, il s'agit d'une inégalité des revenus (à occupation et compétences égales), une égalité en matière d'offre d'éducation, un accès équivalent aux commerces, aux services, aux équipements publics, aux loisirs, etc. ; (ii) pour les entreprises, il s'agit de minimiser (ou de compenser) les handicaps qui peuvent résulter d'une localisation lointaine ou périphérique qui mène à un certain isolement économique, d'offrir un accès égal aux administrations, aux services péri-productifs, à l'information, aux autres entreprises, etc. ; (iii) pour les collectivités territoriales, il s'agit d'offrir des possibilités d'éducation pour les jeunes, d'emploi pour les adultes, et également de disposer de ressources fiscales suffisantes pour assurer un fonctionnement gestionnaire correct (Merlin, 2002).

Dans cette perspective, la recherche d'une égalité sociale et spatiale se heurte presque systématiquement à des arguments économiques

relativement lourds : l'implantation d'une industrie pour maintenir la population active dans une région sujette à l'exode rural, par exemple, se traduit par un coût, surtout si la région est mal desservie et éloignée des centres névralgiques nationaux ; si elle est éloignée de ses marchés, elle n'aboutira pas aux mêmes performances économiques que ses concurrentes localisées ailleurs. C'est alors la collectivité qui devra compenser ce handicap par des aides, des avantages fiscaux, ou le développement d'infrastructures de transport. Une telle situation apparaît donc désavantageuse à la fois pour l'entreprise et pour la collectivité. La même question se pose d'ailleurs de manière cruciale pour le maintien de services publics, dont l'exemple le plus connu concerne les bureaux de poste ou des lignes de chemin de fer dans des zones isolées ou peu denses. Le fonctionnement de ces services apparaît en effet plus coûteux en milieu rural qu'en milieu urbain, et il est parfois difficile à assumer d'un point de vue budgétaire. Dans ses grandes lignes, l'étude menée à ce sujet par B. Faivre d'Arcier (2013) montre qu'il peut être financièrement préférable pour une collectivité d'offrir un voyage en taxi à quelques rares passagers résidant dans des secteurs très peu denses plutôt que d'y maintenir une ligne de transport que cette faible densité rend largement déficitaire. L'essence même de ce type de conflits a été parfaitement illustrée au début des années 2000, quand les habitants des alentours de quelques gares du sud de la France ont volontairement bloqué les voies de la ligne SNCF pour forcer le train à s'y arrêter, privilégiant *de facto* leur « égalité » à se déplacer plutôt que la rentabilité du système de transport public.

### 3.2. L'efficacité contre l'équité

Ces exemples montrent que l'équité spatiale souhaitée par les habitants et revendiquée par les politiques d'aménagement du territoire a nécessairement un coût, notamment pour la collectivité, et ce dernier apparaît fortement dépendant de la géographie des populations. Mais, comme l'indique P. Merlin (2002), la question doit aussi être posée dans le sens inverse : n'y aurait-il pas d'autres coûts si la collectivité ne faisait rien ? La poursuite d'une politique libérale mène-t-elle nécessairement vers une solution plus rentable ? On sait par exemple qu'un système économique dérégulé conduit les entreprises à se localiser à l'endroit qui est le plus avantageux pour elles (principe d'économies externes), ce qui génère souvent une accumulation d'activités au même endroit et, par voie de conséquence, une concentration des habitants dans les grandes agglomérations. Cette concentration implique également un coût d'organisation, notamment dans le domaine des transports, qui est

généralement supporté par la collectivité. D'un point de vue global, elle s'accompagne probablement de surcoûts indirects plus délicats à cerner immédiatement. Ils sont sociaux quand ils concernent la pollution de l'air par exemple, ou économiques quand il s'agit de pallier les problèmes de congestion des réseaux de transport.

Difficiles à chiffrer (Chanel et Faburel, 2010), ces surcoûts ne sont quasiment jamais supportés par les générateurs de mobilité (les activités économiques) qui en sont à l'origine, mais presque toujours par un financement public. Dans ce contexte, il est par exemple intéressant de noter que les services (secteur tertiaire) ont globalement subi le même mouvement de métropolisation géographique que l'industrie (secteur secondaire) à son époque en se concentrant dans les grandes villes. Le phénomène semble toutefois moins irréversible aujourd'hui. Le télé-travail par exemple (possible pour les services mais plus difficilement pour l'industrie) n'est parfois plus une utopie, notamment pour certaines professions (assureurs, architectes, comptables, etc.) qui parviennent très bien à s'y adapter en s'appuyant sur les réseaux de télécommunication les plus performants (Internet, smartphones). Ainsi, si les grandes entreprises souhaitent généralement conserver leur siège social à Paris pour préserver leur renommée à l'échelle internationale, elles peuvent également déconcentrer une partie de leur services administratifs dans des villes moyennes, voire plus petites : les charges immobilières et salariales y sont moins élevées, tout comme le temps passé dans les transports en commun, ce qui contribue à augmenter le bien-être des employés et, semble-t-il, à réduire l'absentéisme (Portnoff, 2011). Autant d'arguments contemporains, appuyés sur les évolutions technologiques, qui doivent également entrer dans la balance des stratégies d'aménagement du territoire et du financement des opérations qui en découlent.

De telles situations placent finalement les décideurs face à un dilemme qui oppose la volonté de développement économique et d'égalité spatiale. Par exemple, un État qui mène des négociations avec une entreprise multinationale pour l'inciter à investir sur son territoire peut-il se permettre de lui imposer des contraintes de localisation au nom de l'équité spatiale ? De même, en matière d'infrastructures, comment choisir entre les axes qui relient les villes principales à la capitale (au risque de favoriser encore celle-ci et d'entraîner son hypertrophie) et les axes qui assurent la desserte des régions isolées (mais peu peuplée, donc avec des échanges plus faibles) ? Ce dilemme n'a évidemment pas de solution théorique, il relève du champ politique, donc, ici encore, des convictions.

Parallèlement, au sein des régions qui font l'objet d'un soutien financier au titre de l'aménagement du territoire et du développement

économique, il est légitime pour les pouvoirs publics de se demander quels sont les bénéficiaires finaux de ces politiques. Qui profite réellement des aides apportées ? Certaines aides à l'implantation d'entreprises, par exemple, constituent en réalité de véritables effets d'aubaines pour les détenteurs de capitaux, qui deviennent des « chasseurs de prime » distribués par l'État, et encaissent parfois celles-ci sans réellement tenir compte des engagements qu'ils sont censés respecter en contrepartie (créer des emplois par exemple). Un des exemples typiques est celui du tourisme, qui ne profite pas toujours aux populations locales, mais à une main-d'œuvre extérieure, importée en même temps que les investissements privés. L'aide géographiquement ciblée du départ se retrouve délocalisée dans les faits. Dans le même ordre d'idées, les compagnies aériennes *low cost* implantées dans les petits aéroports périphériques sont parfois subventionnées pour désenclaver des villes et des régions difficilement accessibles. Mais ces subventions n'obligent pas au maintien de leur service à long terme, ce qui place les décideurs face à une série d'incertitudes qui font l'objet de débats et de conflits récurrents entre les collectivités territoriales et les entreprises privées.

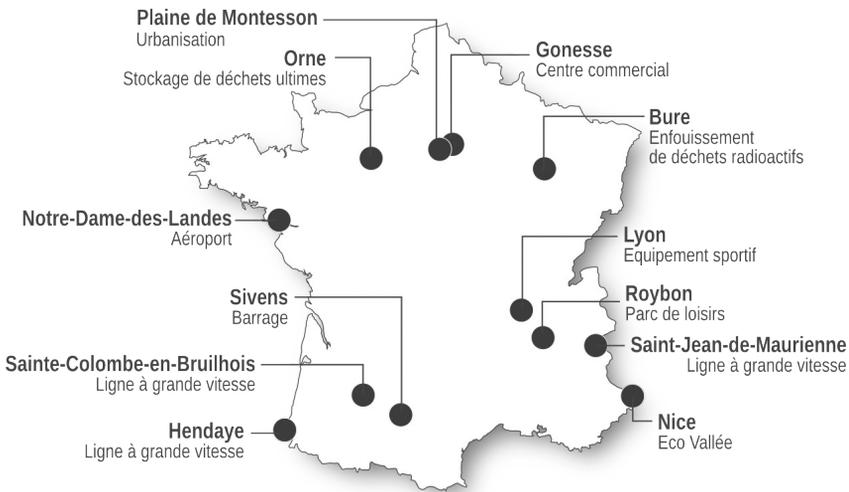
### 3.3. L'infrastructure contre l'environnement

L'aménagement constitue une action *pour* l'espace qui se traduit souvent par une action *sur* l'espace : il en modifie les caractéristiques de départ, notamment dans leurs aspects écologiques. Quand il nécessite la mise en place d'équipements, il constitue une opération nécessairement artificielle (ou « artificialisante »), qui peut apparaître en conflit avec les objectifs de préservation du cadre naturel et environnemental des régions. Certaines actions menées pour permettre le développement économique, par la mise en place d'infrastructures de communications (routes, autoroutes, etc.) par exemple, entraîne, en toute logique, un risque de destruction de l'environnement. Une crispation classique s'installe alors entre ceux qui soutiennent le projet et ceux qui le refusent, dans une large gamme de cas de figure : la construction d'une infrastructure de transport (lignes à grande vitesse, aéroport) dans un site qu'on aurait souhaité sauvegarder ; l'urbanisation des espaces naturels périurbains ; la construction de stations touristiques qui dégradent un paysage naturel valorisable (stations de montagne en particulier) ; l'installation de centrales de production d'énergie ou de traitement des déchets, etc.

En France, l'émergence des Zones à défendre (ZAD) depuis 2010 illustre parfaitement ce phénomène. Les ZAD constituent en effet une forme d'occupation du territoire à vocation politique (généralement sous la forme de campements éphémères), dans un secteur

concerné par un projet d'aménagement critiqué pour ses impacts environnementaux, en milieu rural comme en milieu urbain (figure 1.3). Elles regroupent des militants proches de l'écologie politique qui, par leur présence permanente sur le site, témoignent de leur opposition au projet en même temps qu'ils en empêchent physiquement la construction. Si les négociations qui se mettent alors en place entre les décideurs et les militants concernés n'aboutissent pas à l'abandon ou à la modification substantielle du projet, l'évacuation des Zones à défendre par la volonté de l'État peut conduire à des affrontements violents avec les forces de l'ordre, dont l'exemple du barrage de Sivens (Tarn) en 2014 constitue un aboutissement particulièrement tragique. Dans ce contexte qui tend à se généraliser, le mot *zadiste* entre dans Le Petit Robert en 2016 pour qualifier un « militant qui occupe une ZAD pour s'opposer à un projet d'aménagement qui porterait préjudice à l'environnement », référence qui constitue un témoin intéressant de l'ampleur sociale qui accompagne désormais la critique des projets d'aménagement : dans la pratique de l'aménagement, nous sommes désormais assez éloignés d'une situation initiale où l'État décidait seul, de tout, et sans concertation.

Figure 1.3  
**Localisation des Zones à défendre (ZAD) en 2015**



La multiplication des ZAD, qu'elles concernent les espaces urbains (étalement urbain, centre commercial, etc.) ou les espaces ruraux (LGV, barrage, décharge, etc.) constitue un témoin actuel de l'ampleur sociale qui accompagne la critique des projets d'aménagement. Elles témoignent de la dimension nécessairement conflictuelle des projets d'aménagement du territoire quand ils concernent des enjeux socio-environnementaux.

Dans quasiment tous les cas, ces conflits se réduisent à une contradiction entre la recherche d'efficacité d'une part et de qualité environnementale d'autre part. Cette contradiction est intrinsèque à l'aménagement, et doit être considérée comme normale dans ce contexte : il y a très peu d'exemples de projets fondés sur le déploiement d'infrastructures locales lourdes qui soient capables d'assurer simultanément un développement économique optimal et de laisser l'environnement intact. À l'heure où ces projets sont nécessairement guidés par la logique du développement durable, ce type de conflits n'est d'ailleurs pas exempt de paradoxes : le tunnel alpin permettant le passage d'un train à grande vitesse pour le fret entre Lyon et Turin (toujours en cours malgré un démarrage au début des années 1990) est fermement critiqué pour ses conséquences environnementales et paysagères, même s'il vise fondamentalement à réduire le transit des poids-lourds (donc la qualité de l'air et les risques) dans ce secteur (mouvement *No TAV*). Tous les enjeux se concentrent sur la recherche de compromis et d'équilibre qu'il s'agit de définir en fonction et/ou au-delà des volontés politiques individuelles et militantes.

## CHAPITRE 2

# Utopies et idéologies

« *L'utopie est la vérité de demain* »

Victor Hugo

Avec un mode opératoire nécessairement conflictuel, l'aménagement du territoire et les politiques de transport qui en découlent relèvent du champ des convictions. Le choix du volontarisme plutôt que du laisser-faire, de l'équité et l'égalité spatiales, de l'artificialisation des sols ou de la préservation de l'environnement, etc. ne sont toutefois pas les seuls à en conditionner les stratégies. Des méta-convictions, en quelque sorte, permettent de définir la nature de l'*ordre* à atteindre en planifiant et en aménageant le territoire. L'utopie est par exemple une façon d'envisager le monde et les sociétés, qui est apparue comme une force de propositions importante à travers l'histoire. Nous tentons ici d'en résumer l'intérêt à travers trois de ses vecteurs historiques : le beau, la technique, et aujourd'hui le développement durable. Au cours du temps, ils ont comme caractéristique commune d'avoir été des moteurs idéologiques de l'action. Ainsi, la recherche de formes spatiales artistiques a par exemple mis en avant la géométrie des lieux et des projets, dans une esthétique spatiale qui était censée accompagner leur fonctionnement, tout en concrétisant une conviction pour changer le monde et les hommes, c'est-à-dire créer une harmonie et un ordre nouveaux.

### 1. LE TEMPS DU BEAU

Même si la notion d'utopie est généralement associée aux travaux de Thomas More (1478-1535), on la trouve dès la Grèce antique dans le mythe de l'Atlantide de Platon, où elle s'accompagne immédiatement d'une géographie fantaisiste qui en pose le paradoxe : si l'utopie n'est, par définition, en aucun lieu, elle est pourtant bel et bien un lieu, dont l'aménagement propose une innovation spatiale censée influencer la

vie sociale et communautaire de ceux qui l'habitent. Elle se distingue souvent par la géométrie de ses formes et l'isolement d'un espace qui fonctionne en autarcie, à l'image d'une île. Plusieurs exemples historiques, plus ou moins déconnectés les uns des autres, illustrent cette idée que l'on retrouve jusque dans les premiers travaux de l'économie spatiale allemande du 19<sup>e</sup> siècle.

### 1.1. Géométrie et isolement

L'urbaniste et architecte Hippodamos de Milet (498-408 av. J.-C.) semble être le premier à entreprendre de faire coïncider les plans d'une nouvelle cité avec les lois qui en régissent les activités et les habitants, en faisant correspondre chaque quartier à une fonction. Leur découpage rationnel et géométrique est censé exprimer le système politique, en donner une image ordonnée, et garantir l'efficacité et la pérennité de l'ensemble. Même si nous en avons aujourd'hui perdu les détails, ce lien précurseur entre forme urbaine et organisation politique offre un premier exemple théorique de l'utopie, et confirme l'idée que la maîtrise de l'espace y apparaît presque toujours comme une nécessité pour construire un ordre social nouveau et efficace.

Dans le *Timée* de Platon, Socrate évoque également l'État idéal par l'image de l'Atlantide, dont la géographie engloutie est fondée sur les mêmes principes. L'insularité de l'Atlantide est loin d'être anodine. Elle constitue un *leitmotiv* de la pensée utopique et pose l'isolement et l'inaccessibilité comme une condition théorique fondamentale. L'île d'utopie imaginée par T. More est en effet typiquement un espace isolé, précisément structuré par 54 villes comptant chacune 6 000 familles. L'économie de base est fondée sur l'agriculture, dans une campagne rationalisée dont les champs se répartissent en fonction du travail agricole et des besoins des insulaires. La démographie est également planifiée et la croissance de la population entraîne la colonisation automatique de nouveaux territoires. Selon une idée identique à celle qu'évoquait Platon pour la colonisation grecque, le modèle permet ainsi de gérer simultanément l'évolution démographique d'une population et son déploiement territorial. Ce dernier reste contraint par des règles relativement strictes qui garantissent une limite au développement urbain, limite qui déclenche un mouvement de conquête et d'aménagement de nouveaux espaces en même temps qu'elle garantit la bonne gouvernance politique d'unités urbaines « à échelle humaine ».

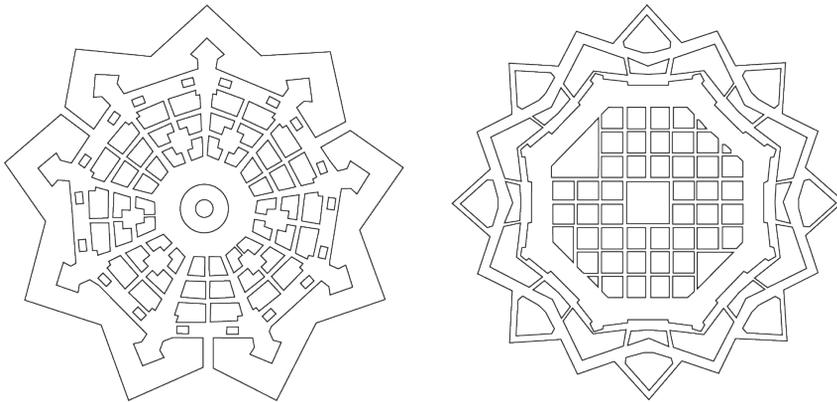
On trouve une idée à peu près similaire durant la Renaissance italienne, avec les positions d'architectes florentins (Filature, Alberti et Doni par exemple) qui ont ajouté une forte dimension géométrique à

leurs projets urbains, en traçant des plans de villes symétriques, dont s'inspirent le plan de Cosmopolis (proche du projet de la cité fortifiée de Portoferraio sur l'île d'Elbe) qui donnera ses grandes lignes au plan de Palma de Nova, près de Venise. La *Cité du Soleil* (figure 2.1 à gauche) est imaginée par Tommaso Campanella (1568-1639) dans un contexte plus ou moins fantastique : il y voue un culte au soleil qui symbolise la vie et la lumière, et conçoit le monde comme un être rempli de magie naturelle et de forces occultes émanant des astres. Protégée par sept enceintes fortifiées qui portent chacune le nom d'une planète, la ville accueille un régime politique dont il situe la légitimité sur un plan métaphysique. L'économie de la ville relève d'un système proche du communisme, dans lequel la gestion, la production, la distribution et la consommation des biens se répartissent de manière égalitaire. D'un point de vue social, les unions sont contrôlées et programmées en fonction de la position des astres, et l'eugénisme est une pratique courante. À son époque, l'idée introduite par Campanella s'inscrit ainsi dans une logique de progrès qui relève simultanément de la science et de l'occultisme, selon un principe philosophique qui rappelle l'utopie de More, mais qui s'inspire probablement plus encore des idées de Platon. Spatialement, le plan d'urbanisme et d'aménagement de la cité apparaît comme un *moyen* de passer de la théorie à la pratique, et de mettre en œuvre cette planification extrême.

Campanella n'est pas seul à œuvrer dans ce sens. Tout au long du 17<sup>e</sup> siècle, une trentaine de textes utopiques fondamentaux sont publiés en France, en Angleterre, en Italie ou en Espagne, à partir des idées originales émises par More. Cet engouement s'essouffle néanmoins rapidement par manque d'originalité et de réalisations concrètes : la structure et la description des utopies proposées apparaissent fortement monotones, et ne proposent souvent qu'une radicalisation de la laïcisation de l'État et de l'homme en vertu de la raison, qui permettrait de retrouver un certain ordre dans l'espace et dans le temps, selon un plan d'aménagement globalement identique. Cela étant, même s'il existe peu de correspondances historiques, on ne peut s'empêcher de noter la ressemblance morphologique entre la *Cité du Soleil* et le plan de la ville de Neuf-Brisach (figure 2.1 à droite). Dessiné par Vauban (1633-1707) et réalisé durant la première moitié du 17<sup>e</sup> siècle, ce dernier ne vise pas nécessairement un ordre strictement utopique. Il se fonde avant tout sur le réalisme de la guerre en proposant une place forte dont la géométrie est destinée à mettre en difficulté l'artillerie des assaillants. Néanmoins, de par son intérêt pour le bien-être des populations et la justice sociale, Vauban l'érige selon une géographie qui se veut parfaitement rationnelle et qui se traduit par un aménagement symétrique de

l'espace urbain. Localisé à la frontière entre la France et l'Allemagne, le plan répond en lui-même à une forme d'utopie, censée stabiliser les conflits à la jointure des mondes latin et germanique (grande échelle) et intégrer avec harmonie les espaces civils et les bâtiments militaires, dans un urbanisme géométrique desservi par un réseau quadrangulaire cohérent (petite échelle). En calquant la forme de ses constructions sur leurs fonctions militaires défensives, Vauban fonde ses projets sur un pragmatisme fonctionnel qui dépasse l'utopie sociale et ouvre la voie à une ré-interprétation spatiale des nouveaux principes socioéconomiques qui émergent avec la révolution industrielle.

Figure 2.1  
**Plans simplifiés de la Cité du Soleil  
 et de Neuf-Brisach**



Fondés sur des convictions totalement différentes, les deux plans partagent une symétrie et une géométrie censées caractériser une vision de l'espace et de la société, c'est-à-dire un ordre inscrit dans la géographie urbaine. La fermeture quasi insulaire de la ville, comme la forme de son plan qui souhaite retranscrire une organisation sociale, sont deux caractéristiques d'un aménagement de l'espace fondé sur l'utopie.

### 1.2. Industrie et épanouissement

À la fin du 18<sup>e</sup> siècle, Claude-Nicolas Ledoux (1736-1806), architecte de la Saline Royale d'Arc-et-Senans (1774), est probablement le premier utopiste à imaginer une ville construite autour d'un mode de production fondamentalement neuf à son époque : l'usine. Le projet de la saline correspond à une ville entière, dessinée pour rationaliser le travail des ouvriers, de manière à augmenter leur productivité en réduisant le temps nécessaire à leurs déplacements entre les lieux de résidence et de production. Cette configuration prend naturellement la forme d'une ellipse (même si la saline n'est aujourd'hui édifiée qu'en demi-cercle) au sein de laquelle les unités techniques et les logements

sont organisés symétriquement, ce qui permet également de surveiller le fonctionnement de l'usine (le travail et les mœurs), la production et le contrôle fiscal du sel depuis le bâtiment central (la Maison du directeur, « Temple de la surveillance »). Le plan d'ensemble offre ainsi une dimension spatiale aux normes qui viennent réformer les modes de production et l'organisation du travail dans un contexte industriel renouvelé, qui modifieront fondamentalement le comportement social de la population ouvrière naissante.

Au début du 19<sup>e</sup> siècle, l'industriel Robert Owen (1771-1858) propose également d'améliorer la vie quotidienne des ouvriers que l'industrie condamnait à la misère et l'insalubrité ; il fonde les premières coopératives et les premiers syndicats britanniques, dans un *socialisme utopique* qui rencontrera un certain succès en France (avec les œuvres de Charles Fourier (1772-1837), d'Étienne Cabet (1788-1856), ou de Philippe Buchez (1796-1865) par exemple). Pour concrétiser ses idées, Owen entreprend la reconstruction du village de New Lanark (Écosse), pour en faire une usine modèle de production de coton, qui deviendra également un exemple précurseur d'urbanisme et de planification urbaine (Bell et Bell, 1972) Sans plan particulier, le village concentre des logements de qualité et de nombreuses aménités (en particulier pour l'éducation des enfants) dans lesquels environ 1 200 personnes vivent en autarcie, et tente de mettre en pratique l'idée que le bien-être des ouvriers est un des facteurs du productivisme économique.

En revanche, à la différence d'Owen, le philosophe bisontin Charles Fourier ne fonde pas ses principes sur une analyse strictement économique. Il souhaite également exalter les passions humaines qu'il considère comme des facteurs sociaux (leur expression étant une réalisation du bien-être). Dans ce contexte, il élabore une sorte de loi régissant les attractions et les répulsions passionnelles et individuelles, qu'il entreprend de vérifier au sein d'un espace aménagé pour le faire : le phalanstère, projet communautaire et agricole qui constitue le socle d'un nouvel État par libre association de ses membres. Il regroupe une communauté de 1 500 personnes dans un bâtiment unique mais gigantesque, dont le plan s'inspire fortement de la saline de Ledoux. D'une longueur de 1 200 mètres, le phalanstère accueille des logements privés, des salles publiques et des aménités diverses, et intègre un réseau de déplacement fait d'arcades et de galeries. Alors que Fourier prévoyait la construction de trois millions de phalanstères pour couvrir l'ensemble de la planète, il n'en verra aucun édifié de son vivant. De nombreuses propositions ultérieures tenteront néanmoins d'en appliquer les principes, par les réalisations concrètes de Victor Considérant (1808-1893) et de sa phalange agricole et manufacturière, ou

encore de Jean-Baptiste Godin (1817-1888) et de son familistère conçu comme une « nouvelle industrie pour un nouveau monde amoureux ».

Dans un cadre très différent de ces cités ouvrières, et en réaction à la dépression économique des années 1880, Ebenezer Howard (1850-1928) envisage le concept de cité-jardin (*Garden-Cities of Tommorrow*) comme un renouvellement des rapports ville-campagne que l'urbanisation du 19<sup>e</sup> siècle a contribué à effacer dans de grandes agglomérations industrielles. Dans la logique d'un retour à l'habitat pré-industriel, le projet consiste à débarrasser la société des défauts de la ville industrielle (injustice sociale et conditions de vie délétères) comme de ceux de la campagne (beaux panoramas, mais ennuyeux et vides d'emplois) en proposant des « villes vertes » de plus de 30 000 habitants, ceinturées d'espaces agricoles. D'un point de vue théorique, cet ensemble se structurerait autour de trois « aimants » (la ville, la campagne et la ville-campagne) qui préfigurent en quelque sorte la position intermédiaire et difficile à définir des espaces périurbains, et qui devraient supplanter les grandes villes au profit d'une nébuleuse polycentrique de plus petite taille, les cités-jardins. Ces dernières n'ont toutefois jamais convaincu du temps d'Howard, et les exemples qui restent aujourd'hui associés à leur nom dans l'histoire de l'urbanisme ont parfois peu de choses à voir avec l'idée originelle, correspondant le plus souvent à une simple association de logements sociaux, de jardins et d'aménagements paysagers.

D'un point de vue spatial, les cités-jardins ne s'opposent pas fondamentalement au concept de cité-ouvrière : elles concrétisent, par leur plan et leur aménagement, l'expansion des projets industriels réunissant dans un même lieu l'espace de travail et les logements des travailleurs. Tout au long du 19<sup>e</sup> siècle, de nombreux gouvernements ont d'ailleurs proposé des concours d'architecture pour des projets de ce type, avec comme objectif d'augmenter la cohésion et la disponibilité des équipes de travail tout en assurant leur équilibre par la présence des familles, en leur fournissant un salaire bas compensé par la proximité aux aménités. De ce fait, la cité ouvrière apparaît souvent plus comme une contre-réponse de l'économie capitaliste libérale aux revendications ouvrières que comme une utopie socialiste (Jean, 1994).

## 2. LE TEMPS DE LA TECHNIQUE

Les utopies fondées sur la technique sont également nombreuses et correspondent autant aux innovations accumulées dans le monde du transport qu'aux avancées de l'aéronautique, de l'architecture ou

de la médecine. Elles sont donc historiquement typiques de la troisième phase d'humanisation de l'espace géographique, et accompagnent idéologiquement la sortie d'un monde anciennement régi par la logique écologique des écosystèmes pour entrer dans l'ère technique des machines qui reformatent les besoins sociaux.

### 2.1. Réseaux

Le comte de Saint-Simon (1760-1825), que l'histoire rattache au socialisme utopique au même titre qu'Owen, a contribué à asseoir définitivement la société industrielle qui supprime l'Ancien régime, en proposant une logique d'aménagement pour l'accompagner sur une base technique (Musso, 1999). L'utopie saint-simonienne, qui naît de l'école du même nom, apparaît comme une célébration de la science, de l'industrie et de la raison, qui se traduit spatialement par le développement des réseaux techniques. En particulier, ce sont les chemins de fer émergeant à cette époque qui feront l'objet d'un « véritable culte religieux » (Alvergne et Musso, 2009), mais avec cette particularité que Dieu y est remplacé par les principes de l'héliocentrisme, de la révolution copernicienne et de la gravitation universelle. L'utopie saint-simonienne vise ainsi à encercler le monde et la société dans un ensemble des dispositifs techniques, industriels et financiers qui permettront de les reconfigurer comme un « organisme idéal », dont l'ordre sera figuré par les réseaux artificiels qui métamorphoseront les relations entre l'homme et la planète.

Parmi les successeurs de Saint-Simon, certains militants du monde des affaires et de la politique entreprennent de mettre en pratique ses convictions, et se trouveront à l'origine de grands travaux réalisés durant la Révolution industrielle. Prosper Enfantin (1796-1864), François Arlès-Dufour (1797-1872) et Ferdinand de Lesseps (1805-1894) sont notamment les initiateurs du percement du canal de Suez. Dès la fin du 18<sup>e</sup> siècle, un certain nombre d'expéditions en Égypte avaient étudié la possibilité de traverser l'isthme de Suez pour compléter le réseau de communication maritime entre la mer Méditerranée et la mer Rouge. Le canal pouvait s'avérer très utile d'un point de vue économique et géopolitique, mais il restait délicat à réaliser dans sa dimension technique. Alors que le projet est encore peu convaincant à l'échelle internationale, les Saint-Simoniens entreprennent une étude détaillée des conditions de sa réalisation à partir de 1846. Ils procèdent notamment à un nouveau relevé topographique, rectifiant les mesures erronées qui existaient jusqu'alors, et menant à la conclusion que, compte tenu d'une dénivellation très faible, l'aménagement était réalisable sans écluses. La technique vient au secours des convictions sur la réticulation généralisée.

Également dirigée par les Saint-Simoniens, la première ligne française de chemins de fer pour voyageurs relie Paris à Saint-Germain en 1837, et ouvre la voie à la couverture ferroviaire de l'espace national. Dans ce domaine, la plupart des choix et des discussions reviennent à Alexis Legrand (1791-1848), directeur général des Ponts et chaussées et des Mines, jusqu'à la loi de 1842 qui fixe définitivement l'établissement des grandes lignes de chemin de fer. À une époque où la France connaît encore un retard important sur les autres pays industrialisés pour l'aménagement de ses réseaux, la loi de 1842 permet d'accélérer considérablement la construction de voies rentables pour les compagnies qui les exploitent, notamment Paris-Lyon-Méditerranée, dirigée par Prosper Enfantin. Spatialement, elle consacre un schéma de transport en étoile centré sur la capitale parisienne, qui prendra le nom de son concepteur : l'étoile de Legrand. En substance, l'idée est globalement conforme aux grandes lignes du mémoire (*Sur la possibilité d'abrèger les distances en sillonnant l'empire de sept grandes voies ferrées*) que présentait Pierre-Michel Moisson-Desroches (1785-1865) dès 1814. On y retrouve l'ensemble des convictions qui forgent le saint-simonisme : une vision du territoire par les réseaux, la foi dans la technique comme vecteur de l'action et l'appui sur la science comme moteur d'innovation. Selon P. Musso (1997), cette philosophie des réseaux utilise l'objet technique constitué par les réseaux (dépassant les chemins de fer en intégrant par exemple les télécommunications) non seulement pour rendre les territoires plus accessibles, mais également comme un moyen d'assurer une liaison sociale entre les individus qui y vivent. En France, elle est fortement associée à la logique administrative et territoriale de centralisation du pouvoir à Paris, dont les voies ferrées, comme les routes de Poste à leur époque, permettent de consolider la position et d'asseoir le déploiement en relais locaux.

D'un point de vue institutionnel, cette doctrine n'est pas étrangère à la création de l'École centrale à Paris (1829), sur l'initiative d'Alphonse Lavallée (1797-1873), lui-même actionnaire du journal saint-simonien *Le Globe*. L'objectif de l'école, qui sera léguée à l'État en 1957 pour qu'il en assure la pérennité, consiste à former les ingénieurs de l'industrie naissante et à compléter les compétences techniques d'institutions supérieures jusque-là vouées à la formation des cadres de l'État. Ce renforcement contribue également à installer durablement la dimension technocratique des prises de décision en aménagement, dans lesquelles les méthodes, les techniques et les avis d'experts scientifiques deviennent parfois plus fondamentales que les opinions politiques et sociales. Pour l'ensemble de ces raisons, le saint-simonisme constitue un cas d'école propre à l'espace français. Il montre que, dans certains

cas, la foi dans la technique conduit à un conditionnement de l'idéologie politique, dont découle une organisation techno-administrative faite pour l'accompagner. L'aménagement du territoire y correspond à une organisation de l'espace qui fait système, indépendamment de l'opinion que l'on peut porter sur ce système.

## 2.2. Hygiénisme

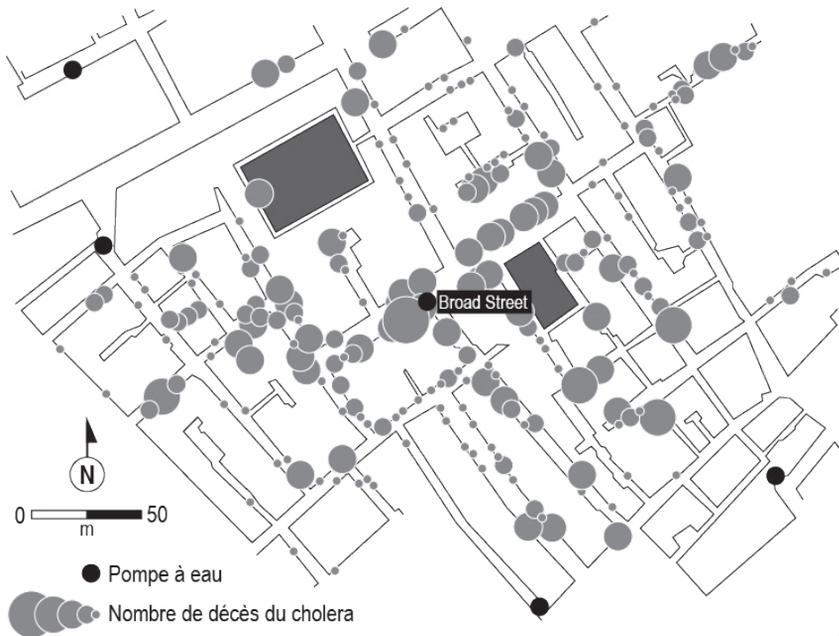
La reconstruction d'une partie de Paris par Haussmann offre également un excellent exemple de l'importance prise par les ingénieurs au sein des grands corps de l'État. Le projet est initié par Napoléon III (1808-1873). Exilé en Angleterre entre 1846 et 1868, il est très impressionné par la reconstruction de Londres après l'incendie de 1666, et y trouve une référence pour moderniser Paris en termes d'hygiène et d'urbanisme. Sous l'influence du saint-simonien Henri Siméon (1803-1874), personnellement très impliqué dans la fusion des chemins de fer et la Compagnie générale des eaux, le pouvoir fort et autoritaire de Napoléon III est alors convaincu qu'une action volontaire sur l'espace peut réduire l'insalubrité de la capitale et y résorber la pauvreté. Il encourage une logique de grands travaux, dont il confie la charge au préfet de la Seine, Georges Eugène Haussmann (1809-1891) pour le réaménagement de Paris à partir des plans d'embellissement de Siméon. Vingt ans de travaux visent explicitement à améliorer les conditions de vie et la santé publique par une intervention hygiéniste sur l'urbanisme, et à faire de Paris une ville « embellie, agrandie, assainie », aussi prestigieuse que sa concurrente anglaise.

Issue de la philosophie des Lumières, l'idée hygiéniste est un produit du 19<sup>e</sup> siècle, qui fait suite à l'initiative de médecins sensibilisés par les épidémies urbaines du choléra et de la tuberculose, et soucieux de lutter contre un certain nombre de fléaux sociaux (Barles, 1999). C'est dans ce contexte qu'Haussmann nomme Louis Pasteur (1822-1895) à la tête d'une commission d'étiologie du choléra, infection dont l'air est suspecté d'être le principal vecteur de contagion, avant que, par l'intermédiaire d'une carte des pompes de Londres particulièrement démonstrative (figure 2.2), les travaux de John Snow (1813-1858) n'apportent la preuve graphique qu'il s'agit en fait de l'eau. L'insalubrité, le manque d'assainissement et le confinement des centres-villes sont alors identifiés comme la source d'un climat spécifique et délétère pour la santé publique : les rues sont trop étroites, sans lumière et sans arbres, sans parcs ni jardins publics et certains quartiers font face à un état de délabrement total. Dans ce contexte, plusieurs types de mesures sont proposées, qui permettent d'y remédier par une action

sur la police de la construction et le plan des villes : les bâtiments doivent être plus espacés et les espaces plus ouverts afin que l'air y circule et que le soleil y pénètre mieux, les espaces verts doivent être privilégiés, et le principe de l'assainissement généralisé. Ces prescriptions, dont l'efficacité a été en partie démontrée, influenceront encore largement les urbanistes du 20<sup>e</sup> siècle, qu'ils appartiennent au mouvement progressiste comme au mouvement moderne. À Paris, elles sont à l'origine de nouvelles normes pour la construction urbaine, matérialisées par exemple par les notions de profils et de gabarits de rues, selon une nouvelle conception de l'urbanisme qui conçoit la ville comme un « tout », et dont le plan reflète un organisme vivant qui doit respirer et dans lequel tout doit circuler (eau, égouts, énergie, voirie, transports en commun). Paris devient une ville de réseaux superposés qui témoignent de sa « bonne santé », et un modèle qui se diffusera largement en France (Rouen, Toulouse, Montpellier, Marseille, Lyon, etc.), et dans l'Empire (Alger est également fortement remaniée par un plan haussmannien).

Figure 2.2

### Carte des pompes à eau et du choléra de John Snow



La carte montre que l'analyse cartographique peut offrir des réponses à la compréhension des propagations épidémiques. Elle préfigure de ce fait l'argumentaire de la doctrine hygiéniste, qui vise à améliorer les conditions de vie et de santé par une reconfiguration spatiale des espaces urbains.

Ce volontarisme urbanistique n'est pas sans conséquences sur la vie des Parisiens, et il rappelle une fois encore que les effets de l'aménagement sont difficilement prévisibles *a priori* dans l'ensemble de leurs aspects. Outre la critique qui a été faite à Haussmann, à tort ou à raison, de profiter des travaux pour élargir les rues et permettre une intervention plus rapide des forces de l'ordre afin de réprimer les émeutiers des premiers mouvements sociaux, le réaménagement de Paris apparaît immédiatement contre-intuitif : alors que les travaux étaient censés embellir et assainir la ville, ils multiplient les chantiers pénibles pour la population locale et couvrent certains quartiers d'une boue sale qui provoque une situation sanitaire paradoxalement plus néfaste que la précédente. Comme tous les grands travaux, les bienfaits des réalisations haussmanniennes ne sont perceptibles que dans le long terme et ne profitent pas immédiatement à ceux qui en subissent les désagréments. Par ailleurs, la rénovation et la modernisation de la ville ont également contribué à en recomposer la carte sociale. Elles ont mis en place une rupture entre les quartiers de l'est et de l'ouest, rupture qui reste nettement perceptible à l'heure actuelle : suite à la hausse des loyers dans les secteurs rénovés, les ménages les plus pauvres ont été poussés à quitter leur logement pour rejoindre les arrondissements périphériques. Ce mouvement anticipe avant l'heure les processus actuellement analysés dans le cadre de la gentrification des centres-villes, et témoignent de la complexité sous-jacente de politiques d'aménagement dont les conséquences, malgré des convictions louables et une approche technico-scientifique à toute épreuve, restent difficiles à anticiper d'un point de vue global.

### 2.3. *Machine*

Cette complexité rappelle celle des machines qui apparaissent au 18<sup>e</sup> siècle, et dont l'emploi se généralise à partir du 19<sup>e</sup> dans le monde industriel. Leur multiplication permet certes au monde occidental d'entrer dans la modernité, mais elle s'accompagne immédiatement d'une ambivalence : d'une part, la machine offre la capacité de libérer l'homme en réduisant ses efforts pour plus de confort ; d'autre part, elle devient un vecteur d'aliénation incarné par l'usine qui mécanise à la fois les modes de production et la vie des travailleurs. L'utopiste Herbert George Wells (1866-1946) est un des premiers penseurs de cette ambivalence. Biologiste de formation, convaincu par le socialisme politique et l'intérêt de l'anticipation prospective, il est persuadé qu'une libération progressiste par la machine est possible, mais sans parvenir à détacher cette dernière d'un pessimisme qui le pousse à croire à l'autodestruction

imminente de l'humanité. Dans son utopie moderne, il dessine un État mondial qui utilise la science comme source de progrès, et la machine comme un moyen d'automatiser les tâches les plus pénibles. L'ensemble le conduit à envisager les bienfaits des nouvelles technologies et de l'eugénisme, orchestrés par un régime qui couple ses responsabilités écologiques à un gouvernement mondialisé dirigé par une élite scientifique et technicienne. D'un point de vue littéraire, ses ouvrages (notamment *L'île du docteur Moreau* (1896) qui reprend explicitement l'idée d'insularité et d'espace autarcique propre à T. More) renvoient plus souvent au monde de la science-fiction qu'à celui de l'utopie, mais posent néanmoins les bases d'une dystopie, une fiction qui dépeint un espace et une société imaginaires, organisés de telle façon que ses membres ne parviennent justement pas à atteindre le bonheur (contre-utopie). Un demi-siècle plus tard, George Orwell (1903-1950) construira le point culminant du genre avec son roman *1984* (1949) qui résonne encore aujourd'hui avec une actualité surprenante. Le monde y est décrit à travers le concept de *Big brother*, dans lequel l'omniprésence totalitaire de la machine maintient une pression sociale et un niveau de développement technique qui permet de surveiller et de contrôler la population jusque dans sa vie familiale et privée.

Dans ces deux exemples, la science-fiction vient relever un défi actualisé pour l'utopie : imaginer des *topos* qui ne se situent plus uniquement sur la surface terrestre, mais qui explorent les possibilités offertes par la machine à travers des expéditions interstellaires. Le développement technique y prend rapidement le pas sur le développement spatial et le simple plan d'aménagement ne suffit plus à asseoir un modèle d'organisation sociale. Au contact des avancées de la science et des techniques, la science-fiction permet alors aux utopistes de déployer et de projeter leurs convictions philosophiques et sociales par des moyens jusqu'alors inimaginables : la fusée est introduite comme un mode de transport généralisé, les villes sont des entités verticales à la fois sédentaires et mobiles, reconfigurées en permanence par des maisons sur roues, etc. Pour autant, à l'inverse de l'idée originale de T. More, la science-fiction ne fait pas toujours confiance à la géographie qu'elle crée, et ne lui associe pas non plus nécessairement une structure sociale idéalisée. Les machines y apparaissent souvent seules, autant comme des fantasmes que comme une anticipation des technologies à venir. La science-fiction est de ce fait l'unique littérature qui imagine les conséquences sociales des progrès scientifiques et techniques, souvent avec un regard sceptique. Dans cette perspective, elle n'est évidemment pas sans intérêt pour l'aménagement du territoire. M. Lussault (2007) estime par exemple que la science-fiction

(*Blade Runner*, *Star Wars*, etc.) est un des rares domaines qui donne à voir les villes et les territoires tels qu'ils pourraient devenir dans le futur, par un jeu d'extrapolations dont les images sont aujourd'hui largement véhiculées par le cinéma populaire, et qui construisent une vision commune et presque universelle des futurs urbains possibles.

D'un point de vue opérationnel, la machine n'est pas non plus absente des aménagements concrets réalisés durant le 20<sup>e</sup> siècle. Associée à la technique du béton, matériau nouveau qui révolutionnera les grands projets d'infrastructures avant de permettre un renouvellement en profondeur des bâtiments résidentiels, l'architecture moderne s'y réfère régulièrement pour proposer une nouvelle façon d'habiter. L'idée de « ville-machine » a par exemple été émise par Le Corbusier (1887-1965) et les architectes du mouvement moderne lors des Congrès internationaux d'architecture moderne (CIAM), dont découle la Charte d'Athènes (Le Corbusier, 1957). L'exemple des transports suffit à l'illustrer : il s'agit de construire une ville pour un « homme nouveau », réticulée par « 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). L'ensemble s'appuie sur une conception urbaine dite fonctionnaliste, qui vise à séparer les fonctions de la ville dans des secteurs distincts : les zones résidentielles où se concentre l'habitat, les espaces de travail où se regroupent les entreprises et les emplois, les zones récréatives faites de parcs et d'espace de loisirs, et les zones de circulation permettant de relier l'ensemble. Si cette façon de concevoir la ville et son fonctionnement ne correspond pas *stricto sensu* à l'idée d'utopie, elle affirme néanmoins des convictions fortes qui conditionneront une partie de l'histoire de l'urbanisme. En France, ces convictions se sont traduites par des opérations d'*open planning*, conçues selon un principe d'aménagement moderne caractéristique des Grands ensembles qui ont permis de répondre à la crise du logement des années 1960 et 1970. Sans îlots ni rues, l'*open planning* propose ainsi une nouvelle manière d'aménager l'espace, en rupture avec les principes traditionnels et millénaires de l'urbanisation européenne. Ses résultats sont néanmoins rapidement apparus contre-intuitifs : alors que les grands espaces verts au pied des barres et des tours étaient censés apporter un cadre de vie nouveau et idéal répondant au confort moderne, les grands ensembles se sont souvent révélés difficiles à vivre, et leur architecture, bien qu'elle ne soit pas seule en cause, semblait porter en germe le « mal des banlieues », dans des cités que d'aucuns n'ont pas hésité à qualifier de « machines à habiter ».

### 3. LE TEMPS DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Les conséquences sociales et environnementales qui découlent des convictions et des propositions concrètes d'aménagement réalisées aux 19<sup>e</sup> et au 20<sup>e</sup> siècles, et plus généralement du manque d'anticipation de certaines politiques d'aménagement, constituent l'un des principaux moteurs de concepts renouvelés pour le 21<sup>e</sup> siècle. L'idée de développement durable part du principe très général que la conquête humaine du monde, en particulier l'urbanisation et la multiplication des déplacements débutées au 19<sup>e</sup> siècle, est aujourd'hui devenue une menace pour la nature et pour l'homme lui-même, résultant souvent de l'ignorance qu'il a des conséquences de ses actions.

#### 3.1. La ville durable

Pour remédier à cette situation, on lit dans le rapport fondateur de G.H. Brundtland (1987) que « le développement durable est le développement qui satisfait les besoins de la génération actuelle sans priver les générations futures de satisfaire leurs propres besoins ». Partant de cette base, l'ICLEI (*International Council for Local Environmental Initiatives*) a rapidement proposé une définition plus pratique et plus applicable, en établissant le développement durable comme celui « qui procure des services économiques, sociaux et environnementaux fondamentaux à tous les habitants [...] sans compromettre la viabilité des systèmes naturels, immobiliers et sociaux dont dépend la fourniture des services ». Polyvalent, presque universel, l'objectif consiste ainsi à mettre en garde contre des conséquences qui ne sont pas encore connues. Il s'appuie sur trois sphères interconnectées : (i) le développement économique qui organise la production des richesses et crée les conditions de la prospérité ; (ii) la cohésion sociale établie sur une répartition équitable des richesses produites ; (iii) la protection de l'environnement qui permet de ménager les ressources disponibles afin d'assurer la pérennité de la production. Dans cette perspective, deux axes se répondent, dans l'espace et dans le temps : il s'agit à la fois d'articuler le local (échelle de la ville ou de la région) avec le global (échelle du monde), et le court terme (politiques immédiates et modes de vie quotidiens) avec le long terme (évaluation des conséquences et poursuite d'objectifs souhaitables), afin de mieux anticiper et d'innover dans des domaines très diversifiés : l'efficacité économique, la solidarité sociale et territoriale, les effets de l'urbanisation et de la vitesse, la production et la consommation énergétiques, la gestion des ressources, la protection du climat, etc.

Toutefois, si ces grandes lignes ont été débattues, parfois avec controverse, durant les conférences internationales de Rio (1992), d'Aalborg (1994), de Copenhague (2009) ou de Paris (2015), elles posent souvent plus de questions qu'elles n'apportent de réponse aux acteurs qui se préoccupent pratiquement du niveau local, en particulier quand il s'agit d'aménager les territoires. D'un point de vue spatial, le développement durable n'apparaît véritablement que comme une consigne, une idée livrée sans mode d'emploi, qui ne se traduit pas directement dans la pratique, et que l'on peut encore interpréter et manipuler à souhait (Le Goff, 2009). D'un point de vue temporel, il demande d'évaluer les conséquences lointaines des tactiques d'aujourd'hui, et donc de connaître le futur : un jeu d'incertitudes, un pari qui contribue à complexifier sa prise en compte dans les politiques d'aménagement et qui rend son intégration très délicate. De ce fait, même si certaines des conclusions auxquelles elle mène paraissent louables, la notion de développement durable relève d'un positionnement avant tout idéologique, souvent très éloigné des réalités auxquelles elle devrait se référer. Alors que de nombreux géographes (par exemple Pumain et Racine, 1999) la considèrent comme un oxymore (il ne peut y avoir de développement infini dans un monde fini), J.P. Le Goff (2009) fait remarquer qu'elle met en jeu deux approches difficilement conciliables : (i) une critique du développement technique pour préserver les ressources naturelles et la capacité des écosystèmes à répondre aux besoins actuels et à venir ; (ii) le recours au développement économique pour répondre à ces mêmes besoins. Ainsi, « le développement durable maintient l'indécision, ou, plus précisément, il entend ni plus ni moins, réconcilier l'écologie, l'économie et le social en un tout harmonieux, réalisant ce que certains dénomment un cercle vertueux en l'associant à l'idée de gouvernance, notion floue se prêtant elle aussi à de multiples usages ».

La mise en place d'une politique d'aménagement durable apparaît donc souvent comme une gageure, un défi qu'il est difficile de relever sans opérer avec prudence et transversalité. Elle oblige à solliciter de nombreuses compétences, réparties dans des champs disciplinaires distincts (économie, sociologie, ingénierie, géographie, etc.), à dépasser leurs logiques sectorielles, parfois complexes, voire discutées par chaque spécialité. Il ne s'agit donc plus d'étudier les territoires morceau par morceau (centre-ville, banlieue, campagne, espaces naturels, etc.), ni thème par thème (urbanisation, transport, mixité et cohésion, environnement, etc.), mais de l'envisager selon une logique systémique qui renie le caractère fondamentalement insulaire et autarcique des premières utopies. Dans cette logique, l'utopie reste néanmoins un

vecteur d'extrapolation et d'articulation pour l'aménagement des villes dans leur campagne, afin de proposer des solutions théoriques pour le développement résidentiel et les politiques de transport : la ville fractale et la ville orientée par le rail apparaissent par exemple comme des modèles fondés sur l'interaction entre la forme et les réseaux urbains, qui, s'ils ne font pas nécessairement l'objet d'une démonstration scientifique systématique, mettent en lien des convictions sur la durabilité des territoires, convictions que d'autant proposeront de traduire en hypothèses de recherche.

### 3.2. *La ville du rail*

En partie élaboré par l'architecte américain P. Calthorpe (1993) dans le cadre du Nouvel urbanisme, le concept de *Transit oriented development* (TOD) vise avant tout à réduire les problèmes de circulation et de congestion urbaines, d'une part en favorisant l'utilisation des transports en commun ferrés, et d'autre part en réorganisant la forme de la ville et en limitant son étalement. Reprenant l'idée de « poches piétonnières » (concept proche des cités-jardins proposées par E. Howard), 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 piétonniers, mais sans exclure complètement l'automobile. Les expériences américaines menées selon ces principes ont ainsi permis de définir les fondements du TOD en trois points principaux : (i) la mixité fonctionnelle, (ii) la proximité aux stations de transport en commun et (iii) l'incitation à leur usage. Trois aspects complémentaires peuvent s'y ajouter : (i) la compacité de la forme urbaine, (ii) un environnement agréable pour les cyclistes et les piétons, et (iii) la proximité aux espaces publics (Cervero *et al.*, 2002). De fait, la mixité et la compacité de l'espace font émerger des quartiers dont le cadre de vie, conçu autour des espaces publics, des mobilités actives (bicyclette et marche à pied) et du commerce de proximité, correspondrait à l'échelle du piéton, mais permettrait également 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.

Autour des accès ferroviaires, chaque quartier s'organiserait en trois couronnes radioconcentriques de densité décroissante. Jusqu'à 500 mètres environ, 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. De 500 à 1 000 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. Au-delà de 500 mètres, l'espace est réservé à une occupation résidentielle peu dense, essentiellement composée de maisons individuelles, où l'automobile reste le mode de transport le plus efficace 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.

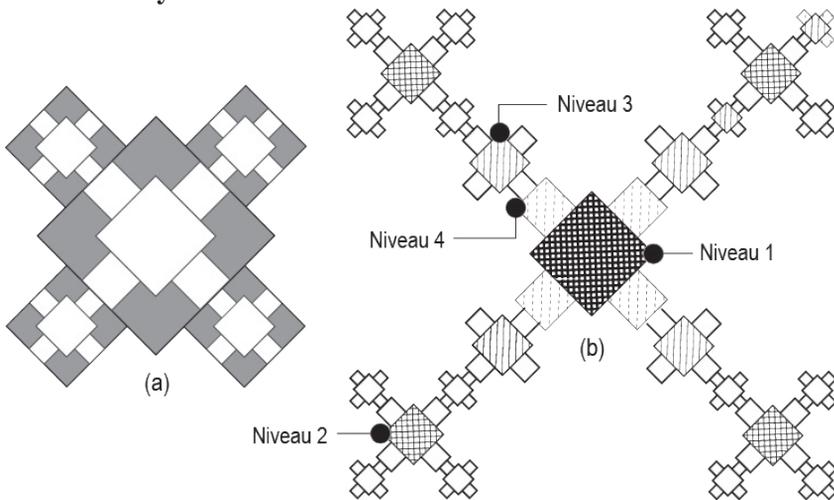
Dans le même état d'esprit, mais adapté au contexte des villes européennes, le récent projet *Bahn.Ville* (L'Hostis *et al.*, 2013) a permis d'envisager l'articulation transport/urbanisme (TOD) en développant un certain nombre de préconisations accompagnées d'un guide méthodologique, ainsi que des méthodes et des outils transposables sur différents terrains d'étude en France et en Allemagne pour favoriser un développement urbain orienté vers et par le rail (Bozzani-Franc *et al.*, 2010). Ces critères tentent notamment d'inclure les terrains et les logements disponibles et une description fine de l'offre de transport mettant en avant les alternatives à l'automobile pour les besoins des ménages, selon une approche qui, dans ses principes, s'approche de la ville fractale.

### 3.3. La ville fractale

L'idée de la ville fractale consiste également à proposer une solution durable pour l'urbanisation, mais sans revenir au concept controversé de ville compacte, ce dernier correspondant peu à la demande sociale résidentielle actuelle. Pour ce faire, la ville est décrite à partir d'un emboîtement d'échelles, tel qu'on l'observe dans certains objets mathématiques comme le teragone ou le tapis de Sierpinski. De nombreuses études montrent en effet que l'organisation des villes laisse apparaître des formes bâties similaires à différentes échelles (Batty et Longley, 1994 ; Frankhauser, 1994) et sont globalement assimilables à des objets fractals.

Formalisée par le mathématicien Benoît Mandelbrot (1924-2010), la fractalité se mesure à travers des formes irrégulières mais homothétiques (on retrouve la même forme à différentes échelles) : la côte bretonne, par exemple, apparaît particulièrement irrégulière et déchiquetée, de même que l'on retrouve une organisation plus ou moins invariante dans les fibres du chou romanesco, au fur et à mesure qu'on le découpe en morceaux plus petits. Par analogie, la forme d'une ville peut être analysée de la même manière, ce qui a conduit à un nouveau regard sur les formes urbaines. La complexité du périmètre d'une ville, par exemple, peut être décrite par sa dimension fractale ; celle-ci permet d'identifier dans quelle mesure il est fait de la répétition de lui-même à différentes échelles, s'éloignant au fur et à mesure d'une figure simple. Parallèlement, comme pour un flocon de neige, le caractère homothétique des fractales s'observe également avec plus ou moins de succès dans l'organisation d'une agglomération (premier niveau) composée de communes (deuxième niveau), elles-mêmes faites de différents quartiers (troisième niveau), chacun apparaissant selon une forme plus ou moins identique et reproduite aux différentes échelles, dans un ensemble qui s'emboîte selon une logique hiérarchique. Cette configuration apparaît aujourd'hui comme une source de réflexion pour un aménagement optimisé des espaces urbains et périurbains.

Figure 2.3  
Système des lieux centraux de la ville fractale



L'image (a) montre le système à la première (gris) et à la deuxième itération (blanc). L'image (b) correspond à la troisième itération et illustre la hiérarchie de niveaux de services, qui s'organisent le long des axes de transport ferroviaire, dans une logique d'emboîtement d'échelles. Sur une base à la fois mathématique et cristallérienne, la ville fractale propose un modèle théorique pour réfléchir à l'organisation des espaces urbains et périurbains.

Source : Frankhauser, 2015.

Concrètement, la fractalité mesurée des tissus urbains permet en effet d'identifier une organisation hiérarchique des espaces urbanisés qui se déploie spatialement en centres et en sous-centres de différents niveaux, selon une logique plus ou moins identique à la théorie des lieux centraux (Christaller, 1933) ou du nouvel urbanisme (Calthorpe, 1992). Dans cette perspective, P. Frankhauser (2007) a développé un modèle conceptuel d'aménagement inspiré du principe hiérarchique des objets fractals. Pour la planification des « nouveaux espaces urbains », il propose une localisation des zones résidentielles permettant de minimiser les distances aux aménités (commerces, services, espaces verts) les plus fréquentées, de manière à généraliser l'usage des modes de déplacement actifs. En revanche, les distances à parcourir peuvent être plus longues pour des services et des usages dont la fréquence de recours est plus faible, avec des mobilités qui peuvent s'appuyer sur un système de transport par rail plus rapide, qui prend la forme d'une croix (figure 2.3). Le concept d'urbanisation concentre ainsi les zones urbanisées le long des axes de transport en commun, et le réseau structure l'emboîtement hiérarchique des lieux, tel qu'il est généré, à différentes échelles, au fil des itérations fractales.

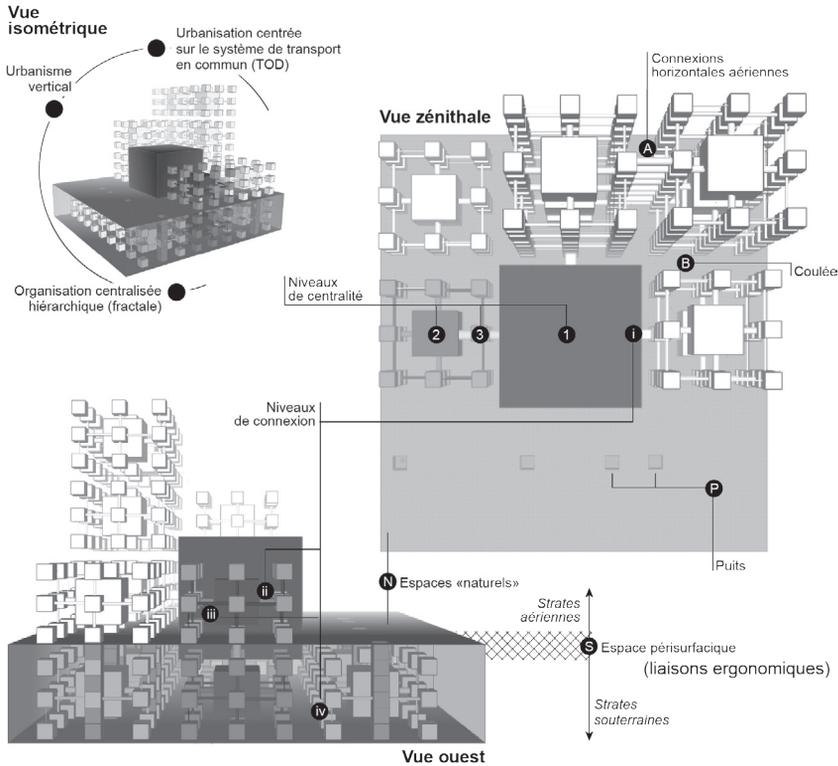
Même s'il ne se prête pas immédiatement à une transposition directe au monde réel, le concept de la ville fractale intègre ainsi l'exigence d'un développement durable en évitant une urbanisation trop diffuse et une fragmentation trop importante des espaces naturels, en même temps qu'il promeut les mobilités les plus vertueuses. D'un point de vue pratique, les principes théoriques de la ville fractale peuvent néanmoins être adaptés. Ils permettent donc de planifier, de spatialiser et d'évaluer des scénarios d'urbanisation à l'échelle d'un quartier, d'une ville ou d'une région urbaine. Cette planification fondée sur la modélisation est aujourd'hui facilitée par le développement d'outils informatiques de simulation qui permettent de systématiser cette démarche sur des agglomérations françaises et des régions européennes, comme cela a pu être montré pour l'espace berlinois (Czerkauer-Yuma *et al.*, 2015).

### 3.4. La ville ergonomique

La ville par le rail et la ville fractale répondent en partie aux exigences développées par une autre discipline qui s'intéresse à l'organisation de l'espace : l'ergonomie. Pour les ergonomes en effet, la minimisation des distances et le regroupement des objets utiles dans un rayon de proximité restreint constitue un moyen d'accroître l'efficacité et le confort au travail. Très tôt dans la discipline, A.C. Oakley (1956) a d'ailleurs illustré les liens entre proximité et efficacité par l'exemple

d'un poste d'emballage de chocolats. Dans un premier temps, ce poste est configuré de façon linéaire avec un fonctionnement qui nécessite des mouvements incessants de la part de l'opérateur en charge de l'emballage. Après le passage des ergonomes, le poste est réorganisé en demi-sphère, de façon à ce que la proximité à tous les éléments évite à l'opérateur de se déplacer et lui permette 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. Cet exemple très simple montre la façon dont l'ergonomie traite les questions liées à l'espace, en les inscrivant dans un *volume* organisé à la fois horizontalement et verticalement.

Figure 2.4  
La ville ergonomique



Trois idées principales : (i) la hiérarchie urbaine juxtapose des centres et des sous-centres (organisation fractale), (ii) les transports relient ces centres proportionnellement à leur taille, (iii) la ville verticale est en partie souterraine. La ville ergonomique présente ainsi un modèle théorique permettant de limiter l'étalement urbain par l'exploitation connectée des proximités verticales en strates superposées.

Source : Antoni, 2014

Cette façon de faire peut être rapprochée du concept d'« Urbanisation transsuffacique à synergie multistratée » (UTSM) proposé par H. Reymond (1998), et résumé par la formule « ville tridiastatique ». L'objectif consiste à dépasser l'idée de ville tridimensionnelle (une ville étant tridimensionnelle par définition) en insistant sur son développement volumique, sans impacter la centralité des quartiers de ville, ni générer d'étalement urbain, et donc de mobilités supplémentaires. À la suite des travaux de l'ingénieur architecte français Édouard Utudjian (1905-1975), *l'urbanisme souterrain* (1952) y joue un rôle important, mais s'accompagne également d'un urbanisme spatial fondé sur les réflexions de M. Ragon (1986) : « le gratte-ciel est typiquement une construction faite au 20<sup>e</sup> siècle par des hommes qui pensaient 19<sup>e</sup> 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. À une autre échelle, on retrouve donc à peu près les enseignements de l'ergonomie quand elle réorganise un poste d'emballage de chocolats.

Ainsi, le couplage « TOD-3D-Fractal » qui émergerait d'une ville ergonomique peut être illustré par la figure 2.4 (Antoni, 2014). Trois idées principales y sont représentées : (i) la hiérarchie urbaine est concrétisée par la juxtaposition de centres, de sous-centres et de sous-sous-centres (organisés de manière fractale comme un tapis de Sierpinski ou une éponge de Menger) relativement denses qui centralisent les points d'entrée au réseau de transport ; (ii) le réseau de transport relie tous les centres avec un niveau de desserte proportionnel à leur taille, en s'appuyant sur le centre principal qui devient un lieu de passage et de recours fondamental pour rejoindre les centres plus petits ; (iii) la ville verticale est en partie souterraine : les éléments techniques qui la font fonctionner sont répartis en sous-sol selon une logique d'aménagement comparable à celle de la surface, et libèrent un espace important laissé à la « nature », et aux puits qui permettent de faire entrer l'air et la lumière solaire en sous-sol. Dans la hauteur, les connexions entre les centres aériens sont optimisées et s'organisent selon la logique d'un « urbanisme spatial ».

Dans le cadre d'un tel projet d'ergonomie urbaine, de nombreuses réflexions restent toutefois encore à mener au sujet des réseaux de

transport. Nous ne pouvons aujourd'hui 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 de transport aérien par câbles : à Barcelone, à Cologne, à Lisbonne ou à Madrid, un système de télécabines circule en boucle sur un câble disposant d'un système de débrayage autorisant la montée et la descente aux stations à fréquence rapide, pour des usagers qui sont essentiellement des touristes ; à Medellin, à Caracas, à Rio de Janeiro, à New York, à Portland ou à Alger, des téléphériques circulent en aller-retour avec une fréquence plus lente, et sont généralement bien intégrés dans le réseau de transport local (Clément-Werny et Schneider, 2012).

## CHAPITRE 3

# Anticipation et évaluation

*« L'imprévu n'est pas l'impossible :  
c'est une carte qui est toujours dans le jeu »*

Comte de Belvèze

Convaincu par des milliers de choses, on peut finalement imaginer l'*ordre idéal* que l'on veut. En s'appuyant sur une approche théorique bien construite, elle-même issue d'expériences mesurées dans le long terme, ou bien découlant simplement de la logique et du bon sens, on peut même refaire le monde autant de fois que l'on veut pour offrir une esthétique concrète à ses propres convictions. Mais pour toutes les raisons évoquées au chapitre précédent, en particulier notre incapacité fondamentale à prévoir les conséquences exactes de nos actions dans un monde complexe en évolution permanente, ces propositions restent des discussions de comptoir tant qu'elles n'ont pas été expérimentées et évaluées. Cette évaluation est un exercice compliqué, qui nécessite d'essayer de savoir de quoi l'avenir sera fait, et de comprendre comment les actions mises en place aujourd'hui l'influenceront d'une manière ou d'une autre. En quelque sorte, c'est une opération qui a longtemps été réservée aux devins, jusqu'à ce que la statistique, puis la prospective, ne lui offrent un cadre plus structuré, dans un contexte scientifique mieux affirmé. Appuyées sur l'informatique, la modélisation et la simulation spatiales ont ainsi permis de franchir une nouvelle étape, qui contribue en elle-même à renforcer la conviction que la recherche scientifique peut être utile pour l'aménagement du territoire.

### 1. LA BOULE DE CRISTAL

La boule de cristal est un moyen de connaître l'avenir, mais elle n'en est qu'un moyen. La question de l'anticipation du futur est en effet à peu près complètement indépendante des méthodes qui permettent cette anticipation. Au cours du temps, ces méthodes ont largement

évolué, mais elles témoignent toutes d'un questionnement identique : comment savoir ce qu'il va se passer, pour savoir ce qu'il faut faire, et donc comment construire un plan et un aménagement de l'espace qui « va avec » ?

### *1.1. Cartomancie*

Connaître l'avenir n'a jamais été un véritable problème pour l'humanité. Pour savoir ce qui allait se passer dans le futur, les Grecs consultaient les oracles et les Romains se référaient aux augures. Malgré un mode opératoire très différent, ces divinations ne sont pas totalement absentes de l'histoire des méthodes de l'aménagement du territoire. La fondation des colonies grecques, d'une importance fondamentale pour le maintien des équilibres démographiques et géographiques, était par exemple placée sous le patronage d'Apollon, dont l'oracle parlait à travers la Pythie à Delphes. Incompréhensible du commun des mortels, la Pythie devait faire l'objet d'une interprétation par des prêtres « qualifiés » qui formulaient ensuite une réponse précise à la question posée. Selon la légende romaine (dont il existe plusieurs versions), Romulus et Remus se réfèrent également aux augures pour déterminer la localisation de Rome, qu'ils souhaitent fonder à proximité du figuier où ils auraient été recueillis par une louve. L'enjeu de la consultation consiste à savoir lequel des deux jumeaux en serait le premier roi et pourrait donner son nom à la ville (la légende présentant ici un cas particulier de gémellité qui ne permet pas l'application traditionnelle du droit d'aînesse). Romulus emporte la mise sur son frère à l'issue d'un présage discerné dans un vol de vautours. Techniquement, l'interprétation de ce présage pose d'ailleurs une question relativement fondamentale pour l'exercice : faut-il accorder la préférence à Romulus qui a observé douze vautours, ou à Remus qui n'en a vu que six mais en premier ? La dispute qui s'ensuit provoque la mort de Remus, qui, probablement par dérision quant à la méthode, venait de franchir le sillon sacré symbolisant la limite de la ville. On peut évidemment penser ce que l'on veut de ces épisodes mythologiques, mais ils témoignent de l'image que l'Antiquité avait de l'avenir et symbolisent une façon de faire que l'on retrouve dans de nombreux récits fondateurs en Europe et dans le monde. Il n'en reste pas moins qu'ils constituent le fondement mythique de l'organisation spatiale complexe des cités et du monde grecs, et que c'est de Rome que devait partir l'ensemble du réseau de voies romaines qui permit à la fois la conquête d'un empire et l'organisation spatiale et politique d'un continent presque entier pendant près de cinq siècles.

Ainsi, comme le montrent ces exemples, les pratiques d'anticipation fondées sur la divination nécessitent systématiquement une interprétation, généralement pratiquée par des « spécialistes », dans un cadre traditionnellement orchestré par un rituel ou une mise en scène. Depuis le Moyen Âge, ce cadre s'est d'ailleurs diversifié en même temps que les vecteurs de divination se sont multipliés : les runes, le tarot, le marc de café, le pendule, etc., sont autant de médias qui permettent aux « voyants » de percevoir une information dans l'espace et dans le temps, et donc de fournir une aide à la décision pour la préparation de l'avenir. La boule de cristal et la cartomancie en restent des exemples archétypaux, largement consacrés dans l'imagerie populaire des pseudo-sciences. Dans ce contexte, la véritable question concerne le niveau de confiance que l'on peut accorder à cette interprétation de l'avenir : dépourvue de filières de formation diplômante, la voyance est souvent considérée comme une duperie exercée par des escrocs dans un but lucratif qui échappe à tout contrôle réglementaire. En France, elle a de ce fait été sanctionnée dès 1682 par une ordonnance royale interdisant de « se mêler de deviner », puis par un article du Code pénal de 1810 (abrogé en 1994) punissant les « gens qui font le métier de deviner ou pronostiquer », et confisquant par la même occasion les « instruments, ustensiles et costumes » (*sic*) permettant de l'exercer. Par l'intermédiaire de l'astrologie et des horoscopes, elle n'en reste pas moins une pratique appréciée et largement relayée par la presse quotidienne, et il n'est pas rare que l'on évoque l'influence qu'elle a pu avoir dans les plus hautes sphères décisionnelles de l'État. La rationalité qui anime les sciences et les techniques est quant à elle totalement hermétique à ce type de pratiques qu'elle considère comme une supercherie fumeuse : la boule de cristal semble désormais définitivement exclue des méthodes d'anticipation et de prospective territoriale.

### 1.2. Projection

Dans le cadre scientifique établi depuis le 19<sup>e</sup> siècle, le prolongement de tendance apparaît comme un moyen nettement plus fiable pour *projeter* vers le futur une information dont on connaît tout ou partie du comportement passé. Cette projection mobilise la connaissance quantitative du processus étudié et l'extrapole à partir d'un modèle mathématique qui prend généralement la forme d'une régression statistique (Wonnacott et Wonnacott, 1999). Concrètement, cette régression produit une droite ou une courbe plus ou moins complexe qui indique la relation supposée entre la variable  $y$  que l'on souhaite extrapoler et la variable  $x$  censée expliquer pourquoi et comment elle

peut l'être. Une droite étant infinie par définition, on peut la suivre depuis où l'on veut dans le passé jusqu'à où l'on veut dans l'avenir. La relation entre  $y$  et  $x$  prend alors la forme suivante :

$$y = ax + b + e$$

D'un point de vue statistique,  $a$  indique à la fois le sens de la relation entre  $x$  et  $y$  (il est positif si elles augmentent en même temps et négatif si l'une augmente alors que l'autre diminue) et son intensité (plus  $a$  est important, plus une variable augmente rapidement par rapport à l'autre). Parallèlement, la variable  $b$  indique l'ordonnée à l'origine, c'est-à-dire la valeur de  $y$  quand  $x = 0$ . Enfin, la variable  $e$  est celle qui pose le plus de difficultés pratiques puisqu'elle représente l'aléa ou la perturbation permettant d'écrire sous la forme d'une droite théorique une relation qui n'est que rarement linéaire dans la réalité. Sauf à tout miser sur un énorme coup de chance, la relation estimée par le modèle statistique ne correspond jamais exactement à son évolution réelle. La perturbation  $e$  en résume l'erreur d'estimation, ainsi que la variabilité intrinsèque.

Si un tel modèle linéaire est mathématiquement aisé à calculer par la méthode des moindres carrés, la question qui se pose reste fondamentalement de savoir ce qu'il représente d'un point de vue concret. En effet, si seule l'évolution de la variable  $y$  est connue dans le temps, l'unique moyen de la prolonger dans le futur consiste à poser l'hypothèse que le temps est justement la variable qui la détermine, ce qui revient à dire qu'il explique par lui-même le processus étudié (ou que ce processus se détermine par lui-même). Cette position conduit évidemment à une aberration, parfaitement illustrée par deux exemples classiques d'extrapolations fondamentales pour l'aménagement des territoires : les projections démographiques (naissances, vieillissement) et les projections agricoles (récoltes, élevage). L'extrapolation simple de ces deux variables apparaît ici erronée dès le départ, dans la mesure où l'on sait que chacune des deux est fonction d'autres variables, elles-mêmes plus ou moins indépendantes du temps : le perfectionnement des services de santé, l'amélioration du niveau de vie, le développement industriel des techniques de production, la demande en produits agricoles (lui-même dépendant de la démographie), etc. De ce fait, il apparaît clair que l'évolution d'une variable ne peut être définie uniquement à partir de ses valeurs passées : elle doit intégrer des contraintes explicatives dont les relations de cause à effet sont connues par ailleurs et non uniquement mesurées dans une série temporelle issue de comptages. Pour pallier ce problème, il est possible de faire intervenir des variables complémentaires ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) qui se répercuteront sur l'évolution de celle que l'on cherche à étudier ( $y$ ). La

formalisation et le calcul de cette répercussion sont par exemple possibles par une régression multiple, soit une extension de la régression simple, définie par une formule un peu plus complexe :

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + e$$

De surcroît, on peut également partir du principe que la relation entre ces variables n'est pas linéaire (exprimée par une droite) : elle peut prendre la forme de courbes répondant à des fonctions diverses (exponentielle, logarithmique, puissance, etc.) qui témoignent de la relation présumée entre un  $y$  et ses  $x$ . Comme précédemment, cette relation non linéaire est facile à calculer à l'aide de n'importe quel outil bureautique de statistique, même si ses implications mathématiques s'avèrent parfois relativement complexes. En France, c'est dans ce type de complexité que les projections démographiques réalisées par l'INSEE à partir du modèle Omphale sont calculées. Plus complet qu'une simple régression, le modèle Omphale fait notamment intervenir la technique du lissage pour mieux interpréter les profils de population par classes d'âge, et prévoir le nombre d'habitants dans le futur à partir de trois variables : la fécondité, la mortalité et les migrations. L'évolution future de ces variables ( $x$ ), qui détermine l'évolution de la population ( $y$ ), n'étant pas connue *a priori*, des hypothèses (hautes, centrales ou basses), qui prennent la forme de scénarios, sont discutées pour réaliser la projection de la population. La dernière projection réalisée dans ce contexte utilise les données de 2007 pour déterminer la population d'hommes et de femmes chaque année jusqu'en 2060, et de nombreuses études d'aménagement et de planification spatiale y font actuellement référence pour programmer les investissements à venir en termes de services publics, de logements ou de potentiel d'attractivité des territoires.

Quelle que soit la méthode utilisée, la projection de tendance fournit donc des résultats. Mais ces derniers se trouvent quasiment systématiquement faussés par deux types d'erreurs clairement identifiés : (i) le modèle n'intègre que les informations mesurées à la date du calcul et fait donc l'impasse sur toutes les autres, même si celles-ci sont connues ou prévisibles ; (ii) la vitesse des processus dont on projette la tendance reste difficile à prendre en compte, et, même si les résultats sont objectivement corrects, il n'est pas évident que le rythme auquel il est prévu qu'ils apparaissent soit le bon. Dans ce contexte, il semble évident que la planification et l'aménagement par projection dépendent dans une large mesure de la technique adoptée pour prolonger les tendances observées. Le recours aux projections, même si elle se justifie en partie par la démonstration mathématique, impose

une grande prudence aux techniciens qui les mettent en œuvre, ainsi qu'aux décideurs qui en utilisent les résultats sans nécessairement maîtriser les subtilités de leur calcul. Il n'est du coup pas étonnant que, malgré une utilisation régulière dans la pratique, la projection fasse l'objet d'un certain scepticisme quant à sa capacité à prévoir l'avenir. Le choix entre les différentes hypothèses et les différentes méthodes permettant d'anticiper l'avenir relève en effet toujours plus ou moins de la « boule de cristal ». Le problème que ce choix soulève est justement celui que la prospective souhaite dépasser en généralisant le recours aux scénarios.

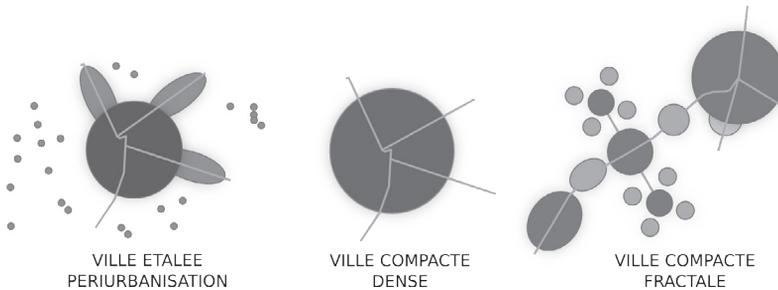
### 1.3. Prospective

Les rapports entre projection et prospective peuvent être distingués par leur type de prévisions : la première suppose ce qui sera dans le prolongement de ce qui a été (l'avenir est une simple projection du passé), alors que la seconde explore le futur comme une terre inconnue (aucune projection du passé ne peut constituer un avenir en soi). Selon P. Des-tatte et P. Durance (2009), nous sommes ici face à deux modes de « pré- vision » du futur caractérisés par des opérations de l'esprit de natures complètement différentes : d'un côté, la soumission aux apparences observées, de l'autre une analyse en profondeur dans laquelle l'imagination devient déterminante (ce qui rapproche implicitement la prospec- tive de l'utopie). Pour J. de Courson (1999), ce sont trois choses qu'il faut distinguer : (i) la projection qui apparaît comme un exercice purement mécanique qui consiste à prolonger dans le futur des évolutions passées « toutes choses égales par ailleurs », sans réel souci de réalisme ; (ii) la prévision, qui s'appuie sur un exercice préalable de projection, qui prend en compte les évolutions internes et externes de la variable considérée, et tente de la quantifier de manière réaliste à une date future donnée ou dans une fourchette de valeurs (c'est le cas du modèle Omphale) ; (iii) la prospective, qui, *a contrario* des précédentes, décrit les futurs possibles et les cheminements nécessaires pour y parvenir, dans une démarche dynamique, non prédictive, et volontariste.

Du latin *pro-jicere* (jeter en avant), la prospective apparaît d'abord comme une représentation (et donc une interprétation) symbolique et/ou visuelle du futur. Comme l'utopie, elle fait appel à l'imagination et aux rêves qui permettent une projection mentale dans le futur. Initialement dénommée futurologie, la prospective est née aux États-Unis à la fin de la Seconde guerre mondiale à des fins essentiellement militaires. Elle a été introduite en France par le philosophe Gaston Berger (1896-1960) durant les années 1950 par l'intermédiaire de la

revue *Prospectives*, dans une acception plus philosophique que pratique. C'est ensuite B. de Jouvenel (1964) qui l'a reconstruite comme un champ disciplinaire à part entière, instituant une prospective typiquement française (entendue comme une philosophie de l'action), à distinguer de son corollaire anglo-saxon *foresight* qui s'apparente plutôt à une évaluation des choix technologiques. D'abord limitée au domaine économique pour des études de cas à court terme, la prospective touche aujourd'hui de nombreuses disciplines dans le long terme, selon une démarche qui s'inscrit de plus en plus dans un cadre scientifique. À la différence de la prévision, elle constitue donc réellement une réflexion sur les possibilités qui attendent l'avenir, et se forge à partir de la volonté d'un ou de plusieurs acteurs de faire des choix et de définir les moyens qui permettront de mettre en œuvre un futur (donc un *ordre*) souhaité. La prospective ne se sépare donc pas des convictions de son auteur, ces dernières lui permettant de « fabriquer un futur ». Toutefois, ce futur ne correspond pas à sa seule volonté ; il repose sur une hypothèse et apparaît comme la conséquence de la réalisation de cette hypothèse. Par définition, la prospective est donc exploratoire : en positionnant simultanément l'homme comme l'acteur et le spectateur de sa démarche, elle découle obligatoirement d'une analyse subjective qui fait intervenir une certaine vision du monde.

Figure 3.1  
**Scénarios d'aménagement urbain**



Trois schémas de scénarios contrastés testés dans le cadre du projet VILMODes (Antoni *et al.*, 2015) pour les villes de Lyon et Besançon à l'horizon 2030 : l'étalement urbain (1) résultant d'un laisser-faire sans politique concertée d'aménagement, et deux propositions interventionnistes pour un renouvellement urbain compact (2) ou une ville fractale desservie par le rail (3). Les simulations sur les cas d'étude réels ont été réalisées à l'aide d'une modélisation LUTI intégrant plusieurs modèles d'aménagement urbain.

Dans cette perspective, et malgré une méthodologie globalement identique, les objectifs de la prospective diffèrent par différents aspects : la prospective spéculative (ou cognitive) cherche à comprendre le futur et s'impose comme une démarche de représentation de ce futur, la

prospective participative implique les acteurs du territoire dans un débat collectif portant sur le futur, la prospective stratégique est clairement orientée vers l'action, etc. Parallèlement, trois possibilités combinées permettent de définir le futur : (i) un futur nécessaire procédant de déterminisme auquel il est obligatoire de se soumettre ; (ii) un futur aléatoire, et à ce titre totalement imprévisible ; (iii) un futur libre que l'homme peut s'accorder la liberté de construire. La prospective oscille donc entre deux opposés : un futur inéluctable et un futur à construire. Dans le premier cas, l'investigation constitue une science qui étudie et quantifie les faits ; dans le second, elle apparaît plus créatrice et conduit ses démarches de la façon la plus rationnelle et cohérente possible, mais en y introduisant une bonne part d'imagination, celle qui permet justement de construire le futur. R. Jungk (1974) note à ce sujet que l'esprit prospectiviste doit s'animer « d'idées folles, de jamais vu et d'inconcevable », de manière à ce que l'imagination et la raison s'associent pour créer des scénarios, c'est-à-dire des images du futur que l'on cherche à visualiser. La construction de scénarios constitue de ce fait réellement la méthode de la prospective. Ces scénarios sont dits *tendanciels* quand ils mobilisent les évolutions connues pour cheminer jusqu'au terme temporel fixé à la prospection, et *contrastés* quand l'image finale dont on cherche à mesurer l'accessibilité dans le futur s'oppose vigoureusement à celle du présent (figure 3.1).

Ainsi, quand elle s'applique à l'aménagement du territoire ou à l'urbanisme, la prospective ne cherche pas tant à comprendre le futur en se représentant ce qu'il pourrait être. Elle vise plutôt (i) à entreprendre une démarche participative impliquant tous les acteurs du territoire (ou au moins un grand nombre) à propos du futur, et (ii) à construire une vision stratégique orientée vers l'action, permettant une prise de décisions allant dans le sens du futur projeté. Réaliser cet ensemble apparaît alors comme un véritable défi, qui peut nécessiter l'usage d'outils informatiques orientés vers la simulation.

## 2. L'ORDINATEUR DE BUREAU

L'ordinateur, et derrière lui le développement de l'informatique, est aujourd'hui un des outils qui permet de réaliser des simulations dans un cadre prospectif. La puissance actuelle des calculateurs permet en effet de manipuler des modèles complexes et d'y faire varier des paramètres pour construire des scénarios, avec une vitesse, une précision et finalement un confort impossibles à égaler par une approche « manuelle ». L'appui de l'informatique ne se situe cependant pas

uniquement dans la puissance de calcul : le mode de fonctionnement des ordinateurs a également introduit une logique et une vision du monde qui lui sont propres dans les modèles de simulation. L'ordinateur reste donc un outil qui ne fait que ce qu'on lui dit de faire ; mais il le fait très vite, sans se tromper, et dans une démarche d'innovation conceptuelle, ce qui constitue un avantage considérable.

### 2.1. Modélisation

Pour expliquer le rôle et l'intérêt de la modélisation dans les disciplines spatiales, R. Minshull (1975) raconte l'histoire d'un enseignant-chercheur en géographie en début de carrière vers le milieu du 20<sup>e</sup> siècle. Jeune et inexpérimenté, il était contraint d'enseigner tous les champs de la discipline (géographie physique et humaine) de manière équivalente en termes de connaissance et d'enjeux. Ses cours de géographie physique étant à l'image de sa motivation, tous les étudiants comprenaient presque immédiatement le principe d'un cycle d'érosion ou de lixiviation, la construction des paysages, la formation des cyclones ou la composition des sols. Sa logique pédagogique lui valait d'ailleurs de nombreux admirateurs et ses schémas persuadaient « même les filles » de devenir géologue, météorologue ou ingénieur des sols. En revanche, lorsqu'il abordait la géographie humaine, la question des transports, de l'industrie ou de la distribution des populations sur le territoire, ses cours devenaient terriblement ennuyeux : il dictait des chiffres de croissance urbaine à Manchester ou à Bradford sans que personne n'arrive à les enregistrer, et se perdait lui-même en citant les données de l'emploi, en s'émerveillant qu'une ville croisse plus vite qu'une autre, ou moins vite qu'une autre, ou même que toutes les villes croissent à la même vitesse. Il en conclut rapidement que cette branche de la géographie était la moins intéressante, et ne voyait aucun de ses étudiants s'orienter vers les métiers de l'urbanisme ou de l'aménagement du territoire : ils quittaient le cours avec le sentiment que la géographie humaine n'était qu'une succession de faits à apprendre les uns après les autres, sans que personne ne parvienne à les exposer de manière logique, ni à les illustrer sous la forme de diagrammes utiles en termes de communication.

En même temps que R. Minshull nous avoue que ce géographe n'existe pas dans la réalité, il explique qu'il n'a jamais considéré les questions de la géographie humaine sous le bon angle. La taille initiale des agglomérations ne l'intéressait pas, et il ne parlait jamais des interactions entre les villes, ni des migrations qu'elles pouvaient générer. En observant les faits, il aurait pourtant été capable de formuler des

hypothèses sur le fonctionnement de ces ensembles complexes et de les concevoir sous une forme verbale à la fois descriptive et explicative. Cette formalisation aurait d'ailleurs pu être exprimée sous la forme de schémas ou d'équations mathématiques. Pour parler de la croissance des villes, il aurait par exemple pu définir les éléments composant le système de ces villes, en particulier la population urbaine et la population rurale environnante. Leur développement serait alors apparu comme une fonction de leur population et de leur force d'attraction sur les campagnes. En simplifiant un peu cette hypothèse, il aurait alors montré que l'importance des migrations vers une ville dépend directement de sa taille, et donc que, pour une période identique, une ville d'un million d'habitants est deux fois plus attractive qu'une ville de 500 000 habitants. On imagine que ses étudiantes auraient été séduites.

Deux choses apparaissent essentielles dans cet exemple. Premièrement, c'est l'importance de la *description* des migrations dans des villes de différentes tailles, formalisée par un schéma ou une équation mathématique. Deuxièmement, c'est l'*explication* qui découle explicitement de cette équation, et qui désigne l'hypothèse qui explique pourquoi les choses se passent comme ça. Cette description et cette explication pourraient d'ailleurs s'exprimer par diverses autres hypothèses : la plus grande variété des emplois d'une grande ville, des conditions de logement souvent meilleures, la diversité des aménités (écoles, théâtres, loisirs) que l'on y trouve, etc., justifient également le fait qu'elle attire plus de monde qu'une ville plus petite. Ce système relativement complexe est ici résumé dans son ensemble par une seule variable : la population. Nous sommes donc face à un modèle relativement simple, c'est-à-dire une description et une explication hypothétique (dans le sens où elle est fondée sur une ou plusieurs hypothèses) qui simplifie un certain nombre de processus en interaction dans le monde réel. Selon une démarche expérimentale, il ne reste plus qu'à tester le modèle et ses hypothèses pour voir dans quelle mesure il est juste et dans quelle mesure il est faux. C'est précisément à cette étape que R. Munshell (1975) fait intervenir un deuxième chercheur dans son histoire.

Dans une autre université, ce deuxième chercheur a également élaboré un modèle à partir de l'observation de la croissance des villes, mais il s'est fondé sur une hypothèse de départ différente : il part du principe que les migrations les plus importantes se font certes majoritairement d'une ville vers une autre ville, mais que les villes de taille moyenne sont hypothétiquement celles qui croissent le plus vite. En effet, ses observations ont montré que les villes de 750 000 habitants attiraient plus que celles de 500 000, parce que celles-ci sont trop peu fournies en aménités, et également plus que celles de 1 000 000, parce

que ces dernières sont trop denses et que leur système de transport est saturé. Ce deuxième modèle propose lui aussi une version simplifiée et explicative de la croissance urbaine, envisagée sous un angle tout aussi partiel que le premier, mais différent. Les deux doivent donc être testés de manière concomitante, et, sauf à tout miser sur un énorme coup de chance ici encore, il est peu probable que l'un apparaisse complètement juste alors que l'autre serait complètement faux. Chacun pourrait au contraire apporter la preuve partielle qu'il est sur la bonne voie, même si les deux conduisent à des erreurs ou à des approximations démontrant qu'ils n'intègrent qu'une partie de la réalité observée. Cette incomplétude est une des caractéristiques de la modélisation, et elle n'enlève rien à son intérêt pour comprendre le monde réel et simuler ce qu'il peut devenir.

## 2.2. Simulation

Dans le domaine de l'urbanisme, de l'aménagement du territoire ou du transport, la modélisation consiste généralement à simplifier la réalité du monde de manière à mieux comprendre comment les décisions et les événements y interagissent les uns avec les autres. Elle permet également de les reproduire ou de les modifier *in vitro*, afin de tester des solutions qui permettraient d'influencer ou d'orienter leurs conséquences, de décider à l'avance des politiques et des stratégies qui peuvent conduire à un futur souhaitable. La modélisation tente ici d'offrir une réponse à des questions du type : « que se passerait-il si l'on faisait cela ? » ou bien « que deviendrait ceci si l'on faisait cela ? ». Dans la grande majorité des cas, les simulations de ce type sont des solutions virtuelles, fondées sur la puissance de calcul des ordinateurs. En sciences sociales, elles se sont d'ailleurs généralisées dans les années 1990, à l'issue de la diffusion de machines individuelles performantes. Elles ont alors été influencées par la physique, les mathématiques et les sciences informatiques, qui leur ont apporté des concepts, des outils et des méthodes directement applicables pour formaliser leurs hypothèses. Dans cette perspective, comme le rappellent J.R. Emshoff et R.L. Sisson (1970) ou encore A. Dauphiné (1987), la simulation est indissociable de la modélisation sur laquelle elle s'appuie : elle n'en est qu'une étape. La démarche complète consiste d'abord à construire un modèle, puis à l'utiliser pour simuler informatiquement le comportement d'un système, éventuellement à tester la modification de certains paramètres, afin de multiplier les résultats, qui correspondent alors à autant de scénarios liés à l'introduction d'une idée ou d'un processus original au sein de l'ensemble modélisé. Considérée dans ce sens, la

modélisation apparaît véritablement comme une phase à part entière de la démarche scientifique expérimentale (Popper, 1937). Le modèle devient ainsi une pièce centrale de la simulation prospective et correspond toujours à une représentation simplifiée d'une réalité, qui lui donne du sens et qui permet de mieux la comprendre (Haggett et Chorley, 1967).

Ainsi, chaque modèle possède sa propre échelle, à partir de laquelle il propose d'étudier la réalité dans un « état d'esprit » qui lui est propre, avec un certain objectif. Ce qui n'affecte pas directement cet objectif peut être éliminé de l'étude, alors que les éléments qui permettent de l'atteindre se trouvent souvent artificiellement exagérés. Au cœur des modèles, le monde n'existe donc plus comme une réalité tangible, mais comme une connexité formelle et limitée, que l'on explore 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, une approximation très subjective qui ne tient pas compte de toutes les observations et de toutes les mesures. Et c'est justement la raison de leur intérêt : ils masquent les détails et permettent de focaliser sur les aspects fondamentaux de la réalité, du moins ceux que l'on cherche à mieux comprendre ou à simuler. Cela étant, le recours à un modèle de simulation ne doit pas s'assimiler à une réduction strictement technique ou informatique de la réalité. Il nécessite au contraire une connaissance fine des territoires modélisés. Cette connaissance du terrain, indispensable d'un point de vue inductif pour poser les hypothèses de départ qui détermineront la construction du modèle, s'appuie sur d'innombrables études (démographiques, économiques, sociales, prospectives, etc.) réalisées par ailleurs. Pour les intégrer, la question de l'échelle apparaît alors déterminante à plusieurs égards. La modélisation, même si elle s'appuie sur un outillage général formalisé de manière plus ou moins « universelle », n'en reste pas moins toujours un cas particulier, qui n'est interprétable que dans un contexte nominal.

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). Et cette sélection implique qu'ils diffèrent souvent grandement de la réalité, qu'ils n'en soient que des approximations parfois caricaturales, mais suffisamment simples pour être correctement manipulées et comprises par ceux qui les utilisent, suffisamment représentatives pour qualifier correctement le monde auquel elles veulent correspondre, et suffisamment complexes pour caractériser avec une certaine exactitude

le système qu'elles étudient. Finalement, chaque modèle se présente comme une sorte de compromis : il possède son champ de conditions, à l'intérieur duquel il est valable et en dehors duquel il ne correspond plus à rien (Skillings, 1964). Dans ce contexte, il n'est pas étonnant que certains modèles s'assimilent à des « boîtes noires », dont le rapport à la réalité peut apparaître particulièrement obscur.

### 2.3. Boîtes noires

Connue du commun des mortels par référence aux enregistreurs électroniques de paramètres qui équipent les aéronefs, la notion de boîte noire peut également être associée à de nombreux modèles actuels de l'aménagement du territoire. Elle apparaît d'ailleurs assez tôt dans l'histoire de la modélisation puisque R.J. Chorley (Haggett et Chorley, 1967) en parle déjà comme une catégorie à part, qu'il distingue des modèles dits synthétiques (suffisamment identiques au monde réel pour que l'on comprenne comment ce dernier fonctionne), et des modèles dits partiels (plus éloignés de la réalité, mais néanmoins suffisamment proches pour en comprendre et en extrapoler une partie). Si les qualificatifs qu'il emploie à l'époque n'ont plus grand intérêt aujourd'hui, l'idée demeure : utiliser une boîte noire ne correspond ni à une démarche synthétique ni à une démarche partielle. Elle revient à n'avoir aucune idée du fonctionnement du système modélisé, mais permet néanmoins de construire un dispositif de calcul dont les résultats sont censés représenter le monde réel. On se demande bien comment c'est possible, mais il faut se rendre à l'évidence : parfois, ça marche.

De nombreux exemples historiques témoignent de ce coup de force, le plus connu étant probablement celui de l'aspirine, dont le brevet, déposé en 1899, est commercialisé en France en 1908. L'aspirine exploite un concentré synthétique d'acide salicylique, dont les vertus naturelles sont connues depuis l'Antiquité et qu'Hippocrate conseillait déjà dans des préparations à base d'écorce de saule blanc pour soulager les douleurs et les fièvres. Empiriquement, l'aspirine apparaît en effet comme un antalgique (réduction de la douleur), un antipyrétique (réduction de la fièvre) et un anti-inflammatoire, qui en ont rapidement fait un médicament très populaire. Au moment de sa commercialisation, l'aspirine est pourtant une véritable boîte noire. Elle est utilisée pour ses effets, mais sans que personne sache vraiment comment elle fonctionne. Il faudra attendre 1971 pour que le pharmacologue britannique John Vane (1927-2004) démontre l'action de la molécule sur les prostaglandines, découverte pour laquelle il sera récompensé du prix Nobel de médecine en 1982. Pendant près d'un

siècle l'aspirine a donc été prescrite et utilisée sans que son mécanisme actif soit connu et sans que son efficacité soit jamais remise en cause. Tout aussi ancien, un exemple similaire existe dans le mode agricole, où l'expérience a montré que la surexploitation des terres pouvaient conduire à une érosion prématurée et excessive des sols. Pour autant, dans le détail, les processus à l'origine de cette érosion sont longtemps demeurés inconnus des principaux intéressés, ce qui ne les a pas empêché d'ajuster leurs méthodes de production pour maintenir un rendement optimal. Dans chacun de ces exemples, la cause et l'effet sont représentés correctement, mais sans que l'on sache exactement ce qu'il se passe entre les deux, et sans que cela pose de problème particulier d'un point de vue opérationnel. Dans les deux cas, nous sommes donc bien face à des boîtes noires... qui fonctionnent.

Un problème à peu près similaire se retrouve aujourd'hui dans les modèles qui font intervenir des variables aléatoires. La valeur de ces variables est en effet laissée au hasard pour signifier qu'on sait qu'elles ont une influence sur le modèle, mais qu'on ne connaît pas exactement la manière avec laquelle elles l'influencent, ni la véritable nature des processus qu'elles sont censées représenter. Leur intégration conduit de ce fait à la construction de modèles dit stochastiques, dont le fonctionnement est tout ou partie laissé au hasard dans un contexte qui s'approche des simulations de Monte-Carlo. Fondés sur la théorie mathématique des probabilités, ces modèles stochastiques diffèrent fortement des modèles déterministes qui reproduisent systématiquement et exactement les mêmes processus, sans variation d'une simulation à une autre. Les variations propres aux modèles stochastiques constituent de ce fait également un « effet boîte noire », dans la mesure où, par définition, leur aléa influence les résultats sans qu'il soit possible de savoir exactement comment. Cet aléa, que l'on qualifie parfois également de *bruit*, n'est toutefois pas inutile. Il peut même apparaître tout à fait pertinent pour simuler avec plus de réalisme des processus mal décrits par un processus déterministe. En géographie par exemple, les modèles stochastiques de diffusion mis au point par T. Hägerstrand (1970) ont été largement éprouvés et validés, leur dimension probabiliste pouvant être interprétée, toutes choses égales par ailleurs, comme une représentation du fonctionnement non rationnel et partiellement aléatoire du système modélisé. Le bruit ainsi généré est depuis relativement courant dans le champ de la modélisation. Il apparaît soit comme une information aléatoire à distinguer d'une donnée connue avec précision, soit comme une variation permettant de relativiser la formalisation possiblement trop stricte d'un modèle.

Dans le cas de l'aménagement du territoire, une boîte noire correspond ainsi à un modèle dont l'utilisateur ne formule aucune ou quasiment aucune hypothèse. Elle utilise des résultats dont il ne sait de quelle manière ils ont été produits et ne fait donc pas intervenir ses propres convictions sur la manière avec laquelle le monde fonctionne ou devrait fonctionner. Ainsi, par exemple, quand un conducteur de train pousse son levier vers l'avant, le train avance ; de la même manière, quand un enfant pousse le levier de son train électrique, le train avance. Mais, dans ce contexte de boîte noire, personne ne se préoccupe de savoir si la machinerie du train et de son modèle réduit fonctionne réellement de la même manière. Par ailleurs, aucune compagnie de chemins de fer n'aurait non plus l'idée de confier le pilotage d'un TGV au président d'une association de modélisme. Dans le même ordre d'exemples, P. Haggett (1965) a montré que le mouvement de bouchons aimantés flottant sur l'eau peut reproduire des formes similaires aux hexagones de la théorie des lieux centraux de W. Christaller. Si étrangement similaire que cela puisse être, c'est pourtant un non-sens complet dans la mesure où les aimants se rejettent physiquement les uns les autres, alors que les villes sont au contraire censées attirer la population des régions dont elles constituent le centre. Sauf à croire que le courant du Rhin est de même nature que le courant électrique, il devient de ce fait impossible de certifier qu'une boîte noire fonctionne comme la réalité, notamment quand on l'utilise dans une dimension prospective. Ainsi, même si les boîtes noires peuvent se révéler utiles pour la prédiction, elles sont globalement dénuées de dimension explicative et n'apportent rien à la compréhension du monde tel qu'il fonctionne dans la réalité, et dont la projection dans le futur demande de surcroît à être observée à travers des jumelles de vision nocturne.

### 3. LES JUMELLES DE VISION NOCTURNE

Les jumelles de vision nocturne sont des instruments optiques qui permettent de voir dans l'obscurité. Essentiellement utilisées par les militaires pour les opérations de nuit, elles permettent de voir quand personne ne voit rien, ou du moins, pas grand-chose. Pour passer à travers l'obscurité dans laquelle l'incertitude plonge les opérations d'aménagement du territoire, c'est-à-dire pour « agir en avenir incertain » (Callon *et al.*, 2001), il est clair qu'elles s'avèreraient fort utiles. En effet, comme l'indique la loi Barnier (1995), « l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du

moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives [...] ». Évidemment des lunettes de vision nocturne dédiées à la prospective territoriale n'existent pas. Mais une alternative temporaire consiste à multiplier les champs de vision, par une concertation renforcée des acteurs impliqués, puis par une évaluation *ex ante* des conséquences des politiques d'aménagement sur les territoires.

### 3.1. Incertitude

Pour B. Latour, l'entrée dans le 21<sup>e</sup> siècle correspond à une période de « deuxième modernité » : alors que la première modernisation des sociétés occidentales concevait de manière séparée l'innovation et les conséquences de cette innovation, l'époque actuelle change la donne pour deux raisons. D'une part, la réflexivité, en tant que principe philosophique intégré depuis peu aux sciences politiques, invite à penser que les choses se reconstruisent en même temps qu'elles se construisent, et qu'elles interfèrent en elles-mêmes entre une cause et ses effets, ce qui nécessite de les concevoir sous la forme d'un couplage. D'autre part, le principe de précaution et les « lanceurs d'alertes » (comme le Club de Rome) ont permis de mieux réaliser l'importance des impacts possibles de la prise de décision. Il en découle que l'action et ses conséquences ne peuvent plus être considérées comme deux choses séparées. Elles s'inscrivent désormais dans une logique réflexive au sein de laquelle elles sont censées agir rétroactivement l'une sur l'autre de manière quasiment simultanée. Pour Y. Chalas *et al.* (2009), cette « deuxième modernité » témoigne d'un contexte nouveau associé à la notion d'*incertitude*, qui, d'un certain point de vue, succéderait aujourd'hui à la prévision et à l'anticipation, ainsi qu'à la planification.

Par définition, l'incertitude est exactement le contraire de la certitude : le fait de ne pas être sûr de quelque chose. Pour la gestion des risques naturels et technologiques associés aux politiques d'aménagement du territoire par exemple, elle est liée à notre faible connaissance des aléas. On s'intéresse généralement à l'avenir d'une installation à partir de données issues de l'observation du passé pour quantifier la probabilité d'occurrence d'un risque, même si cette dernière est quasiment impossible à certifier compte tenu de l'absence de statistiques fiables, et d'une méconnaissance des processus qui conduisent précisément à la réalisation du phénomène que l'on redoute de voir arriver. Notre connaissance à ce sujet n'est jamais tout à fait nulle (sans quoi l'on serait paradoxalement certain d'être incertain), mais elle reste souvent très faible.

Selon Y. Chalas et O. Soubeyran (2009), il y aurait de ce fait trois types d'incertitudes en aménagement. La première concerne l'inconnu que représente l'absence de politique stratégique ; elle est généralement bien identifiée par les décideurs, et c'est justement elle qui doit être réduite par les actions qu'ils mettent en place (l'action et ses effets sont intentionnels). La deuxième concerne les effets non intentionnels (donc non voulus) auxquels ces actions peuvent possiblement mener, effets qui restent plus ou moins prévisibles dans la mesure où, *a minima*, ils peuvent être identifiés (l'action est intentionnelle, mais ses conséquences ne le sont qu'en partie). La troisième tourne autour du fait que l'intérêt réel d'une action ne peut être pleinement compris qu'à partir du moment où cette action a été concrètement réalisée (l'action est-elle réellement intentionnelle ou relève-t-elle purement et simplement d'une *improvisation* plus ou moins inconsciente ?). Dans les deux derniers cas (effets non intentionnels et improvisation), la dimension planificatrice de l'aménagement deviendrait alors absurde, dans la mesure où elle consisterait à fonctionner selon un couple actions-effets non intentionnel qui renierait sa dimension prospective, et qui reviendrait de ce fait à faire « n'importe quoi ».

Dans le contexte qu'impose la notion d'incertitude, l'aménagement planifié du territoire pourrait en effet ne plus être le mode privilégié de l'action. On pourrait même considérer que les méthodes de la décision devraient privilégier les processus conduisant à la mise en place de projets plutôt que le résultat escompté de ces projets en tant que tel. En effet, comment mettre en place une stratégie de planification en étant persuadés que l'incertitude dans laquelle nous sommes plongés nous impose en réalité de corriger le tir de manière permanente, et donc de piloter à vue ? Pour répondre à cette question, le management d'entreprise propose essentiellement deux solutions. Premièrement, il s'agirait de diviser le projet en différentes parties et d'analyser chacune d'elles indépendamment les unes des autres (que savons-nous au sujet des technologies, des réalités de leur financement et des besoins réels des usagers ?). Mais cela reviendrait à adopter une démarche analytique qui entrerait immédiatement en contradiction avec la complexité du fonctionnement des territoires : la technologie dépend du niveau de financement qu'on lui accorde et les besoins des usagers ne sont pas indépendants des solutions que l'on peut leur proposer. Deuxièmement, les conséquences de l'action pourraient être appréhendées par l'essai, l'apprentissage et l'erreur, en testant des options parallèles, et en observant *in vivo* leur résultat avant de choisir la plus appropriée. Mais, quand ces actions concernent des projets très lourds à financer, et qui, de surcroît,

modèlent les territoires pour des siècles ou des décennies, sommes-nous éthiquement en mesure de souscrire à une telle proposition ?

En intégrant la notion d'incertitude, il faut bien reconnaître que la pratique de l'aménagement et de la planification, qu'elle concerne la forme des villes comme les politiques de transport, se tire ouvertement une balle dans le pied. Pour autant, dans la mesure où cette idée est défendue par ailleurs, l'incertitude peut-elle être passée sous silence ? Pour illustrer cette question, Y. Chalas et O. Soubeyran (2009) proposent l'image d'une « double hélice » reliant le politique et l'aménagement. Elle propose d'aborder *crescendo* la question des conséquences, qui apparaissent successivement comme des impacts, des risques ou des menaces potentielles. Dans le cas des impacts (conséquences légères), l'incertitude peut conduire le monde des décideurs à adopter un comportement « amnésique » par lequel il oublie tout simplement d'en parler. Si cet oubli est finalement levé par le monde des « lanceurs d'alerte » et que les impacts se transforment en risques (conséquences lourdes), l'amnésie est remplacée par une sorte d'« anesthésie » qui en minimise une partie des conséquences. Enfin, si le risque était effectivement avéré et que les conséquences se manifestent sous la forme de menaces (conséquences très lourdes), il s'agirait de tout miser sur l'« amnésie » en reformulant l'idée de départ, à savoir que, de toute manière, dans un contexte incertain, la catastrophe était impossible à prévoir.

En résumé, comme nous le soutenons depuis le début, il est probablement plus judicieux de fonder les politiques d'aménagement et les actions qui en découlent sur des convictions plutôt que sur des incertitudes. Même si elles mènent à des erreurs qui peuvent s'avérer sensiblement identiques, les convictions ont en effet l'avantage d'être construites sur une vision prospective ou sur une utopie raisonnée du monde, et de pouvoir de ce fait s'appuyer sur une formalisation et une modélisation conscientes des processus qui permettent de les mettre en œuvre. *In fine*, ces considérations posent la question fondamentale de la responsabilité des conséquences associées à chaque projet, responsabilité dont l'acceptation ne peut probablement se faire de manière sereine que si elle est traitée dans un contexte de concertation.

### 3.2. Concertation

La concertation apparaît comme l'une des solutions permettant actuellement de limiter l'incertitude et de renforcer les convictions. D'une part, elle est très utile pour recueillir les avis d'un public suffisamment diversifié pour diminuer sensiblement le risque de faire les mauvais choix. On dépasse donc ici la simple consultation publique,

dont le but n'est pas de co-construire un avenir ensemble, mais simplement de transmettre une information. D'autre part, la concertation permet également de partager les responsabilités en impliquant différents acteurs, et donc ne pas se retrouver seul à devoir assumer les conséquences d'un projet co-construit, en particulier quand ces dernières, non intentionnelles, se révèlent finalement néfastes. Dans ce contexte, la concertation peut alors s'appuyer sur une sorte de *médiation territoriale*, que J.E. Beuret (2003) définit de la façon suivante : « elle consiste à agir au sein d'un processus de concertation plus ou moins formalisé ou à susciter son émergence, impliquant plusieurs catégories d'acteurs porteurs de régimes, de justifications et de demandes divergentes concernant l'utilisation et le devenir des objets concernés, de façon à catalyser la construction d'accords formels ou tacites qui contribuent à une gestion concertée de biens ou d'espaces inscrits dans un territoire, sans en influencer le contenu ».

Techniquement, les débats inhérents à cet exercice sont généralement stimulés par les outils que manipule un *médiateur*. Ces outils peuvent prendre des formes diverses : une représentation cartographique et/ou schématique du territoire étudié, un dispositif socio-stratégique permettant d'effectuer un jeu de rôle (dans lequel chaque acteur prend une position qui n'est pas forcément la sienne dans la réalité), des éléments multimédia de prospective et d'animation des discussions (De Carlo et Choulet, 2003), etc. Au sein de cet ensemble, les Systèmes multi-agents sont notamment utilisés pour modéliser le comportement d'agents virtuels et construire des jeux de rôles. Les exemples rapportés par O. Barreteau (2003) montrent que ce type de simulations informatiques peut largement dépasser le monde de la recherche dans lequel ils ont été élaborés et offrir un cadre bien construit aux jeux de rôle, pour gérer des ressources renouvelables, aider à la négociation dans un contexte conflictuel, mettre en place un plan local d'urbanisme, etc. Mis au point dans ce contexte, le modèle Shadoc, par exemple, s'apparente à la *modélisation d'accompagnement*. Il a été utilisé pour intégrer des agents « paysan » et des agents « groupement », censés se concerter pour gérer une station de pompage et un mode de partage de l'eau au sein d'une maille hydraulique au Sénégal. À partir de cette base, le jeu de rôles consistait à accompagner les acteurs locaux dans le paramétrage du modèle et à y intégrer des règles collectives et individuelles, de manière à faire émerger un discours cohérent pour élaborer un schéma théorique de gestion des systèmes irrigués.

Au-delà des innovations techniques qui accompagnent aujourd'hui la concertation, l'exercice pose toutefois en lui-même des questions très anciennes sur la dimension démocratique de la prise de décision.

L'idée générale de la concertation rejoint en effet rapidement les principes de la démocratie participative et de la gouvernance locale, eux-mêmes de plus en plus intégrés aux processus de décision, notamment en aménagement. En France, c'est en tout cas le sens de la loi de 2002 relative à la « démocratie de proximité », qui institue les conseils de quartiers et les rend obligatoires pour les villes de plus de 80 000 habitants. Si elle rend indéniable l'immixtion de la concertation dans les affaires publiques, elle peut cependant conduire à un positionnement ambivalent, selon qu'on l'envisage de manière optimiste ou pessimiste.

Pour les optimistes, la gouvernance débouche naturellement sur une démocratie renforcée. Vecteur de pluralisme, elle doit en effet permettre de prendre de « meilleures » décisions, de fabriquer de « meilleurs » projets, mieux acceptés et plus faciles à mettre en œuvre car fondés sur une mise en commun et un partage des ressources, de l'expertise et des responsabilités. Dans ce sens, la concertation apparaît comme une force pour la légitimité des actions engagées. Pour les pessimistes, en revanche, la gouvernance s'associe fondamentalement à un instrument mis au service de la libéralisation des sociétés, et consiste essentiellement à limiter le rôle du monde politique en intégrant aux processus de décision des acteurs publics et privés dont les intérêts sont parfois contradictoires. De ce fait, l'hypocrisie est parfois de mise : faire croire à la société civile qu'elle participe, comme dans un grand jeu de communication dirigée. J. Donzelot et R. Epstein (2006) notent à ce sujet que cela peut conduire à une « prise en compte très à la marge de l'avis des habitants sur des problèmes sans rapport avec le projet [...] destinés plus à calmer le jobard [...] qu'à transformer ceux-ci en partenaires ».

Dans ce jeu inégal, il faut encore distinguer deux groupes. Pour s'intégrer au processus décisionnel, le premier a pris l'initiative de s'organiser : de nombreux dispositifs liés à la concertation sont désormais investis par des associations ou des collectifs qui, par le bénéfice de la rhétorique et souvent d'une formation politique, ont l'habitude de s'exprimer publiquement et maîtrisent les rouages administratifs qui permettent de le faire. Parallèlement, l'autre groupe se trouve nettement plus démuné : le monde familial, les jeunes, les personnes isolées ou peu actives dans le monde associatif, etc. représentent une très large majorité silencieuse qui peine à se mobiliser et qui n'exprime d'ailleurs souvent aucune volonté de le faire. Ainsi, la concertation peut finalement conduire à une prise de décision « à travers », voire « à rebours » des mandats politiques existants. Les satellites associatifs du monde politique y jouent le rôle d'un cheval de Troie pour investir chaque brèche susceptible de s'ouvrir. En même temps, ils montrent

qu'une connaissance lucide et bien exploitée du système permet de le contraindre en partie, ce qui devrait inviter chacun (du moins ceux qui en ont les moyens) à positionner ses pièces sur l'échiquier. La concertation agit alors au détriment de l'individu  $\lambda$  et illustre une situation vicieuse dans laquelle certaines voies comptent plus que d'autres et influencent les décisions en dehors de la représentativité des élus.

### 3.3. Évaluation

Comme l'indique C. Rolland-May (2000), la conscience croissante qu'un projet de territoire engage les élus et les décideurs impose désormais de généraliser les démarches d'évaluation. Cette nécessité est d'ailleurs d'autant plus forte et légitime que la sensibilité à un aménagement plus durable et à une meilleure gestion des ressources naturelles et énergétiques s'est aujourd'hui imposée comme un impératif pour l'aménagement du territoire. Dans ce contexte très large, l'évaluation concerne différents domaines et vise à atteindre une sorte d'*excellence* territoriale. Bien qu'elle soit souvent employée à tout va, la notion d'excellence reste toutefois floue : elle consiste globalement à faire ce qu'il y a de mieux, c'est-à-dire à atteindre le meilleur point d'arrivée compte tenu d'un point de départ donné. Les territoires n'étant pas nécessairement dans une situation d'égalité sociodémographique ou géographique (ils n'ont ni les mêmes opportunités ni les mêmes menaces au départ), c'est donc une notion fondamentalement relative, qui n'inclut pas tant une obligation de résultat qu'une obligation de moyens.

Pour F. Barral *et al.* (2010), il faudrait distinguer deux types d'excellence, objective et subjective. L'excellence dite objective renvoie directement au sens donné au projet à travers cinq dimensions complémentaires : la gouvernance (le projet est-il fondé sur une coopération entre les différentes parties prenantes ?), l'innovation (est-il novateur ?), l'irrigation (aura-t-il des répercussions plus larges que celles du territoire auquel il se destine ?), la spécification (s'appuie-t-il sur des atouts spécifiques au territoire ?) et la dynamique (les outils permettant de le conduire et de l'animer avec dynamisme sont-ils mobilisés ?). Parallèlement, l'excellence dite subjective contient les représentations que les décideurs se font de leurs actions et des conséquences (intentionnelles) qu'elles pourraient avoir. Elle se fonde essentiellement sur des références « internes » qui prennent en compte les succès et les échecs passés, et témoigne de ce fait de la dynamique du développement des territoires : est-elle excellente elle aussi, indépendamment de la qualité des projets élaborés ?

L'excellence devient donc un impératif de plus en plus incontournable, qui touche autant le domaine de l'économie que du social, du politique, de l'environnement ou de la santé. Dans chacun de ces domaines, les décideurs doivent donc se donner les moyens de montrer qu'ils pilotent « aux instruments » (et non pas « à vue »). Parmi ces moyens, les méthodes et les outils d'évaluation sont eux aussi devenus incontournables. Théoriquement, l'évaluation d'un projet d'aménagement consiste à apprécier globalement sa performance, à définir ses points clés, à simuler son évolution selon des contraintes définies, pour lui-même et par rapport à d'autres espaces de référence (Eckert, 1996). C'est donc l'analyse simultanée de la pertinence, de l'efficacité, de la cohérence, de la durabilité et de la viabilité des politiques d'aménagement qui permet d'améliorer la qualité des décisions prises et de mieux affecter les ressources disponibles (Destatte et Durance, 2009). Cette analyse nécessite de ce fait un dialogue entre tous les participants, qui doivent s'approprier eux-mêmes la réflexion sur les pratiques et les résultats, par le biais d'*indicateurs* définis dans ce but.

Dans un contexte d'excellence, un indicateur est une mesure concrète qui accompagne nécessairement l'évaluation. Il peut être simple quand il ne concerne qu'une seule information (nombre de nouveaux habitants d'une commune), ou bien composite s'il demande de combiner plusieurs informations simultanément pour produire une variable complexe, généralement plus conceptuelle (indice d'attractivité, indice de niveau de vie, de bien-être, etc.). Les indicateurs servent ainsi de base pour saisir les impacts d'une politique d'aménagement du territoire. Selon la Commission européenne (1999), il est important de les construire selon quatre contraintes : (i) ils doivent être suffisamment simples pour produire une information compréhensible et communicable; (ii) suffisamment pertinents pour refléter précisément ce qu'ils sont censés mesurer ; (iii) suffisamment fiables pour permettre une comparaison dans le temps (prospective) et dans l'espace (inégalités géographiques) ; et (iv) suffisamment sensibles pour révéler les modifications marginales, sans se concentrer uniquement sur des valeurs moyennes. La quadrature du cercle, en quelque sorte, qui devrait permettre de mesurer l'adéquation entre les objectifs initiaux et le résultat d'une politique d'aménagement sur le territoire, dans un esprit de gouvernance transparente.

Dans ce contexte, il n'y a rien donc rien d'étonnant à ce que l'évaluation apparaisse comme une opération compliquée dès lors qu'on la confronte au monde opérationnel. C. Rolland-May (2000) fait d'ailleurs remarquer à ce sujet qu'elle est finalement assez peu suivie et appliquée sur le terrain pour deux raisons inverses. D'une part, certaines

évaluations privilégient une vision trop qualitative des impacts de l'aménagement, tant sur le plan du choix des critères et des indicateurs retenus que sur celui des méthodes mobilisées pour les obtenir ; elles apparaissent souvent peu à même de traiter la complexité du sujet et ne correspondent finalement qu'à la rationalité limitée et à la subjectivité de chacun des évaluateurs, sans se confronter à la question de la reproductibilité des résultats obtenus, qui garantirait pourtant de pouvoir les comparer et les transposer à d'autres territoires. Parallèlement, d'autres évaluations se fondent *a contrario* exclusivement sur une approche quantitative. Elles se réduisent de ce fait souvent à l'élaboration de tableaux comptables construits dans une logique essentiellement économétrique. La confrontation simpliste des coûts et des bénéfices apparaît alors très réductrice par rapport à la complexité réelle des territoires, ce qui explique qu'elles restent théoriques ou techniques. Dans l'absolu, l'évaluation demanderait donc de coupler les approches qualitative et quantitative, ce qui apparaît également comme un objectif de la modélisation et de la simulation spatiales.

## Deuxième partie

### **Approches thématiques : les points de vue**

Cette deuxième partie est consacrée aux points de vue, c'est-à-dire à la position depuis laquelle on se place pour voir, examiner et éventuellement juger le monde dans lequel on vit. Ces points de vue doivent immédiatement être envisagés selon deux aspects. Le premier est celui du champ thématique à partir duquel on privilégie d'étudier un problème : l'étalement urbain, par exemple, est-il d'abord lié à une question d'offre et de demande de mobilité (point de vue de l'ingénierie des transports), d'occupation du sol (point de vue des géographes et des sciences environnementales) ou de rente foncière (point de vue des économistes) ? Le second aspect concerne la discipline à travers laquelle on envisage de traiter ce problème : pour lutter contre l'étalement, faut-il élaborer une solution économique (tarification, imposition), spatiale (plan réglementaire, de déplacement) ou psycho-sociale (sensibilisation, incitation) ? Ces exemples sont évidemment trop caricaturaux pour caractériser la réalité des concepts et des méthodes de l'aménagement du territoire, mais ils permettent d'illustrer la question des points de vue.

Ainsi, par exemple, les études environnementales (avec la gestion du risque ou du patrimoine) ont été parmi les premières à développer des outils conduisant à un aménagement opérationnel et réglementaire. Généralement fondés sur une approche très simple (application d'une distance autour des établissements à protéger ou à éviter), ils s'ouvrent aujourd'hui à des modélisations plus complexes, intégrant la propagation des incendies, du bruit ou des pollutions atmosphériques, mais sans tenir compte des dynamiques du monde environnant. Parallèlement, la modélisation économique de l'occupation du sol se fonde sur une analyse complètement différente, pour ne pas dire incompatible : elle se caractérise avant tout par le calcul économique. Depuis

le modèle précurseur de Thünen (1827) jusqu'à celui d'Alonso (1964) ou de la Nouvelle économie urbaine, le prix et la rentabilité des terrains font partie des explicatifs de la localisation des hommes et des activités, en lien avec les coûts des déplacements (souvent estimés par une simple ligne droite) entre le centre, les lieux de consommation, de travail et de loisirs. Initiée par les travaux de l'École de Chicago (1910-1935), la sociologie urbaine a également ouvert une voie parallèle. En s'intéressant à la répartition des groupes de populations (culturels et ethniques), indépendamment des prix fonciers, elle privilégie une logique écologique (symbiose, compétition, parasitisme) pour expliquer les phénomènes de ségrégation spatiale et de gentrification, en lien avec la composante démographique, le cycle de vie, la richesse et les catégories socio-professionnelles. Le monde ne se résume plus à des distances et des lignes droites, mais se déploie dans toute sa complexité sociale.

Malgré ces différences notables, ces approches disciplinaires partagent parfois des points de vue communs. Par exemple, l'accessibilité aux lieux et les interactions qu'ils entretiennent les uns avec les autres est étudiée à la fois par les économistes et les géographes selon une approche gravitaire héritée des travaux de Newton (attractivité entre les planètes). Depuis les travaux empiriques de Ravenstein (1885) jusqu'aux études plus actuelles sur la notion d'accessibilité généralisée, cette approche montre que la plupart des interactions diminuent en intensité en même temps qu'augmente la distance séparant les lieux qui les génèrent. Ce point de vue est aujourd'hui largement partagé. Partant de là, les modèles opérationnels de simulation de trafic dits à quatre étapes ont été mis au point pour accompagner la croissance des mobilités durant la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle : ils simulent le comportement des usagers (psychologie) et estiment le trafic qui en résulte (ingénierie des transports) à partir d'une confrontation entre l'offre et la demande de mobilité (économie), en tenant compte de la diversité et de la complexité des réseaux de communication (géographie). Plus que sur les différences, c'est avant tout sur ces points communs et ces passerelles disciplinaires que cette deuxième partie souhaite insister.

## CHAPITRE 4

# Économie et localisation

« Ne pas oublier que les villes sont dans la campagne »

Germain Nouveau

Expliquer le fonctionnement des territoires et des espaces régionaux par la question de la proximité et de la rente foncière constitue l'une des originalités de la théorie de la localisation. En s'intéressant à la position géographique des activités économiques, elle touche à la fois l'économie spatiale et la géographie économique avec un questionnaire unique : pourquoi les activités (agricoles, industrielles, tertiaires, etc.) se localisent-elles ici plutôt que là ? Ainsi, les travaux précurseurs de l'École allemande, du modèle de Thünen sur l'utilisation agricole du sol à celui de Weber sur les industries, ont tenté de répondre à cette question avec les outils de l'économie classique, mais en incluant l'espace géographique comme un élément fondamental pour en comprendre le fonctionnement. Pour les générations suivantes, ils posent ainsi les bases de la *Nouvelle économie urbaine* et des *Sciences régionales*, fondées par Walter Isard au milieu des années 1950. Ainsi, même si les Sciences régionales se sont avant tout construites comme une discipline parallèle à l'économie, elles possèdent désormais des liens forts avec la géographie et l'analyse spatiale. La dimension géographique des activités économiques n'y est plus seulement fondamentale : elle devient déterminante pour comprendre non seulement la localisation, mais également le comportement économique des hommes et des activités. Les références aux travaux de Christaller en sont probablement le meilleur exemple et témoignent de la difficulté actuelle de les séparer d'un point de vue disciplinaire. Parallèlement, l'approche comportementale, d'abord limitée à la stratégie des entreprises, n'a pas tardé à s'étendre aux individus. La confrontation de la théorie économique et des avancées de la psychologie a permis de la concevoir à l'aide de modèles permettant de mettre en avant l'incapacité des individus à faire des choix dans un contexte de rationalité parfaite. Beaucoup de choses ont déjà été écrites sur ces modèles et

ces théories. Il ne s'agit pas ici de les décrire dans le détail, mais de montrer comment, à partir d'approches disciplinaires et de points de vue différents, ils se retrouvent et se complètent dans un questionnement commun qui fonde le socle des méthodes et des outils de l'aménagement du territoire. L'approche socio-économique et la théorie de la localisation en constituent un point d'ancrage déterminant.

## 1. LES MODÈLES DE L'ÉCOLE ALLEMANDE

Pour comprendre les logiques sous-jacentes à l'occupation du sol et les possibilités d'aménagement du territoire qui en découlent, l'École dite allemande a tenté, dès le 19<sup>e</sup> siècle, de différencier l'espace pour y identifier une hiérarchie. À l'instar de la hiérarchie sociale qui définirait la place d'un individu dans la société par la fonction qu'il y occupe, il s'agit de déterminer le rang et le rôle de chaque lieu, ce rang et ce rôle étant considérés comme dépendants de la position géographique qu'ils occupent au sein de l'espace régional. Le concept de *hiérarchie spatiale* renvoie donc immédiatement aux notions d'ordre et de subordination, et occupe une position centrale : les lieux sont hiérarchisés selon leur taille, leur espacement relatif et les fonctions qu'ils concentrent. L'approche est certes simplificatrice ; elle repose sur une modélisation théorique avant tout. Mais elle offre une base pour la recherche en économie spatiale et en géographie, partant du principe très général qu'un lieu n'est choisi pour occuper une fonction que s'il offre un avantage économique et/ou spatial relatif.

### 1.1. L'occupation agricole

C'est sur cette base que, dès 1826, Johann Heinrich von Thünen (1783-1850) met au point un schéma qui lui permet de mieux comprendre la composition de l'espace agricole autour des villes. Issu de l'aristocratie, économiste de formation, il gère en fermage une propriété de 465 hectares à Tellow dans le Mecklembourg (Poméranie), territoire sur lequel il se fonde empiriquement pour construire sa théorie. Son postulat s'appuie sur la logique de maximisation des profits, logique selon laquelle chaque exploitant agricole cherche à augmenter le gain qu'il peut tirer de sa terre en optimisant simultanément l'utilisation des surfaces agricoles et le coût du transport des produits qui en sont issus. La distance entre un lieu de production et son marché occupe donc une position centrale de la théorie, et apparaît comme un déterminant de la rentabilité économique. Par voie de conséquence, la

distance détermine également l'occupation du sol et la hiérarchie des lieux : un coût de transport que la distance rendrait trop élevé annulerait irrémédiablement le bénéfice de toute production, même si cette dernière est excellente par ailleurs. Selon une logique qui découle tout autant du bon sens que de la théorie économique, il en résulte naturellement que les produits à faible coût de transport peuvent être localisés à une distance importante du marché qui permet de les écouler (donc, schématiquement, des villes), tandis que ceux dont le coût de transport est élevé doivent être localisés au plus proche de ce marché, dans des secteurs que la proximité aux centres urbains rend également plus chers d'un point de vue foncier. Cette double contrainte complexifie nettement les choix de localisation, qui résulteraient d'un compromis systématique entre les coûts des transports et les coûts fonciers. Cette logique, dans laquelle  $R$  est le potentiel offert par chaque lieu (ce que les économistes nomment généralement la « rente foncière »),  $r$  son rendement agricole,  $p$  le prix des produits sur le marché,  $c$  leur coût de production,  $T$  le coût de transport, et  $m$  la distance au marché, peut être formalisée de la manière suivante :

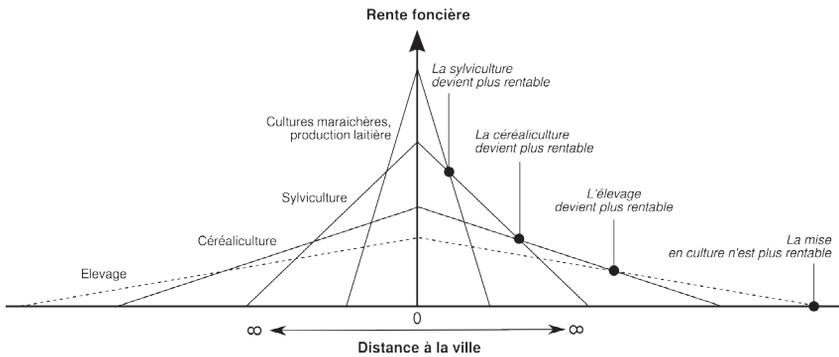
$$R = r(p - c) - r.T.m$$

La formalisation proposée ici décrit une forte dépendance entre le potentiel d'espaces agricoles différenciés au départ par leur rendement, la distance au marché et les coûts de transports associés. Selon l'analyse de Thünen, l'utilisation du sol qui en résulte se décompose théoriquement en quatre couronnes concentriques juxtaposées et localisées à une distance croissante du centre urbain : (i) la zone de maraîchage et d'élevage laitier, (ii) la couronne d'exploitation du bois de chauffage, (iii) la culture de céréales en plein champ et (iv) l'élevage extensif (figure 4.1). Le modèle introduit donc une idée qui reste fondatrice pour les géographes comme pour les économistes : les profits sont en partie déterminés par la localisation spatiale des activités, et la distance influence fortement l'occupation du sol. La ville devient de ce fait un élément essentiel de l'analyse économique et spatiale, ce qui permet aujourd'hui encore de considérer le modèle de Thünen comme précurseur pour modéliser le rôle et l'influence des espaces urbain dans l'aménagement des territoires.

Avec plus de 150 ans d'âge, on peut comprendre que le modèle de Thünen ait perdu une partie de son actualité : l'absence de considération de moyens de transport différenciés incluant la navigation, le rail et actuellement la route, les nouvelles logiques de l'industrie, le changement des mentalités dans les secteurs productifs, etc., sont

autant de facteurs qui ne permettent plus de le considérer comme rééllement pertinent aujourd'hui. Cependant le schéma concentrique des localisations qu'il propose n'en reste pas moins au cœur de l'analyse économique néoclassique de l'occupation du sol urbain, depuis les travaux de Marshall (1890) jusqu'à ceux d'Alonso (1964). Le modèle de Thünen constitue de ce fait un des fondements de la Nouvelle économie urbaine et illustre une façon particulière de concevoir les sciences régionales et l'aménagement du territoire, à la fois simple et générale (Huriot, 1998) que l'on retrouve également dans les propositions de Burgess et de l'École de Chicago.

Figure. 4.1  
**Le modèle de Thünen**



Le modèle de Thünen est précurseur pour comprendre les logiques agricoles, la rente foncière et l'influence des villes. Il décrit la dépendance entre le rendement des productions, la distance au marché et les coûts de transports. L'occupation du sol qui en résulte se décompose en quatre couronnes théoriques : (i) le maraîchage et l'élevage (ii), l'exploitation du bois de chauffage, (iii) la culture de céréales en plein champ et (iv) l'élevage extensif.

## 1.2. Les localisations industrielles

La théorie d'Alfred Weber (1868-1958) constitue également une base fondamentale pour comprendre la localisation des activités économiques, mais elle porte plus exclusivement sur les logiques du secteur industriel. Dans sa théorie de la localisation des industries, publiée en 1909 (*Über den Standort der Industrien*) et traduite en anglais en 1929, Weber tente de faire émerger un ordre à partir d'une organisation chaotique en apparence : celle des industries qui, à cette époque, lui apparaissaient à juste titre comme la substance des nouvelles agglomérations urbaines. Comme Thünen pour le monde agricole, il entreprend alors de déduire des lois de localisation à partir d'un jeu d'hypothèses de départ simplifiées : une plaine isotrope et des coûts de transport qui servent de base explicative générale. Toutefois, à la différence de

Thünen qui cherche à qualifier et à quantifier l'intérêt de chaque espace et de chaque lieu (quelle est la meilleure localisation ?), Weber s'intéresse plus essentiellement à l'intérêt des entreprises (quels sont les meilleurs gains et les coûts de production minimums ?).

Dans ce contexte théorique, Weber considère les matières premières comme réparties de manière non uniforme dans l'espace (tout n'est pas partout), ce qui apparaît plus conforme à la réalité que dans le modèle de Thünen. Il explique ensuite la localisation des activités industrielles par trois facteurs économiques : les coûts de transport, le coût du travail et les économies d'agglomérations. Au sein de ces dernières, Weber identifie également des économies dites de « désagglomération » : alors que les économies d'agglomération résument les gains engendrés par la localisation de plusieurs unités de production au même endroit, les économies de « désagglomération » traduisent l'idée que les bénéfices liés à la proximité diminuent nécessairement lorsque la densité provoque une surenchère foncière trop importante pour que les industries se localisent toutes au même endroit. L'optimisation de l'ensemble de ces facteurs est alors sous-tendue par plusieurs hypothèses : l'énergie, les matières premières et l'eau ne sont exploitables que dans certaines parties du territoire ; le travail est immobile, illimité et les salaires sont fixes ; les conditions de transport, la concurrence, la géographie physique et le système socio-économique sont uniformes. Dans ce modèle simplifié, le coût des matières premières varie donc essentiellement en fonction de leur nature et des difficultés que l'on peut rencontrer à les extraire. Weber propose alors de reporter cette variation sur les coûts de leur transport. Ces derniers étant isotropes, ils varient uniquement en fonction de la distance et peuvent être représentés mathématiquement par des *isodapanes*. Graphiquement, ces isodapanes permettent alors de cartographier simultanément les coûts du transport des matières premières vers l'industrie (entrée), et celui des produits finis vers le marché (sortie). Les facteurs régionaux explicatifs des localisations industrielles s'en trouvent réduits à deux éléments : le transport et le travail. Concrètement, l'analyse de Weber intègre donc deux éléments successifs pour comprendre et réfléchir à la localisation optimale des industries : (i) l'identification des lieux (différenciés selon leur intérêt en termes de matières premières et de marché du travail) où les coûts de transport sont les plus faibles, et (ii) une discussion sur les circonstances pour lesquelles la production sera attirée au-delà des limites représentées par les isodapanes, et qui s'expliquent en partie par les avantages d'un coût du travail potentiellement moins cher, ou par des économies liées au processus d'agglomération.

Un grand nombre d'études ont appliqué les éléments de la théorie de Weber pour étudier l'industrie et les activités économiques à l'époque contemporaine. Wilfred Smith (1949), par exemple, a testé certaines hypothèses de Weber sur l'industrie du sucre en Angleterre et au Pays de Galles, montrant que la production finale correspond globalement à un huitième du poids des matériaux (betterave, charbon et chaux) utilisé dans le processus de transformation. Comme on pouvait s'y attendre, il confirme que la localisation des usines de sucre se situe à proximité immédiate des champs de betteraves les plus importants. Ce résultat peut certes sembler trivial, mais il a l'avantage de combiner ce qui semble découler du bon sens à une théorie qui constitue l'une des premières analyses explicatives pour comprendre la logique des localisations industrielles. Ainsi, malgré des résultats thématiques relativement faibles, répondant de surcroît à une logique d'équilibre partiel simpliste et probablement mal intégrée dans le comportement réel des entreprises, l'approche weberienne reste incontournable, notamment si elle s'accompagne de données économiques et d'une analyse plus fine des coûts du transport (Isard, 1956).

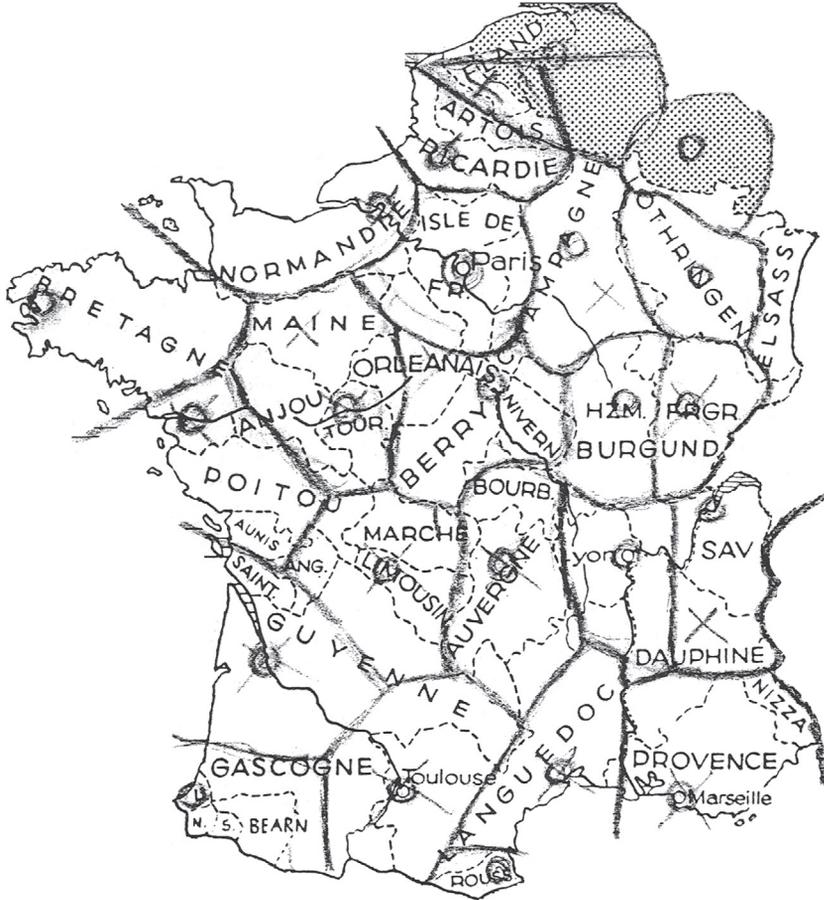
Aujourd'hui, les critiques du modèle de Weber sont à peu près proportionnelles aux évolutions et aux changements fondamentaux qui sont apparus dans le monde industriel au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Comme le fait remarquer R. Camagni (1996), le modèle reflète un processus d'industrialisation et d'urbanisation propre au 19<sup>e</sup> siècle qui résume correctement le principe des économies d'échelle spécifiques à cette époque. Mais il apparaît incapable d'intégrer les synergies intersectorielles qui motivent actuellement les choix de localisation, et de prendre en compte certaines dynamiques économiques, notamment celles de l'innovation, dont les analyses de Gibrat (1931) ou de Hägerstrand (1952) ont montré qu'elles pouvaient s'avérer fondamentales d'un point de vue spatial.

### 1.3. Les biens et les services

Près d'un siècle après les travaux de Weber, Walter Christaller (1893-1969) fournit de nouveaux arguments pour qualifier le rôle des villes dans l'organisation des espaces régionaux en publiant en 1933 une thèse qui ne sera véritablement reconnue que dans les années 1960 : *Die zentrale Orte in Süddeutschland*, traduite en anglais sous le titre *Central Places in Southern Germany* (1966). Christaller apparaît de ce fait comme l'un des premiers géographes à contribuer directement à la théorie de la localisation de l'économie spatiale. En 1968, il déclarera d'ailleurs s'être largement inspiré de la théorie économique et des travaux de Weber, malgré une assise fondamentalement géographique qui s'inscrit dans la

lignée de son directeur de thèse, Robert Gradmann (1865-1950), qui s'était lui-même intéressé à l'étude régionale de l'Allemagne du Sud dans la tradition idéographique allemande des *Ländeskunde*.

Fig. 4.2  
**Proposition de découpage régional  
 par Christaller à partir de la Théorie des lieux centraux**



La forme, la taille et la répartition des régions sont fonction du niveau de service et du type de commerces qu'elles proposent à l'espace qu'elles englobent et qu'elles structurent de manière hiérarchique. Avec toutes les hypothèses qu'il implique, le modèle est ici utilisé pour une délimitation des unités administratives à l'échelle d'un pays.

Source : Legendre et al., 2007

Le modèle de W. Christaller est fondé sur l'analyse de la hiérarchie des villes en fonction du type de commerces et de services qu'elles regroupent. À partir d'un espace théorique homogène au sein duquel la population se répartit de manière uniforme et adopte un comportement

rationnel, il suppose que la structure urbaine d'un territoire s'organise de manière hiérarchique. De la grande ville-centre, métropole régionale offrant tous les services et commerces possibles, jusqu'au village n'offrant que des aménités primaires de proximité, sept niveaux de villes proposent différents types de services, et structurent l'espace sous la forme d'hexagones emboîtés selon leur niveau d'attractivité. Reposant sur des hypothèses assez simplistes et difficilement transposables à la réalité des territoires, il permet néanmoins de mieux cerner l'organisation urbaine et les localisations spatiales induites par l'accessibilité et la distance aux aménités.

En 1940, August Lösch (1906-1945) développe une théorie à peu près similaire à l'université de Kiel (Schleswig-Holstein). Pour analyser la hiérarchie urbaine, il part du bas de l'échelle, donc d'une position inverse à celle de Christaller : c'est à partir des éléments de production les plus isolés (qui correspondent globalement à la structure de fermes en milieu rural), régulièrement espacés en quinconce sur un plan, qu'il reconstruit une structure spatiale conduisant à l'identification des grandes villes au sommet de la hiérarchie. Il met alors en relief une différenciation de l'espace en secteurs homogènes (influencé notamment par les industries) qui reproduit une spécialisation des territoires concernés. Il prolonge de ce fait les travaux de Weber, qui identifiaient trois facteurs pour expliquer la localisation industrielle : le coût de transport, le coût de la main-d'œuvre et les économies d'agglomération. Le modèle qui en découle conforte globalement la théorie des lieux centraux, même s'il se fonde sur des postulats de base différents. En effet, contrairement au modèle de Christaller, les aires d'influences des hexagones de Lösch ne sont pas toutes équivalentes : elles dépendent de la distance entre centres et s'assimilent géographiquement à des formes plus complexes. Ces centres font par ailleurs l'objet de spécialisations qui les divisent en secteurs riches ou défavorisés sur le plan des activités économiques. Ici aussi, les aires d'influences des lieux centraux sont donc différenciées selon leur hiérarchie et la distance qui les sépare.

Contrairement aux travaux de Lösch, qui restent actuellement encore relativement confidentiels, la *théorie des lieux centraux* énoncée par Christaller est devenue incontournable pour les géographes comme pour les économistes. Mais elle n'a pas été immédiatement reconnue comme une avancée fondamentale au moment de sa parution dans les années 1930 : quand Carl Troll (fondateur de la revue *Erdkunde* en 1947) passe en revue les avancées de la géographie allemande dans l'entre-deux-guerres, il ne mentionne pas la théorie des lieux centraux ; Christaller n'a par ailleurs jamais occupé de poste officiel à l'université. En réalité, la théorie de Christaller ne connaîtra sa véritable notoriété

qu'à partir du moment où, en Amérique du Nord et en Suède, on se rend compte qu'elle peut être appliquée à l'aménagement du territoire, notamment pour localiser des nouveaux lieux centraux et des établissements de services, ou pour délimiter de nouvelles unités administratives (Holt-Jensen, 2009). Aux États-Unis, E. Ullman (1941) sera l'un des premiers à porter attention aux travaux de Christaller, au moment où les géographes américains développent les premiers modèles théoriques de villes et de structures urbaines, qu'ils partageront par la suite avec les économistes et les sociologues urbains (Harris et Ullman, 1945). Cette re-découverte est en partie liée à l'influence politique que la théorie des lieux centraux a pu avoir sur les projets d'aménagement du Troisième Reich, qui prévoyaient de faire correspondre l'espace de la Pologne ou de la Hollande avec des hexagones bien dessinés. Fondée sur un principe hiérarchique identique, la carte de découpage régional de l'espace français proposée par W. Christaller à l'orée de la Deuxième guerre mondiale (figure 4.2) témoigne cependant de sa dimension fondamentalement pratique, qui propose un outil pour les politiques opérationnelles d'aménagement et qui, au-delà de sa dimension théorique, peut s'adapter à la réalité des contextes géographiques.

Ainsi, avec les travaux de Lösch et de Christaller, l'accélération de ces approches théoriques, portées notamment par E.A. Ackerman (1958) qui invitait à une analyse plus systématique et quantitative, s'est trouvée facilitée par des géographes venant des sciences dites exactes, en particulier la physique et les statistiques, et/ou qui possédaient certaines connaissances d'économie théorique. Durant les années 1950, la frontière entre économie et géographie était devenue très productive et inspirait à la fois de nouvelles idées et de nouvelles méthodes. On a vu s'y développer des séminaires et des études de géographie urbaine et économique, dans lesquelles la théorie de la localisation était ré-introduite à partir des concepts de l'économie, associés à des méthodes mathématiques et des procédures statistiques, notamment à Seattle, d'où sont issus B. Berry, W. Bunge ou R. Morille, qui développeront la géographie théorique à l'université de Chicago. La théorie des lieux centraux constitue de ce fait un apport fondamental pour les modèles qui seront développés par l'École américaine.

## 2. LES THÉORIES DE L'ÉCOLE AMÉRICAINE

Comme l'École allemande, ce que nous appelons ici l'École américaine n'est pas une école à proprement parler. Elle correspond plutôt à une effervescence d'innovations scientifiques situées dans le même

espace-temps, celui des États-Unis des années 1950 et 1960. Dans ce contexte spécifique, nous l'envisageons à travers deux éléments différents : la loi rang-taille qui motive encore de nombreuses recherches actuelles, et la Nouvelle économie urbaine qui a contribué à la mise au point des premiers modèles LUTI à partir de la théorie dite de la base.

### 2.1. La loi rang-taille

La *loi rang-taille* apparaît comme un cas un peu particulier dans la mesure où elle ne trouve ses sources ni dans l'économie, ni dans la géographie. Elle est énoncée par George Kingsley Zipf (1902-1950) en 1949, à partir d'une étude des occurrences statistiques fondée sur la loi de Pareto en linguistique. À l'issue de la Deuxième guerre mondiale, Zipf étend néanmoins son utilisation à de nombreux domaines, notamment le système de peuplement et la répartition des villes, avant que la loi ne soit généralisée par B. Mandelbrot (1957) à partir de la *théorie de l'information* de C.E. Shannon (1948), ce qui en augmente considérablement les possibilités applicatives. À la suite des travaux précurseurs de H. Simon (1955) et de M.J. Beckmann (1958), la loi rang-taille suscite alors un grand intérêt dans les sciences régionales, et contribuera à un renouveau rapide des travaux de recherche sur la hiérarchie urbaine à partir des années 1980 (Shaffar, 2009). Plusieurs travaux et débats (Nitsch, 2005 ; Pumain, 2012) montrent que son application à l'étude des systèmes de villes reste toujours d'actualité et qu'elle constitue aujourd'hui encore un moyen pertinent d'explorer les hiérarchies urbaines.

Concrètement, la loi de Zipf peut être considérée comme une généralisation empirique selon laquelle la taille des villes serait distribuée de manière inverse à leur rang, selon une répartition plus ou moins indépendante de l'espace et du temps. Elle est bien résumée par une figure que l'on compare à une droite théorique. Pour construire cette figure, la taille des villes (généralement résumée par leur population) est représentée sur l'ordonnée d'un graphique bilogarithmique, et leur rang (la plus peuplée occupe le rang 1, la moins peuplée le dernier rang) sur l'abscisse de ce même graphique. En apparence, la loi de Zipf pourrait donc être assimilée à une construction tautologique : comparer la taille et le rang d'une ville  $i$  revient à comparer deux fois la même chose. Dans la réalité, l'analyse est plus subtile, dans la mesure où la formalisation proposée par Zipf ne vise pas à calculer la corrélation entre ces deux jeux de données, mais à estimer le paramètre  $\alpha$  (la pente de la droite) qui mesure le degré d'inégalité des villes au sein du système étudié :

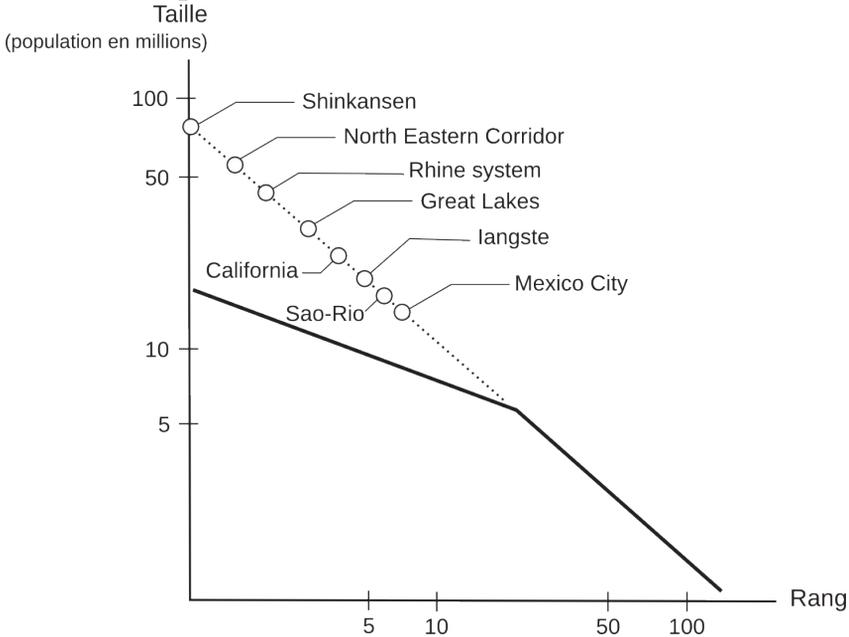
$$\log P_i = \log K - \alpha \log R_i$$

La valeur  $K$  étant une constante proche de la taille de la plus grande ville (une sorte d'artifice technique permettant de s'assurer que la plus grande ville corresponde bien au premier rang), c'est la valeur de  $\alpha$  qui apparaît en effet fondamentale : plus elle est élevée, plus les inégalités sont importantes. Si le coefficient est inférieur à 1, l'effet d'agglomération est supérieur à ce que prévoit la « normale », et les grandes villes ont tendance à être un peu trop grandes. En revanche, si  $\alpha$  est inférieur à 1, la répartition spatiale apparaît plus polycentrique, avec un nombre important de villes de taille moyenne. L'ingénieur des transports C. Marchetti (1991) a proposé une interprétation intéressante de cette répartition à partir d'une étude sur les plus grandes villes mondiales. En les confrontant à la droite de Zipf, il montre en effet que les plus grandes métropoles ne sont « théoriquement » pas assez grandes. En revanche, si l'on somme la population des grandes villes reliées par un système de transport qui les rend accessibles en moins de trente minutes les unes des autres, les agglomérats résultant se positionnent presque parfaitement sur la droite (figure 4.3). Il en conclut que les grandes villes ne peuvent plus être considérées comme des entités autonomes, et qu'elles doivent être redéfinies à travers les « corridors » de transport rapide qui les relient. La publication de Marchetti est d'autant plus géniale qu'elle vise à plaider pour une liaison fixe (pont ou tunnel) au niveau du détroit de Gibraltar, liaison qui servirait d'infrastructure aux moyens de transport de demain (capsules sous vide d'air, telles qu'elles sont aujourd'hui testées dans le cadre du projet américain *Hyperloop*), et qui pourraient réunir Paris et les villes méditerranéennes du nord de l'Afrique dans une même agglomération connectée par la grande vitesse.

L'intérêt de la loi de Zipf est donc double. D'une part, elle permet de résumer la distribution des tailles des villes en une seule valeur (le coefficient  $\alpha$  de hiérarchisation), et donc de mieux comprendre cette hiérarchie des systèmes urbains que P. Krugman a tantôt qualifiée de « mystérieuse ». D'autre part, elle contribue à une description universaliste des systèmes complexes au même titre que les modèles gravitaires : dans la mesure où la loi de Zipf est actuellement utilisée autant pour décrire la répartition hiérarchique des planètes dans la galaxie que celle des espèces vivantes dans un écosystème, ou encore les structures d'un texte en linguistique, elle apparaît comme une excellente passerelle interdisciplinaire, et invite à mettre en synergie les concepts et les outils élaborés dans différents domaines, notamment parmi les sciences dites exactes. Cela étant, pour chacune de ces disciplines, l'intérêt de la « loi » ne se situe pas tant dans la description de la hiérarchie étudiée que dans l'identification des facteurs qui contribuent à

créer cette hiérarchie. Même s'ils sont descriptibles par une approche formelle commune, ces facteurs peuvent être très différents selon les disciplines et les systèmes étudiés.

Figure 4.3  
Interprétation de la loi rang-taille  
à partir d'une étude sur les villes mondiales



C. Marchetti (1991) montre que les plus grandes métropoles ne sont « théoriquement » pas assez grandes. En revanche, si l'on somme la population des villes reliées par un système de transport qui les rend accessibles en moins de trente minutes les unes des autres, les agglomérats résultant se positionnent presque parfaitement sur la droite théorique, selon une logique qui renvoie à la notion de conurbation ou de corridor urbain.

En géographie et en aménagement, les facteurs qui expliquent la hiérarchie des villes sont également ceux qui expliquent les inégalités spatiales en termes de démographie, de densité de peuplement, d'accumulation de fonctions et de richesses. D. Pumain (2012) propose par exemple de les associer à la théorie de la division sociale, aux cycles d'innovation économique urbains et au processus de diffusion hiérarchique des innovations (selon le cadre théorique avancé par Hägerstrand) : l'innovation, d'abord captée par les grandes villes (coefficient  $\alpha > 1$ ), se diffuse ensuite dans l'ensemble du système urbain proportionnellement à la population des villes ( $\alpha \approx 1$ ), sans parvenir à atteindre les villes en « fin de cycle » ( $\alpha < 1$ ). Au moment où la diffusion des innovations atteint les villes moyennes (dans lesquelles

le développement est moins coûteux et le travail moins qualifié), les grandes villes ont quant à elles déjà opéré une substitution vers des activités encore plus innovantes.

Fondamentalement, la loi rang-taille reste donc difficile à interpréter. On ne sait pas véritablement pourquoi cette loi existe, ni ce à quoi elle correspond exactement, ce qui limite très nettement sa portée pour des applications concrètes en aménagement du territoire. Son principe n'est toutefois pas inutile : il permet de comparer les réseaux de villes de différentes régions et de différentes époques, et de repérer les anomalies qui y prennent place, anomalies pour lesquelles il n'est pas toujours impossible de trouver une hypothèse explicative. Selon D. Pumain (2012), ce problème d'interprétation est d'ailleurs un faux problème. En effet, les interrogations que pose la loi de Zipf sont fondamentalement comparables à celles que pose n'importe quelle distribution statistique dite *normale*. Pourtant, en statistique, « personne n'éprouve le besoin de construire une théorie afin d'expliquer pourquoi une distribution est gaussienne, « normale » [...] on se contente généralement d'invoquer la *loi des grands nombres* ». Cela n'empêche en rien de l'utiliser comme une référence ou un point de comparaison auquel des séries d'observations peuvent être confrontées, dans l'objectif de « mieux comprendre la géodiversité des systèmes de peuplement ».

## 2.2. La Nouvelle économie urbaine

Au milieu des années 1960, les travaux de William Alonso (1933-1999) vont contribuer à relancer la recherche sur les logiques d'organisation des espaces urbains à partir de l'analyse des localisations résidentielles. Dans une logique micro-économique néo-classique, l'idée de départ consiste à transposer au monde des villes le modèle mis au point par Thünen pour l'étude des espaces agricoles et ruraux, en conservant l'idée que l'utilisation du sol est liée à la question de la rente foncière : l'occupation du sol serait déterminée par le prix maximum qu'un individu accepte de payer pour occuper chaque lieu. Dans le modèle publié par Alonso (1964), un système de rente par enchère (*bid rent theory*) permet alors de déterminer l'évolution des courbes de la rente foncière en fonction des facteurs qui caractérisent l'occupation du sol. Avec les apports successifs d'Edwin Mills (1967) et de Richard Muth (1969), l'École dite de la *Nouvelle économie urbaine* développe ainsi dans les années 1960 et 1970 des outils théoriques intégrant la question de la localisation et des choix des ménages dans l'étude de la structure et de l'évolution des espaces urbains.

Dans le modèle original d'Alonso, la forme de la ville est très schématique : situé dans une plaine homogène et géographiquement non contrainte, l'espace urbain s'organise de manière circulaire et regroupe l'ensemble des emplois dans un CBD (*Central Business District*) localisé au centre, selon une configuration typiquement américaine. Au sein de cette ville, les différents lieux ne sont considérés que par rapport à leur distance euclidienne au centre, et le prix des terrains diminue au fur et à mesure que l'on s'en éloigne (les aménités présentes en dehors du centre sont supposées équivalentes en tous points). Le modèle d'Alonso introduit donc explicitement l'espace géographique dans la problématique de l'aménagement urbain, enrichissant de ce point de vue les recherches urbaines strictement économiques réalisées par ailleurs. Les déplacements entre ces lieux ne sont possibles qu'entre le domicile et le travail, et ne s'effectuent qu'en automobile. Parallèlement, les activités et les individus susceptibles d'intervenir dans le modèle d'Alonso sont également simplifiés : la production de biens se situe dans le CBD, et les logements, « auto-produits » par les habitants, ne constituent pas une activité économique en tant que telle (hypothèse qui sera ensuite abandonnée par Mills et Muth). Dans ce contexte, les choix de localisation des individus sont déterminés par l'*utilité* que cette localisation leur procure, utilité qui doit être maximisée sous la contrainte de leurs revenus et des prix fonciers. L'objectif consiste alors à atteindre un « équilibre spatial des ménages », équilibre à partir duquel plus aucun agent ne peut améliorer l'utilité qu'il tire de sa localisation. Par arbitrage entre le prix de la mobilité pour l'accès au centre et le prix d'occupation du sol qui décroît quand on s'en éloigne, chaque ménage peut donc se localiser « en un lieu où, d'une part, la fonction de prix du sol est décroissante et où, d'autre part, le gain sur la dépense en logement procuré par un déplacement marginal de localisation excédera la dépense en transport supplémentaire » (Lefevre, 2007).

Le modèle est donc simpliste, mais il introduit le concept clé de l'influence de la localisation sur la valeur foncière, et plus généralement sur l'ensemble de la contrainte budgétaire d'un ménage ou d'une activité. Durant les années 1970, la Nouvelle économie urbaine complexifiera largement ce modèle de base. La question des transports, par exemple, sera complétée par l'intégration de déplacements en anneaux périphériques, avec une vitesse possiblement plus importante que celle des axes radiaux. De même, alors qu'Alonso ne prend que l'automobile en compte, les années 1970 voient apparaître des hypothèses liées à la complémentarité des modes de transports (Capozza, 1973). Cette approche multimodale contribuera à mettre en avant l'idée d'opposition théorique entre une « ville routière », étalée et

périurbanisée, et une « ville métro », plus dense et concentrée autour du CBD avec des trajets moins coûteux. Enfin, la question de la congestion du trafic sera également intégrée comme un paramètre du coût de transport (Solow, 1972), ce qui conduira à modifier en substance le profil des gradients de rente d'enchère (les nuisances de la congestion influençant le marché foncier et résidentiel). De son côté, R. Muth (1969) modifie le modèle plus en profondeur, d'abord en rejetant l'hypothèse de préférence pour la centralité, et surtout, en intégrant la problématique de la demande de logements et de services résidentiels, qui deviennent des critères de choix de localisation à part entière.

Au regard du fonctionnement des systèmes urbains, les hypothèses de la Nouvelle économie urbaine ne sont donc pas irréalistes, mais elles réduisent les possibilités de différenciation des lieux à un facteur quasi unique : la distance au centre, représentée par une droite. La localisation des ménages et des activités est réduite à un contexte unidimensionnel, monocentrique et isotrope, mais cette réduction apparaît suffisante pour résumer la structure et l'évolution des villes, selon une approche formelle qui servira par la suite de base à de nombreux modèles d'aménagement urbain. L'ensemble permet de nombreuses analyses fondées sur une augmentation des revenus, une croissance de la population ou une amélioration du système de transport. Ils montrent par exemple que la croissance démographique conduit à une augmentation des densités et à une hausse généralisée de la rente foncière, qu'elle déplace la frontière de la ville en créant une concurrence entre l'espace urbain et l'espace rural, etc. Parallèlement, une amélioration des moyens de transports est susceptible d'améliorer l'utilité du déplacement en diminuant les désagréments liés à la congestion, ou bien de diminuer le coût de transport : dans les deux cas, la courbe d'enchère diminue, produisant une diminution des prix fonciers qui entraîne une augmentation de la demande foncière, augmentation qui conduit à une baisse des prix dans un cercle de diamètre restreint et à une croissance au-delà. D'un point de vue social, une différenciation des revenus par catégories de population permet d'expliquer le processus de *suburbanisation*, dans lequel les ménages les plus aisés se localisent dans les banlieues lointaines, alors que le centre est peuplé par des populations à faibles revenus, dans des logements dégradés, etc.

### 2.3. La théorie de la base

Au sein de l'approche économique néo-classique, la théorie de la base, initiée par H. Hoyt en 1954, permet également d'étudier l'occupation du sol, en particulier par l'application que propose le modèle

d'Ira S. Lowry (1964). Contrairement au modèle micro-économique d'Alonso, elle s'inscrit dans une démarche *macro*, au sein de laquelle l'organisation des villes serait une résultante des relations entre deux catégories d'activités : celles qui sont engendrées par la demande externe à la ville (activités dites basiques), et celles qui répondent à ses besoins internes (activités dites induites). Les activités basiques définissent la spécialisation de la ville, son rôle et ses caractéristiques au sein d'un espace macro-économique ; elles dépendent de la demande extérieure et déterminent la croissance et le dynamisme urbains en créant des emplois, une augmentation des revenus et, indirectement, une augmentation des activités nécessaires à la subsistance urbaine (activités induites). Les activités induites répondent quant à elles à la demande interne de la population et sont fortement dépendantes des activités basiques. Une expression simple du modèle peut prendre la forme suivante :

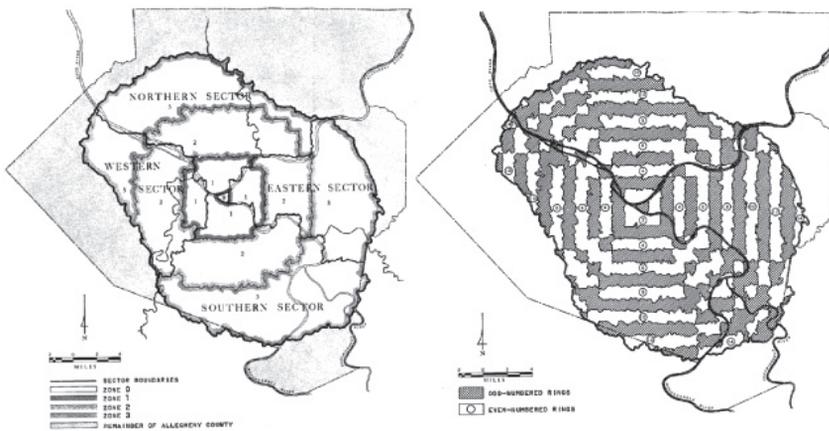
$$P = \left(\frac{m}{a}\right)B$$

Ici, la population urbaine totale  $P$  est déterminée par les activités basiques  $B$ , pondérées par un coefficient intégrant le taux d'activité  $a$  et une variable  $m$  multiplicative de l'emploi total. En résumé, cette formalisation met donc en évidence une corrélation entre le nombre d'emplois et la population d'une ville, déterminée principalement par les emplois du secteur industriel, ce qui permet de prévoir les évolutions démographiques à partir de la variation (supposée connue) des emplois basiques. D'un point de vue théorique, elle a également l'avantage d'introduire l'influence des activités régionales (monde « extérieur ») sur le développement urbain, et donc la place qu'occupe la ville dans un système macro-économique plus large.

Dans le modèle de Lowry, la théorie de la base est utilisée pour simuler la structure de l'utilisation du sol à un instant  $t$ , à partir de la localisation des activités basiques (essentiellement industrielles) dans l'espace urbain, et des distances ou des temps de transport entre les différents secteurs de la ville. La notion de choix de localisation y est introduite en considérant que la localisation résidentielle est déterminée par l'accessibilité aux lieux de travail (sans prise en compte du coût du sol) et que la localisation des activités de services est fonction de l'accessibilité des clients potentiels. Le principe d'interaction spatiale (modèle gravitaire de potentiel) est également utilisé pour localiser la population autour des lieux de travail (modèle résidentiel) et l'emploi de service autour des espaces résidentiels et des lieux de travail (modèle de localisation des services). Pour ce faire, l'espace

occupé par les activités est défini au sein d'unités agrégées en zones. À partir de ces zones, des flux sont générés par les agrégats d'activités qui interagissent les uns avec les autres, avec une intensité susceptible d'influencer la construction d'infrastructures nouvelles pour relier les zones entre elles. Ce principe d'interactions spatiales fondées sur la modélisation gravitaire permet ainsi de mesurer la capacité des régions à attirer ou à générer des déplacements (Deymier et Nicolas, 2005), même s'il trouve ses limites dans le cadre d'une macro-analyse qui ne prend probablement pas suffisamment en compte les spécificités comportementales des individus.

Figure 4.4  
**Le modèle de Lowry**



Le modèle de Lowry est souvent présenté comme le précurseur des modèles LUTI, prenant explicitement en compte les problématiques du développement résidentiel et des mobilités. Il présente également l'avantage de considérer l'espace géographique en deux dimensions, dans une juxtaposition de secteurs (à gauche) et de couronnes radio-concentriques (à droite) qui renouvellent l'approche classique de l'économétrie spatiale.

Source : Lowry, 1964

En couplant la théorie économique, le choix de localisation des activités, la modélisation gravitaire, l'influence des temps de transport et les relations entre une ville et son espace régional, la théorie de la base et le modèle de Lowry introduisent la première génération des modèles statiques représentant une image instantanée des espaces urbains : les emplois basiques sont figés dans leur localisation et leurs caractéristiques, de même que les surfaces de sols qui leur sont destinées. Tout est basé sur les informations comprises dans les déplacements de zone à zone à un moment donné (matrice origine-destination), ce qui confirme le caractère totalement statique du modèle, malgré une procédure itérative dont Lowry estime qu'elle reconstitue le processus de

développement urbain. Le modèle de Lowry ouvre ainsi la voie au développement de modèles d'interactions plus complexes qui marqueront les débuts des modèles LUTI. Les extensions dont il fera l'objet donneront en effet naissance à divers modèles d'interaction de transport et d'usage des sols, dont le modèle Itlup (Putman, 1983) est un bon exemple.

### 3. LES THÉORIES SOCIO-ÉCONOMIQUES

Comme le montre la théorie de la base, les modèles d'interaction spatiale intégrés dans les premiers modèles économiques de localisation des activités pâtissent d'un certain nombre de faiblesses théoriques et conceptuelles, notamment parce qu'ils prennent peu en compte (voire pas du tout) le comportement des individus qui habitent, circulent et investissent sur les territoires modélisés. Pour pallier ce manque, durant les années 1970, le développement d'approches plus interactives permettra d'intégrer une dimension comportementale plus fine en lien avec la notion de *choix*, notamment quand elle concerne la localisation des individus et des ménages et leur stratégie de mobilité au sein des systèmes urbains.

#### 3.1. Entropie et équilibre

Les systèmes urbains se composent d'un très grand nombre d'individus qui peuvent théoriquement tous adopter un comportement et des choix très différents, il est quasiment impossible de les décrire de manière fine et exhaustive. En revanche, ils peuvent être représentés plus aisément par un regroupement (ou une agrégation) des individus et des ménages, ainsi que des lieux dans lesquels ils habitent, vivent et se déplacent. S'il est par exemple difficile de considérer les mobilités individuelles des personnes quand elles passent d'un bâtiment à un autre pour toutes sortes d'activités quotidiennes (*micro*), il est plus aisé de voir comment des groupes d'individus se déplacent d'un quartier à un autre durant une journée (échelle *méso* des individus, de l'espace et du temps). L'idée générale revient alors à faire correspondre ce que l'on connaît des différentes échelles du système urbain : l'état intermédiaire (*méso-état*) le plus probable est celui qui peut être généré par le plus grand nombre de *micro-états* différents (échelle fine), compte tenu des contraintes imposées par le *macro-état* (échelle globale). De manière générale, la recherche de cette correspondance relève d'un problème de maximisation d'entropie.

Le concept d'entropie est introduit dans les modèles économiques de transport par A.G. Wilson (1967, 1970) à partir des résultats de la thermodynamique. En physique, il permet de mesurer le degré de désordre atteint dans un système en analysant son excitation externe, excitation qui provoque la transition d'une situation d'ordre vers une situation de désordre moléculaire. Plus l'entropie d'un système est élevée, moins ses éléments sont ordonnés entre eux. Dans un système complexe contenant de nombreux agents (des molécules ou des individus qui font des choix divers), cette relation permet de déterminer la tendance évolutive la plus probable conduisant à une situation d'équilibre (entropie dite maximale). On voit donc immédiatement l'intérêt que peut constituer cette approche dans l'analyse des interactions inhérentes au système de mobilités quotidiennes ou de changement d'occupation du sol, entendu comme un système complexe dont la recherche d'un équilibre interne a profondément marqué l'approche économique.

L'hypothèse de base consiste alors à dire que « tous les micro-états du système sont équiprobables à moins que l'on ne dispose d'informations avérant le contraire [...], hypothèse qui semble acceptable dans la mesure où l'on ne connaît pas le système au niveau de ses micro-états » (Bonnell, 2002). En appliquant le principe de l'entropie maximale à la modélisation du transport, il devient donc possible de définir la configuration la plus probable des déplacements au sein d'une ville ou d'une région. Ces déplacements  $T$  entre un lieu  $i$  et un lieu  $j$  sont alors représentés par une matrice  $T_{ij}$ , sur laquelle peuvent être assignées différentes façons de se déplacer :

$$S(T_{ij}) = \frac{T!}{\prod_i \prod_j T_{ij}!}$$

Dans cette formalisation,  $S$  est l'entropie du système, et chaque individu est considéré comme l'élément d'une foule (groupes ou agrégats de personnes) dont on cherche à appréhender le comportement global. Pour Wilson, la maximisation de l'entropie du système (degré d'ordre dans la distribution des flux) est alors fonction de trois contraintes (Lefevre, 2007) : (i) une contrainte d'*origine* (le nombre de personnes se déplaçant à partir d'une zone donnée ne peut excéder le total des résidents de celle-ci) ; (ii) une contrainte de *destination* (le nombre total de personnes se déplaçant vers une zone ne peut excéder le nombre d'emplois de celle-ci) ; et (iii) une contrainte de *coût* (l'ensemble des déplacements doit être réalisé au sein d'une « enveloppe » budgétaire donnée). L'intégration de ces trois contraintes permet ainsi de pallier assez efficacement une partie des critiques faites au modèle de Lowry,

et constitue la base des *matrices origine-destination* aujourd'hui intégrées dans la majorité des modèles de transport.

### 3.2. Utilité et choix discrets

Si le modèle développé par Wilson est d'ordre macro-économique, l'approche micro-économique découlant des études sur les consommateurs et de la maximisation des profits a conduit à développer une autre théorie, celle de l'*utilité aléatoire*. L'individu est alors considéré comme un « consommateur de déplacements », déplacements au cours desquels il cherche à maximiser son utilité sous la contrainte de son budget (il ne peut « consommer » des déplacements que tant qu'il a les moyens financiers de le faire). C'est avec cette approche que D. MacFadden (1973) a pu introduire plus de souplesse dans les concepts défendus jusqu'alors par la Nouvelle économie urbaine. Pour ce faire, il s'appuie également sur le postulat de la rationalité des individus, qui disposent d'un « pouvoir discriminant parfait » leur permettant de déterminer leurs préférences (en termes de localisation et de mobilité) de manière certaine et cohérente. La réalité étant évidemment plus complexe, les prolongements de cette approche de base ont ensuite conféré aux individus modélisés un pouvoir de discrétisation : ils deviennent désormais capables de hiérarchiser leurs choix, notamment pour la localisation de leur résidence ou de leurs moyens de transport. Les *modèles de choix discrets* se sont ainsi développés à partir des années 1970 et la fonction d'utilité aléatoire a permis de prendre en compte l'existence de préférences différentes et hiérarchisées au sein des ménages. Le choix d'un lieu de résidence, par exemple, est effectué par un individu en fonction de l'utilité qu'il attribue aux attributs de la zone dans laquelle ce lieu est localisé, et c'est le lieu dont l'utilité est la plus forte qui fait l'objet du choix final. Néanmoins, les comportements individuels s'avérant éminemment variables et difficiles à quantifier, les utilités sont souvent considérées comme des variables aléatoires et conduisent à un choix probabiliste. L'utilité totale  $U$  est alors décomposée de la manière suivante :

$$U = V + e$$

où  $V$  représente la part déterministe supposée rationnelle et connue de cette utilité, et  $e$  sa composante aléatoire, c'est-à-dire l'aléa lié au manque d'informations ou de rationalité dans le choix des individus ou des ménages. Pour calculer cette utilité, McFadden recourt techniquement au modèle *logit* multinomial, qui permet de représenter la rationalité des

individus dans sa double composante, simultanément déterministe et aléatoire. Pour qu'un individu de type  $i$  choisisse l'alternative  $r$ , il définit l'expression du *logit* multinomial de la manière suivante :

$$P_{r,i} = \frac{e^{-\lambda U_i}}{\sum_j e^{-\lambda U_j}}$$

Enfin, afin de mieux témoigner de la complexité et de l'interdépendance des choix et des comportements, il devient nécessaire que les calculs d'utilité s'effectuent également à rebours. La notion de *chaîne décisionnelle* implique en effet que chaque choix dépend des choix effectués précédemment, et qu'il les influence également lui-même : la localisation de l'emploi influence la localisation résidentielle, qui influence la fréquentation de certains commerces et de certains services ; de même, la fréquentation des commerces dépend en partie de leur accessibilité suivant les modes de transport et donc des choix modaux précédents. Dans ce contexte, toutes les possibilités doivent être envisagées quasi simultanément par le biais des coûts composites et des utilités que représente chaque option au sein du territoire étudié. Méthodologiquement, le calcul des probabilités de décision est évidemment nettement plus complexe, mais il peut s'appuyer sur un modèle *logit multinomial emboîté* (NMNL), qui permet de se rapprocher de la réalité du fonctionnement des espaces et des comportements, en évitant certains écueils liés à la dépendance ou à l'indépendance de choix alternatifs : « une alternative nouvelle qui s'ajoute aux probabilités de choix réduit proportionnellement la probabilité de chacun des autres choix, sans modifier le rapport entre les probabilités de choix existants » (Lefevre, 2007).

Durant les années 1980, les travaux de A. Anas (1982) démontrent que les modèles d'utilité aléatoire de McFadden et les modèles de maximisation de l'entropie découlant de la théorie de Wilson peuvent conduire à des résultats identiques. Il démontre également que le modèle *logit* multinomial issu de l'approche probabiliste de la maximisation de l'utilité aléatoire, peut être dérivé de la maximisation de l'entropie : les deux approches conduisent finalement à des estimations identiques des coefficients du modèle. Parallèlement, l'émergence des modèles de choix discret a permis de résoudre un conflit d'approche entre l'économie et la psychologie. Pour un économiste néo-classique, le choix est en effet considéré comme un conflit interne aux individus, qui les oblige à ne retenir qu'une seule possibilité parmi l'ensemble dont ils peuvent disposer. Pour ce faire, on suppose alors qu'ils sont doués d'un « pouvoir discriminant parfait » leur permettant de classer

ces possibilités selon la maximisation de l'utilité qu'elle permet, et selon un processus déterministe : dans des circonstances identiques, on choisit systématiquement et sans hésitation la même solution, celle qui nous rapporte le plus. Pour un psychologue, en revanche, le choix relève d'une démarche probabiliste : la solution qui rapporte le plus a une probabilité plus grande que les autres d'être choisie, ce qui n'empêche pas qu'une autre solution soit choisie. Le recours aux probabilités permet ainsi de tenir compte des incohérences observées dans le comportement humain. Toute la question consiste alors à savoir sur quels critères ces probabilités peuvent être construites. L'ensemble de ces avancées convergentes, portées par les méthodes et des concepts construits par une approche fondamentalement socio-économique, voire simplement économique, constituent aujourd'hui encore les fondements théoriques de nombreux modèles LUTI.

## CHAPITRE 5

# Sociologie et géographie urbaines

« *La vitesse est la forme moderne de la pesanteur* »

Paul Morand

Vues de loin, la sociologie et la géographie urbaines constituent deux disciplines relativement proches au sein des sciences humaines : pour étudier le même couple « homme + territoire », la première focalise sur les organisations sociales, et la seconde sur les structures géographiques. À l'origine, elles ont toutes les deux également eu tendance à se référer à une analogie organique pour décrire leurs fonctionnements socio-spatiaux, longtemps comparés à ceux des écosystèmes et des organismes vivants. Cette position a d'ailleurs conduit à proposer une lecture écologique de l'espace géographique. Dans les années 1930 par exemple, l'École de Chicago étudie le fonctionnement des espaces urbains à travers une modélisation graphique en couronnes, en secteurs et en noyaux, selon un schéma qui reste très usité à l'heure actuelle, et qui constitue une référence autant pour la géographie que pour la sociologie. Parallèlement, dans les années 1960, la *Time geography* explore les pratiques de mobilité au sein de ces configurations en mettant en avant la notion de contraintes spatio-temporelles à l'échelle micro de déplacements quotidiens et individuels. Dans le domaine des mobilités, c'est toutefois la physique sociale (*social physics*) qui présente probablement le point d'accord le plus notable : en dépassant la cartographie et la modélisation graphique pour proposer une formalisation mathématique des interactions spatiales dérivée de la gravité de Newton, elle constitue aujourd'hui encore un fondement pour les modèles de mobilité. Les apports sociologiques et géographiques y constituent un point de vue fondamental.

### 1. L'INTERACTION SPATIALE

Depuis que l'homme envoie des fusées dans l'espace, le principe de gravité semble bien compris : une fusée doit être propulsée depuis la

Terre jusqu'à ce qu'elle atteigne le point de rupture (*break point*) de la gravité terrestre, point à partir duquel elle entre dans un autre champ de gravité. Le schéma est identique dans le sens inverse et l'entrée d'une capsule dans l'atmosphère reste une opération délicate pour le retour des astronautes. Par analogie, un principe à peu près identique peut être appliqué à l'aménagement du territoire pour déterminer l'aire d'influence d'une ville, à l'image de son champ de gravité, qui conditionne les mouvements, les mobilités et, de manière plus générale, l'ensemble des interactions spatiales.

### 1.1. L'analogie gravitaire

Comme le mentionne R.J. Johnston (1979), quatre écoles de géographie quantitative ont co-existé aux États-Unis entre 1950 et 1980. Les trois premières se sont développées dans les départements des sciences humaines de l'Iowa, du Wisconsin et de Washington (Seattle). La quatrième, en revanche, est une école de physique sociale, qui propose une approche complètement indépendante des trois premières. Comme son nom l'indique, elle s'inspire plus des lois de la physique que des logiques de l'économie pour concevoir la notion d'interactions spatiales. Cette approche sera notamment portée par les travaux de John Q. Stewart (1894-1972), astrophysicien à l'université de Princeton, et de W. Warntz (1922-1988) à l'université de Pennsylvanie, qui intégrera par la suite l'Association des géographes américains.

Durant la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle, la physique sociale (*social physics*) est une approche universalisante et nécessairement interdisciplinaire qui tente d'expliquer un certain nombre de phénomènes sociaux selon une logique dérivée des lois de la physique. En géographie et en économie spatiale, elle se traduit généralement par l'utilisation de modèles dits gravitaires (ou « gravitationnels ») censés représenter la somme globale des interdépendances existant simultanément entre les lieux d'un territoire. Les interactions (ou les migrations) entre ces lieux seraient alors proportionnelles au produit de leur masse et inversement proportionnelles à la distance qui les sépare, selon un principe à peu près identique à celui qu'a identifié Isaac Newton (1643-1727) vers la fin du 17<sup>e</sup> siècle, en voyant une pomme tomber d'un arbre (selon la légende). Newton utilise en effet cet événement hautement inductif pour formuler la loi de la gravité universelle : il introduit le produit « masse × vitesse » (qu'il appelle « quantité de mouvement du corps ») et propose le « principe d'actions réciproque » pour montrer empiriquement que deux corps agissent l'un sur l'autre de manière égale et s'attirent de la même façon. Le soleil attire ainsi autant la

Terre que la Terre attire le soleil et la force exercée apparaît comme une fonction symétrique de leur masse respective. La formule qui en découle, dans laquelle  $m_i$  et  $m_j$  sont les masses des planètes  $i$  et  $j$ ,  $d$  est la distance qui les sépare et  $G$  est une constante de proportionnalité, peut être résumée ainsi :

$$F = G \cdot \frac{m_i \cdot m_j}{d_{ij}^2}$$

Le succès de la formule de Newton découle en grande partie de sa simplicité, mais également du fait qu'elle s'applique autant aux corps célestes (les planètes) qu'aux corps terrestres (les pommes). Par analogie, si l'on admet en effet (i) que le produit  $m_i \cdot m_j$  correspond à la probabilité d'une ville  $i$  d'interagir avec une autre ville  $j$ , et (ii) que la diminution très rapide des interactions avec la distance s'explique par les coûts de transport, on en déduit que les interactions urbaines procèdent d'un principe globalement similaire à celui de la gravitation universelle. C'est en tout cas dans ce sens qu'il faut interpréter l'ensemble des hypothèses utilisées en géographie et en économie pour évaluer les mouvements et les migrations que les différents espaces d'un territoire peuvent entretenir les uns avec les autres.

Ainsi, même si les premières hypothèses sur la dimension physique des sciences sociales auraient été suggérées par le sociologue américain Henry Carey (1793-1979), la première utilisation de modèles gravitaires pour une application spatiale remonte aux travaux précurseurs du géographe germano-britannique Ernst Georg Ravenstein (1834-1913). En 1885, dans un article intitulé « The laws of migration », il part en effet d'une observation empirique sur les mouvements migratoires au Royaume-Uni, qu'il confronte à une hypothèse d'attraction spatiale, pour montrer que les mouvements de personnes entre deux villes sont plus ou moins proportionnels au produit de leur population et inversement proportionnels à leur distance. Par extension, cette démonstration a conduit John Q. Stewart (1947) à construire une relation isomorphe (équivalence de forme et de structure) avec la loi de gravitation de Newton. Il écrit alors que « les êtres humains obéissent à des lois mathématiques qui ressemblent à certaines lois primaires de la physique », et suggère que « la mathématique des potentiels de population est la même que celle qui décrit un champ de gravité, un champ magnétique ou un champ de potentiel électrostatique » (James, 1972). Ces modèles ont alors trouvé des applications multiples, notamment en géographie économique avec les travaux de William J. Reilly, puis pour les études de transport et l'analyse du commerce de détail.

### 1.2. Les modèles d'interaction spatiale

La formulation originale de Newton a fait l'objet de nombreuses études avant d'être largement modifiée et complétée pour une utilisation dédiée à l'analyse des mouvements et des mobilités dans l'espace géographique. Ces modifications sont à l'origine de nombreux modèles que l'on nomme aujourd'hui modèles d'*interactions spatiales* (Pumain et Saint-Julien, 2001), afin de les distinguer d'une approche qui serait exclusivement adaptée aux calculs des champs de force interplanétaires. Dans des configurations très diverses, ces modèles ont notamment permis de montrer une corrélation fondamentale entre la distribution d'une large variété de phénomènes socio-économiques (commerce, appels téléphoniques, tourisme, etc.) et la configuration spatiale (hiérarchie urbaine, réseau de transports, etc.) propre à une région ou à un territoire. Pour R. Camagni (1996), par exemple, la base de ces interactions spatiales en économie urbaine repose sur le fait que toutes les activités (mesurées d'un point de vue démographique ou économique), où qu'elles soient localisées dans l'espace, entretiennent des relations bi-directionnelles avec leur environnement. Ce réseau de relations est relativement complexe et intervient à différents niveaux. Il se matérialise d'une part par un champ de force plus ou moins analogique à celui de la gravité (attraction, rayonnement, répulsion, coopération, etc.) qui fournit l'énergie de base au fonctionnement du territoire. Mais, d'autre part, chacune de ces activités exerce également une influence sur toutes les autres (importations et exportations, mouvements pendulaires ou migratoires de population, diffusion des savoir-faire, etc.). Chaque lieu de l'espace influencerait ainsi les autres en même temps qu'il serait influencé par eux.

Comme pour la gravité terrestre, cette influence serait proportionnelle à l'intensité des « masses » en jeu, généralement estimées par la population des villes ou des régions, et inversement proportionnelle à la distance (calculée en ligne droite, par le réseau de transport, en temps ou en coûts) séparant ces lieux. D'un point de vue théorique, les interactions spatiales naîtraient d'ailleurs de ces distances en elles-mêmes, puisque si toutes les masses d'attraction étaient localisées au même endroit, elles pourraient être simplement estimées par l'accessibilité à ce lieu unique. Dans l'approche économique, un modèle d'interactions spatiales apparaît donc comme un modèle relativement évolué qui échappe à une simplification abusive de l'espace ne tenant pas compte de la localisation différenciée des lieux sur les territoires. Cette approche relativement subtile permet notamment de dessiner des zones d'influence : d'un côté du « point de rupture » (*break point*) calculé à l'aide d'un

modèle d'interactions spatiales, les habitants fréquentent la ville  $i$  pour réaliser leurs achats, alors que de l'autre côté ils se tournent vers la ville  $j$ . Comme pour les planètes, la distance au *break point* d'une petite ville est plus petite que pour une ville de grande taille (cette taille étant généralement déterminée par leur population  $P$ ), mais elle reste fonction de la distance qui les sépare. Concrètement, la taille de la zone de chalandise  $D$  de chaque ville peut alors être calculée de la façon suivante :

$$D_j = \frac{d_{ij}}{1 + \frac{p_i}{p_j}}$$

Dans une logique à peu près similaire, les modèles proposés par W.J. Reilly (1931) ou J.O. Huff (1964) apparaissent également comme des dérivés directs de l'analogie gravitaire. Selon la manière avec laquelle on les formalise précisément, ces modèles d'interaction spatiale permettent de déterminer la limite d'attractivité d'une ville ou d'un centre commercial, mais également d'estimer la mobilité des individus entre les lieux. Cette seconde approche est d'autant plus intéressante qu'elle ne focalise plus sur un seul lieu, mais tient compte simultanément de l'ensemble des possibilités de déplacement. Comme l'indique la formule de Huff, le nombre de déplacements reste équivalent à la masse divisée par la distance mais intègre un ensemble complémentaire de lieux  $l$  et un motif  $k$  (achat, loisir, travail, tourisme) qui justifie l'interaction spatiale :

$$p_{ij,k} = \frac{M_{j,k}}{d_{ij}^\alpha \sum_{l,k} \frac{M_{l,k}}{d_{il,k}^\alpha}}$$

C'est sous cette forme (ou sous une forme équivalente mais écrite différemment) qu'est actuellement traitée la question de la distribution des mobilités et du trafic dans la grande majorité des modèles de transport et des modèles LUTI, notamment au sein de la plateforme de simulation des mobilités MobiSim. La formalisation de J.O. Huff a en effet l'avantage de prendre en compte trois conditions fondamentales, identifiées dès 1957 par le géographe américain Edward L. Ullman (1912-1976) à partir d'une étude sur le trafic ferroviaire et fluvial : la complémentarité des espaces, la substitution et la friction de la distance.

Premièrement, la condition de complémentarité (*complementarity*) suppose que toute interaction est le résultat d'une différence d'offre et de demande entre les lieux. Comme l'expliquent R. Abler *et al.* (1971), ce n'est pas parce qu'il y a une demande de pain à New York et une offre de bois en Géorgie qu'une interaction (mouvement ou migration) aura lieu entre ces deux États. L'interaction demande une réelle complémentarité

entre ce qui est demandé à un endroit et ce qui est présent ailleurs, et cette complémentarité spécifique nécessite concrètement de ne pas considérer la masse des lieux uniquement par leur population, mais également par ce qu'ils sont susceptibles d'offrir et de demander en termes de biens, de services ou d'aménités. Deuxièmement, même si elle est très spécifique, la complémentarité ne générera une interaction qu'en cas d'absence de substitution (*intervening opportunity*), comme l'a montré S.A. Stouffer (1940). En effet, si l'on considère une interaction possible entre un lieu  $i$  et un lieu  $j$ , il est nécessaire de considérer simultanément tous les autres lieux  $l$ , qui pourraient également apparaître comme une origine ou une destination possible pour cette interaction, et de vérifier s'ils ne sont pas finalement une « meilleure » origine ou destination. Pour bien comprendre ce principe de substitution, imaginons un bricoleur habitant un lieu  $i$  qui souhaite acheter des clous. À 500 mètres de chez lui, au lieu  $j$ , se trouve une quincaillerie qui vend des clous. Les conditions de complémentarité spécifique sont donc réunies et l'interaction peut *a priori* se faire. Sauf que, à 100 mètres de chez lui, au lieu  $l$ , se situe un magasin de bricolage qui, en plus d'être plus proche, propose un choix supérieur à un prix inférieur. Il y a alors fort à parier que l'interaction se fera entre  $i$  et  $l$ , et non entre  $i$  et  $j$ . Concrètement, pour estimer une interaction spatiale, il est donc nécessaire de ne pas considérer les lieux deux à deux, mais de les prendre en compte tous simultanément, de manière à tester les éventuelles substitutions. Troisièmement, la friction de la distance (*transferability*) se mesure généralement en un temps ou en un coût qui peuvent annuler les interactions spatiales : s'ils sont trop élevés pour parcourir la distance qui sépare  $i$  et  $j$ , l'interaction devient impossible, malgré une complémentarité parfaite et une absence de substitution. On remplacera alors ce que l'on souhaitait acquérir par autre chose, ou bien on s'en passera. Ainsi, si une interaction spatiale existe, il est fort probable que ces trois conditions sont réunies et satisfaites. Par conséquent, la modélisation des interactions spatiales nécessite l'intégration de variables multiples et relativement complexes à mesurer d'un point de vue psycho-social, intégration qui dépasse la simple masse des planètes identifiée dans les modèles physique de gravitation.

## 2. LA SOCIOLOGIE URBAINE

### 2.1. L'analogie organique

Parce qu'elle propose également une approche des relations entre l'homme et son environnement sur un territoire donné, l'analogie aux

organismes biologiques a trouvé un écho important auprès des disciplines spatiales, au sein desquelles elle a permis de proposer un cadre cohérent pour l'analyse des relations espace/société. Bien avant l'émergence de l'écologie comme discipline scientifique, l'analogie organique a en effet été utilisée pour « expliquer » le monde réel (de l'Antiquité de Platon jusqu'au Leviathan de Hobbes), et s'est trouvée largement favorisée par la révolution darwiniste qui l'a rendue très populaire jusque dans les années 1930. Dans son ouvrage de 1865, traduit par le titre anglais *Comparative Geography*, par exemple, le géographe allemand Carl Ritter (1789-1859) ne considérait pas le monde comme une masse inerte et inorganique, mais comme l'œuvre vivante et organique d'un dieu vivant lui aussi. En 1850 (*Hearth and Man: Lectures on Comparative Physical Geography*), son disciple suisse Arnold Guyot (1807-1884) partait également du principe un peu caricatural que chaque être vivant, chaque individu, constitue nécessairement une partie d'un organisme plus vaste, en dehors duquel son existence ne peut être conçue, et au sein duquel il a un rôle spécifique à jouer de manière à ce que tout soit en ordre et que l'univers fonctionne en harmonie.

Cette analogie organique appliquée aux relations espace/société a globalement été appliquée à trois types de territoires différents par leur échelle. Premièrement, la *planète Terre* est considérée par Alexandre de Humboldt (1769-1859) et Paul Vidal de La Blache (1845-1918) comme un « tout » dont les parties sont coordonnées. On retrouve d'ailleurs les mêmes concepts organiques à l'origine des travaux du géophysicien Bernard Brunhes (1867-1910) sur l'unité terrestre ou dans ceux de l'historien Lucien Febvre (1878-1956). Dans cet ensemble, la planète est considérée comme un organisme qui constitue une sorte de thème général pour unifier et synthétiser le travail des géographes, en lui donnant une cohérence d'ensemble plus que pour l'analyser comme un objet d'étude analogique. Ensuite, la question des *régions* est également discutée par Andrew Herbertson (1865-1915) qui les qualifie de macro-organismes à cause de la complexité des relations qu'y entretiennent les éléments relevant de la physique et ceux qui relèvent de la biologie : le sol constituerait une sorte de chair, la végétation une sorte de peau couverte d'animaux parasites, et l'eau s'assimilerait au flux sanguin, mu quotidiennement par les rayons du soleil selon des rythmes annuels. À travers cette analogie, comme pour la planète, le concept de région « naturelle » devient un outil quasi générique qui permet d'assimiler et de donner de la cohérence à une multitude de faits divers.

Enfin, l'analogie organique la plus marquante est probablement celle qu'a proposée le géographe allemand Friedrich Ratzel (1844-1904)

pour définir la notion d'*État*. Pharmacien et zoologiste de formation, F. Ratzel publie son œuvre majeure (*Anthropogéographie*) entre 1882 et 1891. Il y lie la Terre et l'homme dans une vision systématique qui a largement contribué à renouveler la géographie européenne. Ce lien lui permet en effet de mettre en lumière la diversité des sociétés humaines pour lui faire correspondre une diversité équivalente de milieux naturels. Selon Vidal de La Blache, F. Ratzel contribue ainsi à « rétablir dans la géographie l'élément humain dont les titres semblaient oubliés et à reconstituer l'unité de la géographie sur la base de la nature et de la vie ». Cette conception des rapports espace/société le conduira à s'intéresser à la géopolitique, qu'il nomme alors plus simplement *Géographie politique* dans son ouvrage éponyme de 1887. Il associe alors globalement cette discipline naissante à une théorie de l'État et définit ce dernier comme un « organisme » rassemblant une fraction d'humanité sur une fraction de sol, et dont les propriétés proviennent simultanément de ce peuple et de ce sol. De par sa géographie, à l'instar du corps humain, chaque État dispose ainsi de parties plus ou moins « vitales », hypothèse qui cristallise toute l'ambiguïté des travaux de Ratzel. Dans ce contexte, l'État est en effet contraint à un développement et à une croissance nécessaires vers des régions où les conditions géographiques sont proches du sien, ce qui légitime son expansion par la conquête d'un « espace vital ». Dans son ouvrage suivant (*L'espace vital*, 1901), il défend cette logique expansionniste en énonçant sept lois universelles : la croissance spatiale de l'État accompagne son développement culturel ; son étendue s'accroît parallèlement au développement de sa puissance économique, commerciale et idéologique ; il s'étend en incorporant des entités politiques plus petites ; il est limité par une frontière qui fonctionne comme un organe dont l'emplacement mouvant matérialise sa force et son dynamisme ; la logique géographique étant à la base de toute expansion spatiale, l'État est contraint d'absorber les régions les plus stratégiques pour renforcer sa propre viabilité (littoraux, bassins fluviaux, plaines fertiles et, plus généralement, espaces richement dotés) ; il se trouve naturellement porté à s'étendre s'il y a présence, à sa périphérie, d'un territoire qu'il considère comme lui étant « inférieur » ; l'absorption des plus faibles invite à multiplier l'expansion et les appropriations dans une sorte de mouvement auto-alimenté. Ces éléments théoriques, qui définiront, près de quarante ans plus tard, la politique expansionniste du national-socialisme, doivent évidemment être replacés dans leur contexte historique.

Comme le souligne O. Zajek (2009), au moment où F. Ratzel énonce ses théories, les recompositions entraînées en Europe par la tourmente

de 1789, les conquêtes napoléoniennes, le fracas de la chute de l'Empire, etc. confortent l'idée que le changement et l'expansion ne constituent pas une exception dans le comportement des États, mais plutôt une norme : les puissances « régulatrices » qu'étaient la Prusse, la Russie et l'Autriche avaient d'ailleurs donné l'exemple en se partageant une énième fois la Pologne au Congrès de Vienne en 1815. Dans le même temps, l'Angleterre accroissait son Empire au dépend d'une France ramenée à ses dimensions pré-révolutionnaires, alors que, sur l'autre continent, les États-Unis profitaient de la faiblesse d'une Espagne à bout de souffle pour lui arracher par la force de nombreux territoires, des Philippines à Porto Rico. Le point de vue de F. Ratzel apparaît donc plutôt ajusté aux événements de son époque.

La notion de *darwinisme social*, qui apparaît également au 19<sup>e</sup> siècle, n'en est d'ailleurs pas très éloignée. Elle constitue alors une doctrine politique et évolutionniste majeure, postulant d'une part que la lutte pour la vie entre les hommes est l'état naturel des relations sociales, et d'autre part que les conflits apparaissent de ce fait comme une source fondamentale du progrès et de l'amélioration de l'être humain. Dans ce cadre, certaines préconisations plus précises ont parfois été associées au darwinisme social : la suppression des institutions et des comportements qui font obstacle à l'expression de la lutte pour l'existence, la sélection naturelle qui aboutit à l'élimination des moins aptes et à la survie des plus aptes, etc. Dans son versant racia- liste, la théorie fait de la lutte entre les « races » le moteur de l'évo- lution humaine ; elle s'est d'ailleurs conjuguée à la fin du 19<sup>e</sup> siècle avec les théories eugénistes, même si, de son vivant, C. Darwin (1809-1882) s'est toujours opposé avec vigueur à l'application « brutale » de la sélection naturelle au sein des sociétés humaines. Au-delà de ces considérations plutôt extrêmes, l'analogie organique a ainsi été utilisée à maintes reprises et à différentes échelles pour figurer cer- taines propriétés des territoires, entendus comme un ensemble d'élé- ments insérés dans des interdépendances mutuelles et complexes, qui, malgré des flux de matière et d'énergie continus, se maintiennent dans des conditions d'équilibre. L'analogie organique propose un système espace/société en équilibre qui possède ses propres propriétés d'adap- tation, de cohésion, de réaction et de recréation, et plusieurs auteurs partent du principe que ce *tout* est plus que la somme des parties qui le composent. D'un point de vue plus empirique, l'analogie concerne également la question de la morphologie paysagère, inspirée des tra- vaux du biologiste D'Arcy Thompson (1860-1948) sur la transforma- tion géométrique (anamorphose) des formes biologiques en fonction de leur croissance.

L'objection majeure la plus communément apportée à l'interprétation organique des territoires réside dans le fait qu'elle ne permet pas réellement d'approfondir la connaissance sur le fonctionnement de ces territoires : elle en propose plus une synthèse qu'une analyse. À quelques exceptions près, elle conduit à une série de monographies régionales, typiques de l'École française, qui en a produit un catalogue un peu stéréotypé. Elle trouve en revanche un renouveau fondamental quand les sociologues de l'École de Chicago s'en emparent en intégrant quelques enseignements de l'écologie dans leurs travaux.

## 2.2. *L'École de Chicago*

Après des études qui l'orientent d'abord vers la théologie et les sciences économiques et politiques, Albion Small (1854-1926) fonde l'un des premiers départements de sociologie à l'université de Chicago en 1892. Ce département connaîtra son heure de gloire durant les années 1920-30, et sera dès lors mondialement reconnu comme une « École », originale par son approche qui consiste à étudier la ville et son organisation sociale selon les principes d'une écologie urbaine. L'École de sociologie de Chicago fait partie des quelques Écoles fondées au début du 20<sup>e</sup> siècle (dans des domaines aussi diversifiés que l'architecture, la sociologie ou l'économie), dans un espace-temps très particulier.

Au tournant des 19<sup>e</sup> et 20<sup>e</sup> siècles, Chicago est en effet une ville en pleine effervescence. Sa position géographique à la croisée des chemins terrestres et navigables contribue à sa croissance économique fulgurante, rendue possible par une immigration massive issue d'horizons culturels très différents, essentiellement européens. La ville comptera plus d'un million d'habitants en 1890 et plus de trois millions à la fin des années 1920 (à partir d'une quinzaine d'habitations seulement en 1830). Cette urbanisation extrêmement rapide fera simultanément de Chicago un symbole de la réussite capitaliste et du choc des cultures, ainsi qu'un laboratoire à ciel ouvert pour comprendre les principes de l'urbanisme et de la géographie urbaine. En observant la croissance et la recomposition de la ville d'un point de vue écologique ou biologique, l'École de sociologie de Chicago postule une interdépendance entre l'habitant et son habitat, liés par des rapports de compétition entre les groupes ethniques ou sociaux (des Italiens, des Allemands, des Polonais, des Grecs, etc.) qui se succèdent pour l'occupation de l'espace urbain et de ses quartiers. De par son approche fondamentalement spatiale, ces travaux trouveront un grand intérêt auprès des géographes dès la fin de la Deuxième guerre mondiale, tant pour leurs aspects thématiques que méthodologiques (Berry, 1971), et en France

à partir des années 1970 (Clerc et Garel, 1998). D'un point de vue théorique, ils contribuent largement à l'élaboration d'une théorie de la localisation résidentielle, présentée par les travaux fondateurs de William I. Thomas (1863-1947) et Robert E. Park (1864-1944).

À partir d'une étude sur l'immigration et l'intégration des migrants polonais (*The Polish Peasant in Europe and America*, 1918-1920), réalisée en collaboration avec le philosophe F. Znaniecki (1882-1958), W. Thomas met en lumière plusieurs principes sur les modifications sociales qu'implique l'immigration. Ces principes permettent notamment de comprendre l'immigration vers les États-Unis à travers les concepts d'organisation, de désorganisation et de réorganisation. La matrice migratoire de base est en effet généralement issue d'une structure socio-familiale traditionnelle au sein de laquelle les attitudes et les valeurs collectives prévalent sur celles des individus (organisation du groupe primaire, composé de *philistins* conformistes soumis à la tradition sociale). Si, à la suite d'une évolution majeure du contexte (changement technologique, crise économique ou politique, croissance démographique importante, urbanisation rapide, etc.), certains individus quittent ce schéma pour privilégier un mode de vie plus individuel, on aboutit à une désorganisation du groupe qui se traduit par une réduction du rôle de la famille en tant que structure sociale et, par voie de conséquence, à des comportements qui ne trouvent plus leur pendant dans les institutions et les règles sociales en place (désorganisation de *bohémiens* au caractère plus ou moins instable). Cette situation, pré ou post-migratoire, conduit à la recherche d'une nouvelle cohérence socio-spatiale, qui permet une réorganisation selon de nouvelles règles et de nouveaux comportements, mieux adaptés aux aspirations sociales du groupe ré-organisé (*créatifs* réfléchis et ouverts au changement).

R. Park étudie quant à lui plus précisément ce processus d'organisation et de réorganisation au sein des groupes sociaux immigrants et des populations autochtones qui les « accueillent ». Dans l'ouvrage majeur (*The City*, 1925) qu'il publie en collaboration avec E. Burgess (1886-1966), il distingue quatre étapes successives. Premièrement, la *rivalité* apparaît comme la forme d'interaction la plus élémentaire, la plus spontanée et la plus universelle : sans contact volontaire entre les individus, les relations sociales se limitent à une coexistence fondée exclusivement sur la division du travail et les rapports de pouvoir économiques. Deuxièmement, le *conflit* se manifeste par une prise de conscience de cette rivalité et devient un déterminant de la position de chaque individu en lui assignant un rôle dans la société. La troisième étape est celle de l'*adaptation*, que l'on peut concevoir à la manière

d'une conversion ou d'une mutation : les groupes restent rivaux mais acceptent désormais leurs différences culturelles et sociales, voire techniques, ce qui permet une co-habitation plus ou moins constructive dans un contexte relativement apaisé. Enfin, l'*assimilation* est l'ultime étape, au cours de laquelle les différences s'estompent et s'imbriquent pour former une nouvelle matrice sociale plus ou moins indépendante de l'origine des groupes qui en ont permis l'émergence.

Méthodologiquement, l'approche développée par l'École de Chicago apparaît particulièrement innovante à son époque : elle privilégie une analyse objective de la réalité sociale, tenant compte de la manière dont les individus perçoivent et définissent la situation qu'ils vivent à un moment donné (ce qui conduira à la formulation du théorème de W. Thomas selon lequel les comportements des individus s'expliquent par leur perception de la réalité et non par la réalité elle-même). La méthode privilégie de ce fait une approche empirique et qualitative basée sur des biographies et des récits, la lecture de documents administratifs et des statistiques sociales, préférant l'étude de cas à l'analyse de structures abstraites (Graffmeyer et Joseph, 1990). Cette approche ne tardera pas à proposer des modèles graphiques pour les espaces urbains, appuyés par une méthodologie statistique tout aussi innovante fondée sur l'analyse factorielle.

### 2.3. Les modèles d'écologie urbaine

D'un point de vue spatial, trois modèles graphiques complémentaires ont largement contribué à vulgariser les travaux de l'École de Chicago (même si leurs auteurs ne sont pas toujours exclusivement associés à cette École). La composition des espaces urbains et leur évolution dans le temps et dans l'espace y sont marquées par les comportements collectifs, les compétitions entre groupes sociaux et l'évolution du statut social des individus. La dimension comportementale des individus apparaît également comme un élément essentiel qui deviendra rapidement fondamental pour la modélisation urbaine. Cet ensemble de considérations a permis de produire trois modèles urbains successifs et complémentaires dans la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle.

En 1921, cinq ans après son arrivée à l'université de Chicago, Ernest Burgess (1886-1966) publie, en collaboration avec R. Park, un ouvrage majeur pour le renouvellement de la sociologie américaine (*Introduction to the Science of Sociology*), ouvrage qui reste aujourd'hui encore un fondement pour la discipline. En 1925, dans *The City*, il décrit l'organisation sociale et le cycle de vie des ménages en présentant la ville sous la forme d'une succession d'anneaux radioconcentriques habités par

des catégories sociales de plus en plus aisées au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre. Le CBD (*Central Business District* ou « quartier des affaires central », typique des villes américaines), constitue le centre de cette structure et regroupe les activités commerciales, sociales et administratives ainsi que les principaux nœuds du système de transport. À la périphérie directe du CBD, un quartier dit de transition concentre les premiers espaces résidentiels, petits et délabrés, ainsi que les industries légères. Plus loin, c'est l'habitat des cols bleus, puis celui des résidences des foyers aux revenus plus élevés, incluant des appartements de meilleure qualité et des maisons individuelles. Le centre et la zone de transition constituent ici un espace de paupérisation et de désorganisation sociale, mais également un moteur pour les mobilités résidentielles : chaque élévation du niveau de vie pousse les habitants à rejoindre les couronnes plus extérieures, qui témoignent d'une élévation sociale par leur seule position dans l'espace urbain. Dans le sens inverse, une situation de paupérisation ou de précarisation des individus les conduit à quitter les périphéries de la ville pour se rapprocher du centre, là où les valeurs foncières sont plus accessibles. Au-delà d'un schéma de zonage social de la ville, le modèle de Burgess doit donc bien être compris comme une construction dynamique révélant les logiques de la mobilité résidentielle. Dans ce sens, il synthétise spatialement les travaux de R. Park et de W. Thomas en montrant qu'à la suite d'une vague migratoire, la désorganisation des groupes sociaux est rapidement remplacée par une réorganisation qui prend la forme de couronnes, en même temps qu'elle contribue à l'expansion spatiale de la ville.

Le modèle de Homer Hoyt (1895-1984) complète celui de Burgess avec une approche plus économique, issue de l'étude de l'occupation du sol, des prix fonciers et de l'immobilier. Publié en 1939, il représente la ville comme une juxtaposition de « triangles », localisés de part et d'autre des grands axes routiers, soit des « secteurs » dans lesquels les activités s'organisent selon la logique économique de la rente foncière. Cette structure sectorielle incorpore de manière plus explicite le rôle des infrastructures de transport dans l'organisation de la ville. L'influence des routes est fondamentale puisque ces dernières guident la croissance urbaine et la canalisent sous la forme de corridors (secteurs) qui se superposent à son organisation plutôt radioconcentrique d'un point de vue social. Cette approche met notamment en évidence le fait que la croissance urbaine est majoritairement le long des voies de communication qui facilitent les déplacements de personnes et de marchandises, mais elle intègre également l'idée que le système de transport est une condition indispensable pour que les habitants aux revenus les plus élevés, localisés dans les zones résidentielles les

plus périphériques, puissent rejoindre facilement le CBD. Les populations les moins aisées se retrouvent quant à elles à proximité plus immédiate encore des grands axes de circulations (route, rail, port) dont elles subissent les nuisances (trafic, fret industriel, bruit, pollution) qui font chuter les valeurs foncières.

Enfin, le dernier modèle est celui des géographes Chauncy D. Harris (1914-2003) et Edward D. Ullman (1912-1976), publié dans leur article commun, « The Nature of Cities », en 1945. Ils y présentent une ville polynucléaire dont les quartiers regroupent des fonctions qui leur sont spécifiques, et qui se juxtaposent en constituant chacun un centre en eux-mêmes. Le modèle complète ainsi les deux précédents en schématisant la concentration spatiale des fonctions commerciales, politiques, administratives, etc., autour desquelles l'urbanisation se développe. Cette concentration prendrait d'ailleurs sa source dans une logique de localisation clairement économique : la structure multipolaire est issue d'une concurrence pour l'occupation du sol, elle-même conditionnée par l'accessibilité offerte par les réseaux de transport et, plus généralement, par la recherche d'économies d'agglomération qui invitent les activités complémentaires à se regrouper les unes à proximité des autres. Les industries lourdes ont par exemple tendance à se concentrer dans certains quartiers de la ville, alors que les zones résidentielles cherchent à s'éloigner des nuisances industrielles pour préserver leur environnement, et que les activités commerciales ont tendance à garder leurs distances les unes par rapport aux autres pour garantir des zones de chalandise équitables. Il en résulte une évolution conjointe et juxtaposée de places centrales plus ou moins indépendantes au sein d'une même aire urbaine.

Ainsi, même si chacun des modèles de l'École de Chicago apparaît cohérent en lui-même, c'est bien la prise en compte combinée des approches radioconcentrique, sectorielle et polynucléaire de Burgess, Hoyt, Harris et Ullmann qui offre aujourd'hui la base la plus complète pour une lecture globale des plans de ville et de leur organisation socio-économique. D'un point de vue méthodologique, le recours à l'analyse statistique factorielle est apparu comme un moyen de synthétiser en quelques dimensions (que l'on appelle statistiquement des facteurs) l'ensemble des variables qui caractérisent l'espace socio-économique urbain. Dans la grande majorité des études qui ont fait suite aux travaux de l'École de Chicago, ces dimensions sont généralement au nombre de trois : le facteur socio-économique, la structure familiale (ou de cycle de vie) et, dans les villes où existe une diversité raciale, religieuse ou linguistique importante, la dimension ethnique (ou socio-ethnique). Systématiquement, l'organisation spatiale de la ville

semble pouvoir s'expliquer par la combinaison de ces trois dimensions à elles seules. L'existence statistique d'une dimension socio-économique prouve par exemple que les différentes variables qui mesurent le statut social (scolarité, revenu, activité, etc.) ont tendance à évoluer ensemble au sein de l'espace résidentiel. En d'autres termes, les individus ont tendance à se grouper dans l'espace urbain en fonction des caractéristiques sociales qui leur sont communes. De même, l'existence d'une dimension relatant le cycle de vie reflète le fait que les divers indices démographiques (âge, statut familial, nombre d'enfants, etc.) varient ensemble dans l'espace urbain et que, par conséquent, les quartiers se construisent et se reconstruisent en fonction des caractéristiques démographiques des ménages qui y vivent.

Selon ce modèle, les individus et les ménages se distribueraient donc avant tout dans l'espace résidentiel en fonction de leur statut socio-économique et de leur statut familial, ce qui conforte finalement les modèles classiques d'écologie humaine : H. Hoyt observe que la dimension socio-économique varie essentiellement selon des secteurs reliant le centre et la périphérie de la ville le long des axes de communication, alors que E. Burgess montre une répartition en zones concentriques de la dimension familiale. Toute la dynamique sur laquelle reposent ces schémas globaux est reliée à la question du choix résidentiel des ménages, et les configurations spatiales qui en résultent reflètent les décisions qu'ils prennent en tenant compte de leur besoin d'espace et d'intimité et de leurs mouvements pendulaires (migrations entre le domicile et le travail), alors que leur choix dépend également de leur capacité économique et des conditions du marché du logement. Par ailleurs, la diversité culturelle ou ethnique peut avoir un impact considérable sur les conditions du marché du logement : lorsqu'elle aboutit à une ségrégation des groupes minoritaires, elle a pour effet de réduire la concurrence sur le marché du logement en modifiant le système de mobilité socio-géographique, selon une intensité qui dépend du niveau de concentration ethnique (ségrégation volontaire ou involontaire). Ce dernier critère est particulièrement déterminant dans le cas des ghettos noirs des villes américaines, mais très peu présent dans les études d'écologie urbaine factorielle réalisées sur des villes européennes.

L'écologie urbaine de l'École de Chicago a donc apporté à la recherche des concepts incontournables sur l'appropriation de l'espace et les choix de localisation résidentielle des individus. Elle permet de dégager l'importance de la dimension comportementale dans les stratégies de localisation spatiale, et conforte l'approche *proxémique* développée par E.T. Hall (1966). Ses prolongements peuvent se trouver dans les problématiques de la *Time geography*, développée par

T. Hägerstrand en 1970, caractérisée par l'étude des comportements spatio-temporels des individus selon leur âge, leur statut social, etc.

### 3. TEMPS ET ACCESSIBILITÉ

Dans le monde scientifique, les concepts d'espace et de temps ont longtemps été dissociés, jusqu'à ce que H. Poincaré (1854-1912) fonde une théorie de l'espace-temps dans une note qu'il publie en 1905, et qui, quelques années plus tard, servira de base aux travaux sur la relativité restreinte d'A. Einstein (1879-1955). Cet ensemble de démonstrations, qui relève au départ de la physique, conduit désormais à accepter le fait que le temps n'est pas indépendant de l'espace, y compris dans les champs d'application de l'aménagement du territoire. Triviale *a priori*, la notion de *mouvement* en est un excellent exemple : elle implique simultanément la notion de *trajectoire*, soit une ligne qui relie plusieurs lieux dans l'espace, et celle de *vitesse*, fondamentalement spatio-temporelle dans sa définition physique (rapport entre la quantité d'espace parcouru et le temps mis pour le parcourir). Ces notions très générales prennent toutefois des significations qu'il est nécessaire de préciser pour appréhender correctement les mobilités des individus au sein d'un territoire ou d'une ville. Plusieurs voies ont été ouvertes dans des domaines relativement différents : l'accessibilité telle qu'elle est entendue en économie, la géographie temporelle soutenue par la notion d'activité, ou encore l'espace « fonctionnel » qui résulte des mobilités.

#### 3.1. L'accessibilité

La première formalisation du concept d'accessibilité est probablement donnée par l'économiste américain Walter Hansen en 1959. Dans un article fondamental (« How Accessibility Shapes Land Use »), il montre en effet que l'accessibilité et la disponibilité d'espaces constructibles constituent la base des formes du développement résidentiel. L'étude contribue ainsi à dépasser la simple notion de proximité, et à hiérarchiser les liens entre les lieux par rapport au temps nécessaire pour les relier. Concrètement, l'accessibilité est alors évaluée à partir de mesures gravitaires permettant de prendre en compte la distribution des activités à l'intérieur d'un espace urbain, et de différencier les temps d'accès en fonction des modes de transport utilisés. W. Hansen en propose la mesure suivante :

$$A_{ik} = \sum_j O_{jk} f(c_{ij})$$

Dans cette formulation,  $A_{ik}$  est l'accessibilité qu'offre une zone  $i$  aux différentes opportunités de type  $k$  proposées dans les zones  $j = \{l, \dots, n\}$ ;  $O_{jk}$  est la mesure des aménités de types  $k$  présentes dans la zone  $j$ ,  $c_{ij}$  représente la distance qui sépare  $i$  et  $j$ , et enfin  $f(c_{ij})$  est une fonction de résistance ou de frottement qui limite ou dégrade la possibilité de se déplacer entre ces deux lieux. On retrouve donc ici tous les ingrédients nécessaires à la formalisation d'un modèle d'interactions spatiales.

À partir de cette base, les possibilités de mesure de l'accessibilité sont vastes : elles peuvent relever de la simple distance, du temps de transport (lui-même dépendant du mode de transport), du coût de ce transport, ou encore du type  $k$  d'aménités que l'on cherche à rejoindre. Cette façon novatrice, mais relativement basique, de concevoir l'accessibilité sera largement complétée par la recherche micro-économique : G. Kœnig (1974) intégrera la notion de satisfaction de l'individu (quand il atteint rapidement sa destination), et mettra en évidence des indicateurs d'utilité reflétant la variabilité du coût de transport et de l'intérêt de la destination choisie (qui s'accroît lorsque la liberté de choix augmente). En 1979, M. Ben Akiva et S.R. Lerman appliqueront la théorie de l'utilité aléatoire afin de mieux y intégrer les théories comportementales et de mesurer l'accessibilité en fonction du maximum d'utilité espéré par l'individu dans une situation donnée. L'accessibilité devient le résultat d'une action effectuée à partir d'un ensemble d'alternatives de déplacements, en fonction desquelles les individus choisissent de maximiser leur utilité (surplus du consommateur). Enfin, durant les années 1990, la notion d'accès vient élargir le concept d'accessibilité avec les travaux de F.J. Martinez (1995) : l'accès est envisagé comme un lien économique entre le système de transport et l'usage des sols, et contribue à identifier la relation entre les localisations spatiales des activités et les contraintes temporelles pour s'y rendre comme une variable clé ; elle permettra ainsi de mieux comprendre la logique de la morphogenèse urbaine. En 1981, Y. Zahavi mettra également en évidence la notion de *budget-temps*, en constatant que les distances de parcours sont en augmentation alors que la durée de déplacement reste constante. Cette « déconvergence » entre l'espace et le temps apparaît comme une conséquence de la motorisation et de la vitesse des moyens de transports.

### 3.2. La Time geography

Dans les années 1950, les travaux de l'École allemande, en particulier ceux de Christaller et de Lösch, ont semble-t-il été introduits en Suède par le géographe estonien E. Kant (1902-1978), qui a trouvé refuge

dans la ville de Lund après la Deuxième guerre mondiale (Holt-Jensen, 2009). Torsten Hägerstrand, lui-même en contact avec l'ethnologue suédois Sigfrid Svensson (à l'origine d'un nombre important d'études sur les relations entre l'innovation et la tradition dans les espaces ruraux), y devient son assistant. C'est dans ce contexte que T. Hägerstrand (1916-2004) s'est d'abord intéressé aux processus d'innovation qu'il a proposé d'examiner selon des angles différents (des pratiques agricoles aux propriétaires d'automobiles individuelles) dans une publication de 1953, traduite en 1967 par le titre anglais *Innovation Diffusion as a Spatial Process*. Outre ses aspects thématiques, cette publication contenait la particularité méthodologique de privilégier et de mettre en avant des outils mathématiques et statistiques particulièrement novateurs dans la discipline. Cette approche spécifique a rapidement permis de faire reconnaître le département de géographie de Lund comme un centre important de géographie théorique, et de le propulser au niveau d'une véritable École suédoise (dite aussi *École de Lund*). Lund deviendra alors attractive pour de nombreux chercheurs, notamment R. Morill (1965), venu des États-Unis pour y publier une étude remarquable sur les migrations et la croissance urbaine. Dans les années suivantes, les méthodes et les techniques statistiques utilisées par l'École suédoise pour produire ses résultats ont d'ailleurs attiré plus d'attention que les résultats en eux-mêmes, et Hägerstrand a lui-même regardé son travail comme plus intéressant du point de vue de l'analyse générale des processus de diffusion que de celui des conclusions empiriques que l'on pouvait en tirer. Ainsi, en focalisant sur les processus conduisant aux faits plus que sur les faits eux-mêmes, l'École de Lund a fortement contribué à une rupture disciplinaire séparant la géographie quantitative de la tradition géographique des études régionales, plus ou moins monographiques, telles qu'elles perdureront longtemps en France par exemple. Hägerstrand déclare d'ailleurs dans son introduction de 1953 que, si le matériel mobilisé pour mettre en lumière un processus fait généralement référence à un espace en particulier, il s'agit en réalité plus d'une nécessité (qu'il qualifie au passage de regrettable) que d'une subtilité scientifique. Cette position constitue en elle-même une provocation délibérée vis-à-vis de la géographie régionale classique.

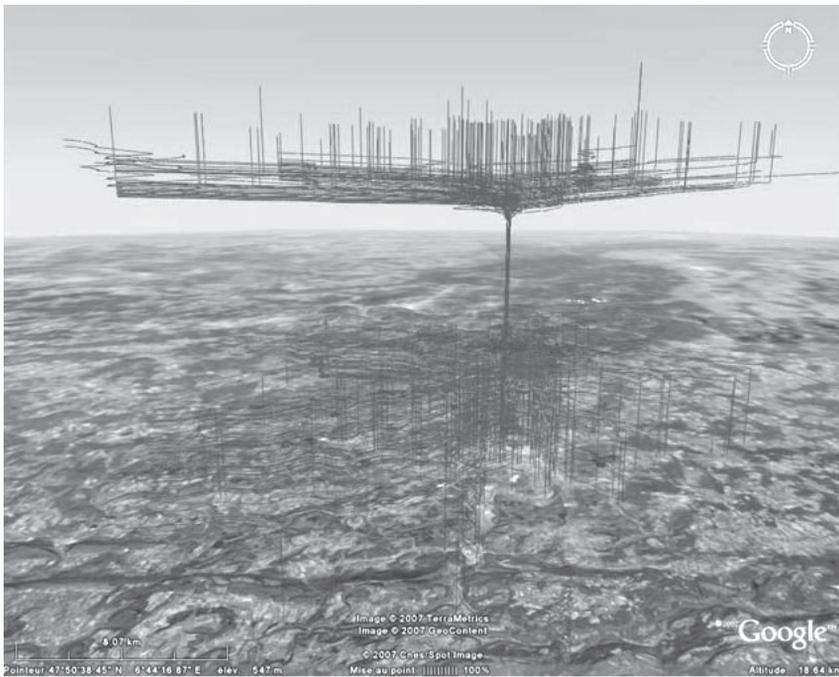
Après plusieurs années consacrées à l'analyse des innovations et des migrations de population, T. Hägerstrand (1970) parvient à la conclusion que l'étude agrégée des activités humaines (par catégories de population), à partir du postulat économique qu'elles découlent d'un comportement rationnel (*Homo æconomicus*), conduit à une impasse pour saisir les déterminants de la mobilité. Il entreprend alors d'étudier de manière détaillée les comportements individuels (démarche désa-

grégee), selon une logique qui donnera naissance à l'approche par « suivi d'activités » (*activity-based*). Ce parti pris lui permet notamment de relier les mouvements de personnes dans l'espace et dans le temps aux caractéristiques sociales (*styles de vie* par exemple) des individus qui les effectuent. Parallèlement, il offre également une meilleure prise pour considérer les contraintes spatio-temporelles auxquelles ils doivent individuellement faire face. Ces contraintes sont distinguées en trois catégories : (i) des contraintes dites de capacité (*capability*) qui intègrent des éléments physiologiques (boire, manger, dormir), techniques (capacité et vitesse des modes de déplacement) et topologiques (retour nécessaire au domicile pour une durée donnée) ; (ii) des contraintes dites de conjonction (*coupling*) liées aux besoins de rencontre entre les individus pour partager les ressources qui leur permettent de produire, de consommer et d'interagir socialement ; et (iii) des contraintes dites d'autorité (*authority*) issues de l'organisation de l'espace et de l'accessibilité aux ressources, qui engendrent des situations de concurrence possiblement hiérarchiques entre les lieux et les individus. Les études menées à partir de cette formalisation centrée sur les individus, qui prend fortement le contre-pied de l'approche économique, ont notamment montré que la combinaison des contraintes spatio-temporelles permet d'identifier clairement certains ressorts de la mobilité. Dans la logique épistémologique de l'École de Lund, cette identification constitue un résultat explicatif difficile à obtenir par la seule étude des manifestations spatiales et numériques de la mobilité en termes de flux, ce qui en justifie l'analyse désagrégée à l'échelle des individus.

Parallèlement à ce point de vue, T. Hägerstrand et l'École de Lund ont également associé à leurs résultats une méthode de description graphique permettant de rendre compte des mouvements dans l'espace et dans le temps. L'espace  $y$  est schématisé par un plan ( $XY$ ), alors que le temps ( $t$ ) est exprimé par un axe vertical perpendiculaire, ce qui permet de construire un cube (ou un « aquarium ») spatio-temporel (figure 5.1). Au sein de ce cube, chaque individu réalise une trajectoire (variation simultanée de l'espace et du temps) en reliant des stations ; les lignes obliques expriment ainsi des déplacements dont la vitesse est donnée par la valeur de la pente alors que les lignes verticales (pas de variation de l'espace) indiquent l'immobilité de l'individu pendant une certaine durée (représentée par la longueur de la ligne). Lorsque plusieurs individus se retrouvent dans la même « région » spatio-temporelle, la figure prend la forme d'un nœud qui témoigne de la rencontre au même moment de plusieurs personnes dans un lieu donné. Ce modèle tridimensionnel tente ainsi de synthétiser les mouvements spatio-temporels des individus au regard des trois catégories

de contraintes identifiées comme déterminantes de leur mobilité : chaque individu dispose de possibilités de mouvement différentes, conditionnées autant par son statut socio-économique que par les dispositifs techniques auxquels il a accès, dans un laps de temps nécessairement contraint. La représentation graphique de cet ensemble au sein d'un cube permet ainsi de considérer le temps et l'espace comme deux ressources différenciées, mais qui contraignent simultanément, chacune à leur manière, les activités humaines.

Figure 5.1  
**Cube spatio-temporel inspiré de la *Time Geography***



Les mobilités individuelles présentées sur la figure, dont les origines et les destinations (trajectoires) sont très diversifiées dans l'agglomération de Montbéliard, se concentrent dans un même « nœud » lors d'un événement particulier : un match de football du FC Sochaux au stade Bonal.

Source : Klein, 2007

Les études de *Time geography* initiées à l'École de Lund ont ainsi clairement contribué à mettre en lumière des aspects nouveaux du comportement humain en formulant quelques principes « élémentaires » sur la notion de mouvement et de mobilité : le mouvement est un processus dérivé de la mobilité ; il n'est pas segmenté mais construit par une chaîne de déplacements ; le ménage et les individus qui le

composent (en interaction) en sont l'unité statistique et explicative de référence, l'enchaînement, la durée des activités et les contraintes spatio-temporelles sont déterminants pour analyser les mouvements de manière dynamique, etc. C'est sur des principes globalement similaires que se fonde la multitude de travaux qui, dans des domaines et sur des espaces variés, prolongent la représentation spatio-temporelle proposée par T. Hägerstrand, et continuent de mobiliser la recherche en cartographie pour produire de nouvelles images synthétiques des mobilités, notamment urbaines (Kristensson *et al.*, 2009).

Toutefois, malgré l'apport indéniable de ces contributions respectives, il faut également se rendre à l'évidence d'une de leurs limites communes : à l'échelle d'un pays, d'une région ou d'une ville, le nombre de lieux est trop important, les réseaux de transport sont trop complexes, et le nombre d'individus est trop élevé pour que ce type de représentation reste efficace. Aussi, si l'approche développée par la *Time geography* s'avère fondamentalement pertinente à l'échelle de quelques individus, elle ne l'est plus du tout quand il s'agit d'analyser les trajectoires de tous les individus : l'ensemble devient rapidement illisible. Pour pallier ce problème, il devient nécessaire de ré-agrégier les mobilités d'une manière ou d'une autre, ce qui éloigne à nouveau les résultats du socle conceptuel centré sur les individus qui était à l'origine de leur construction. Ce problème de ré-agrégation constitue probablement l'un des défis majeurs qui reste à relever dans le domaine de la *géovisualisation* ou de l'*analyse exploratoire* de données spatiales.

### 3.3. L'espace fonctionnel

Comme en témoigne le cube spatio-temporel initié par les recherches de la *Time geography*, la représentation graphique d'une grande quantité de flux (mobilités quotidiennes, résidentielles ou, plus généralement, objets et/ou personnes en mouvement) pose un certain nombre de problèmes de lecture, et donc de restitution pour les chercheurs et les décideurs qui essayent d'en saisir le sens de manière synthétique. L'une des particularités des cartes de flux réside en effet dans le fait que la représentation exhaustive d'un phénomène de mobilité conduit à perdre l'une de leurs fonctionnalités originelles en tant que cartes, qui consiste à révéler des structures ou des processus en les synthétisant graphiquement. Ainsi, comme l'affirment C. Cauvin et H. Reymond (1989), la représentation de tous les flux est impossible et même inutile, car tout au plus elle gêne la lecture. Dans ce contexte, il est donc nécessaire que le concepteur de la carte limite le nombre d'informations qu'il représente à une quantité qui reste assimilable par

celui qui la lit. O. Klein (2007) estime par exemple que ce seuil correspond à une matrice d'échange de 10 x 10, soit une centaine de flux au maximum. En pratique, il devient donc nécessaire de procéder à un choix souvent difficile entre exhaustivité et lisibilité.

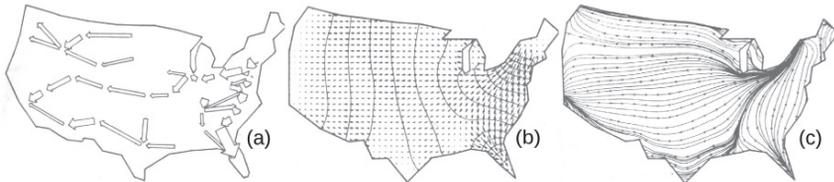
Face à cette difficulté, un premier parti pris consiste à supprimer la composante « mouvement » des flux. En éliminant la direction, les mobilités peuvent être représentées sur des surfaces plutôt que par des lignes, ce qui permet d'en construire une cartographie choroplèthe relativement facile à lire et à comprendre. Mais cette nouvelle implantation graphique suppose une agrégation de données et ne représente finalement plus que les sommes aux marges de la matrice d'échanges, c'est-à-dire au départ et à l'arrivée, sans que l'on ne sache plus ce qui se passe entre les deux. Dans le cas de migrations domicile-travail, ceci revient par exemple à représenter le nombre total des entrants, des sortants, ou la somme des deux (c'est-à-dire la *turbulence*) dans chaque commune, chaque quartier ou chaque zone. Pour compenser une partie de cette perte d'informations, un second parti pris consiste à ne représenter que les flux les plus importants, selon un seuil déterminé par des critères thématiques ou par la lisibilité de la représentation obtenue. Dans ce cas, on passe également d'une représentation fine et complexe des mouvements à un indice parfois trop simple pour que sa représentation conserve un réel intérêt thématique : si les « petits » flux ne sont pas toujours essentiels quand on les considère individuellement, ils influencent néanmoins le fonctionnement des réseaux de transports, et peuvent considérablement contribuer à leur saturation et à leur congestion.

Au milieu des années 1970, le géographe américain W. Tobler aborde cette question de représentation des flux d'une manière un peu différente à l'université de Santa Barbara. Son objectif principal consiste à construire une représentation des flux migratoires qui conserverait à la fois leur implémentation géométrique, leur direction et leur volume, afin de mieux comprendre la notion générale de mouvement. Il propose une série de solutions fondées sur les principes mathématiques du calcul vectoriel (Tobler, 1975, 1976, 1978). La méthode permet de produire un type de carte original composé de vecteurs isolés moyens, dont la norme (longueur) est égale à la moyenne des flux au départ de chaque lieu. Les coordonnées de chaque vecteur sont obtenues à partir de la quantité de mouvements entre les lieux  $i$  et  $j$  ( $M_{ij}$ ) avec pour positions respectives  $x_i, y_i$  et  $x_j, y_j$ , tel que :

$$\vec{v}_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1, j \neq i}^m \frac{M_{ij} - M_{ji}}{M_{ij} + M_{ji}} \cdot \frac{1}{d_{ij}} \cdot [(x_j - x_i), (y_j - y_i)]$$

Pour chaque lieu, le résultat présente alors un flux total, mais également la direction moyenne de ce flux (figure 5.2a). À partir de cette première proposition, en posant l'hypothèse que les mobilités sont spatialement continues, une interpolation permet de transformer la carte des vecteurs isolés en un champ vectoriel régulier dont les points d'origine sont répartis sur l'ensemble de la zone étudiée. L'orientation et la grandeur des mouvements sont représentées sur chaque nœud d'une grille régulière couvrant l'ensemble de l'espace étudié (figure 5.2b). Enfin, une carte des attractivités représentant les potentiels scalaires qui induisent les mouvements peut également être construite sur cette base. Dans cette représentation par isolignes, le modèle proposé par W. Tobler estime les flux nets en fonction des attractivités, elles-mêmes calculées à partir des différences entre les effectifs marginaux d'un tableau d'échanges. L'attractivité exprime ainsi le *potentiel* qui aurait engendré le mouvement. Elle est évaluée soit par calcul matriciel, soit au moyen de l'équation de Poisson, selon que le modèle est exprimé dans une formulation discrète ou continue (figure 5.2c).

Figure 5.2  
Trois manières de représenter les migrations de population  
entre les États des USA



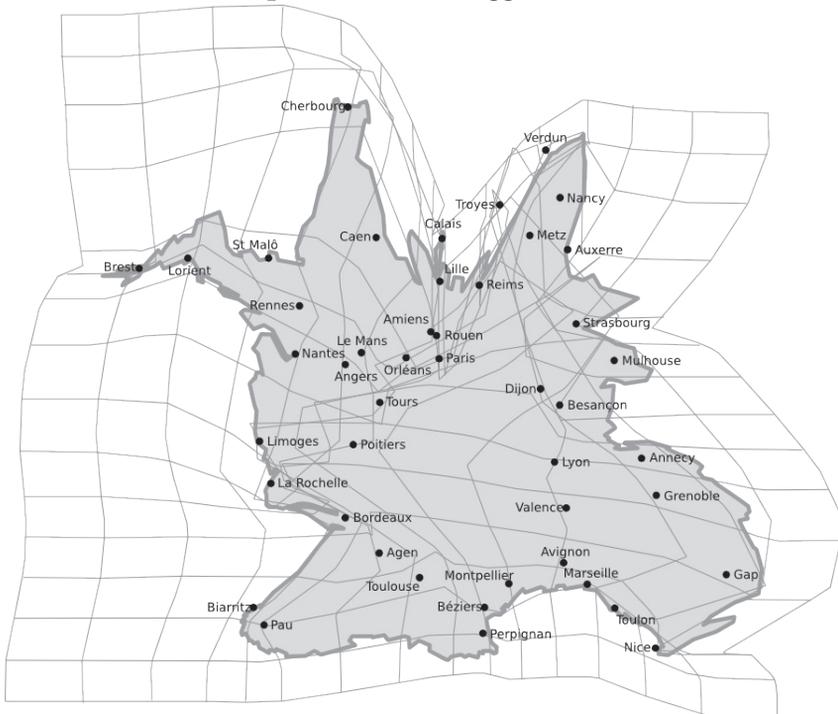
(a) les principaux flux sont représentés par des flèches ; (b) dans un champ vectoriel, les flèches décrivent la grandeur et la direction des flux alors que les isolignes montrent l'attractivité des États ; (c) les lignes directrices des flux sont estimées à partir des champs de potentiels.

Source : Cauvin et Reymond, 1991 ; d'après Tobler, 1981.

Dans l'ensemble de ces propositions, les relations entre l'espace et le temps sont toujours représentées selon une logique euclidienne, au sein de laquelle ils peuvent être mesurés partout de la même manière. Pour révéler les structures qui y sont sous-jacentes, les *transformations cartographiques* apparaissent comme une autre série de méthodes. Elles consistent à modifier, étirer, contracter et bouleverser l'espace topographique et concret dans des « formes inhabituelles et déroutantes » (Cauvin, 1997). Souvent plus connues sous le nom d'*anamorphoses*, les transformations cartographiques de positions permettent

ainsi de représenter l'espace tel qu'il « fonctionne » et proposent une image originale de l'accessibilité et des mobilités. Issues des travaux originaux de D'Arcy-Thompson, réinterprétés dans un contexte géographique par W. Tobler, elles s'appuient sur le principe que « la forme exprime la structure d'un phénomène », et posent explicitement l'hypothèse que « si l'on est à-même de caractériser une forme ou de comparer des formes, alors on peut révéler par la forme une structure non visible, on peut comparer des structures entre elles » (Cauvin, 1997). Au sein de cet espace fonctionnel, les relations entre les lieux correspondent à des distances qui ne relèvent pas de la géométrie euclidienne (mesurée en unités métriques selon des axes orthonormés), mais par le temps ou le coût du trajet nécessaire pour se rendre de l'un à l'autre,

Figure 5.3  
**La figure montre une simulation de l'accessibilité temporelle du TGV en 2015 pour différentes agglomérations de France**



Les transformations cartographiques de positions (anamorphoses) permettent de représenter l'espace tel qu'il « fonctionne » par une image originale de l'accessibilité et des mobilités. Au sein de cet espace fonctionnel, les relations entre les lieux sont des distances qui ne relèvent pas de la géométrie euclidienne (unités métriques), mais du temps ou du coût du trajet nécessaire pour se rendre de l'un à l'autre.

Source : Klein, 2000 ; d'après Cauvin et Reymann

ce qui permet de visualiser l'intégration des villes ou des quartiers au sein du réseau de transports qui les relie (figure 5.3). Ainsi, la représentation ne se contente pas de spatialiser une variable en la superposant *sur* un fond de carte topographique ; elle inclut directement cette variable *dans* le fond de carte, et la fait intervenir comme un vecteur de transformation pour représenter le fonctionnement temporel de l'espace plutôt que sa topographie. Outre l'accessibilité, la cartographie de la cognition spatiale est également une thématique de la psychologie environnementale qui illustre l'intérêt de ce type de représentations : la topographie et les distances entre les lieux sont remplacées par l'« idée » que les individus se font de ces distances, ce qui permet de redessiner les limites et les points marquants des territoires selon leur perception.

## Réseaux et ingénierie des transports

« *Ce qui barre la route fait faire du chemin* »

Jean de La Bruyère

Les territoires sont faits de *lieux* dont la théorie de la localisation, la géographie et la sociologie urbaines permettent de saisir une partie des logiques de répartition. Mais ils sont également faits de *flux* dont les structures sont souvent nettement plus complexes à visualiser et à appréhender. Sans entrer dans le détail des définitions (parfois subtiles), ces flux caractérisent des déplacements, et ces déplacements ne sont possibles que lorsqu'il existe des réseaux permettant de les effectuer. L'étude de ces réseaux apparaît dès lors fondamentale ; elle fait l'objet de la théorie des graphes, qui permet non seulement d'en évaluer l'efficacité du point de vue du calcul économique, mais également d'en concevoir et d'en optimiser les tracés et les connexions. Parallèlement, les flux qui circulent sur ces réseaux ont également fait l'objet d'une attention très pragmatique, celle de l'ingénierie des transports, qui propose de les modéliser en quatre étapes (génération des mobilités, distribution dans l'espace, choix du mode de transport et affectation du trafic sur les réseaux). Initialement attachée à la prédiction de la circulation pour anticiper la construction des infrastructures routières, la modélisation à quatre étapes constitue aujourd'hui une démarche synthétique (et relativement interdisciplinaire lorsqu'elle est abordée de manière complexe) qui, sous une forme ou une autre, nourrit toujours la majorité des modèles dédiés aux politiques de transport et à la gestion des mobilités. L'étude des réseaux et l'ingénierie des transports y apportent un point de vue désormais incontournable.

### 1. GRAPHES ET RÉSEAUX

L'une des questions qui illustre le mieux la théorie des graphes a été posée en 1736 par le mathématicien suisse Leonhard Euler (1707-1783) : le *Problème des sept ponts de Königsberg* consiste à trouver un chemin

permettant (i) de partir de n'importe quel quartier de la ville, (ii) de passer une et une seule fois par les sept ponts de la ville, et (iii) de revenir à son point de départ. Dans le même genre, le mathématicien irlandais William Hamilton (1805-1865) a posé une question à peu près identique, mais plus compliquée en apparence : à partir d'un dodécaèdre de bois dont chacune des vingt faces correspond à une ville, comment relier une seule fois chacune d'elles par une route dont les points de départ et d'arrivée sont les mêmes ? Même si ces casse-tête peuvent apparaître comme des passe-temps naïfs, ils constituent véritablement des jeux sérieux dans le domaine de la recherche opérationnelle. Leurs solutions demandent d'ailleurs toujours de longs temps de calcul, qui relèvent désormais de la théorie des graphes telle qu'elle a été formalisée par K.J. Kansky (1963). On montre ainsi que le problème de Königsberg est insoluble sans détruire un pont ou en construire un nouveau, le tracé recherché n'étant pas possible quand leur nombre est impair. De même, la théorie des graphes reste à la base de nombreux problèmes actuels pour l'aménagement et l'organisation économique des territoires : le coût marginal d'une flotte de poids lourds, l'optimisation du fret, la construction de nouvelles infrastructures pour les marchandises et les voyageurs, etc.

### 1.1. Structure des graphes

Pour faire simple, la théorie des graphes est une sorte de mathématique des relations : en spécifiant certaines propriétés topologiques entre différents lieux et en acceptant l'abstraction inhérente à la théorie, elle offre plusieurs « théorèmes » permettant d'analyser les flux et les réseaux. Les villes d'une région, par exemple, sont considérées comme un ensemble de points ; elles sont reliées deux à deux par une ligne si un flux ou une route existe entre elles. Cet ensemble de lignes et de points compose un *graphe linéaire* au sein duquel chaque lieu est considéré comme adjacent à un autre s'il est connecté à lui par une ligne. En complément, ces connexions peuvent être associées à une densité (trafic, nombre de voyageurs, etc.) en affectant une valeur et un sens à chaque ligne. Mais dans un cas comme dans l'autre, le réseau topologique reste l'unique information à la base du graphe : les distances scalaires et les directions, qui sont une exigence fondamentale pour les cartographes et les géomètres, sont ici ignorées. La figure 6.2(A) montre par exemple comment un réseau de routes « réel » entre plusieurs lieux peut être représenté par des graphes différents, mais tous équivalents du point de vue de la théorie des graphes, dans la mesure où chaque lieu y est toujours connecté de la même manière.

Figure 6.1  
**Les principaux indices de la théorie des graphes**

Mesure	Traduction	Description	Formule
Nombre cyclomatique	Cyclomatic number	Nombre maximum de cycles indépendants	$u = e - v + p$
Indice $\alpha$	Alpha index (lattice degree)	Nombre de cycles sur nombre maximum de cycles possibles	$\alpha = \frac{u}{2v-5}$
Indice $\beta$	Beta index (complexity)	Nombre de liens sur nombre de sommets	$\beta = \frac{e}{v}$
Indice $\gamma$	Gamma index (connectivity)	Nombre de liens sur nombre maximum de liens possibles	$\gamma = \frac{e}{3(v-2)}$
Centralité	Centrality	Somme des centralités individuelles* des nœuds	$C(G) = \sum_{i=1}^{i=N} C(X_i)$

Malgré l'inconvénient d'une lecture qui ne correspond plus directement à la réalité géographique des territoires, l'un des avantages de la théorie des graphes est de permettre la description des réseaux à travers une série d'indicateurs relativement simples : le nombre cyclomatique, la centralité, les indices  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ .

Source : Ducruet, 2010

Malgré l'inconvénient d'une lecture qui ne correspond plus directement à la réalité géographique des territoires, le principal avantage de cette prise en compte strictement topologique des réseaux est d'en permettre une meilleure description à travers une série d'indicateurs relativement simples : le nombre cyclomatique, la centralité, les indices  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  (qui indiquent respectivement le nombre de cycles réellement possibles au sein du graphe par rapport au nombre de cycles qu'il pourrait théoriquement permettre s'il était développé à son maximum, le rapport entre le nombre de liens et le nombre de sommets, et le nombre de liens existant par rapport au nombre maximal de liens possibles), etc. (figure 6.1). L'ensemble de ces indicateurs est généralement bien décrit dans n'importe quel manuel traitant de la théorie des graphes, manuels qui indiquent également leur modalité de mise en œuvre, et les dangers qu'il peut y avoir à les interpréter s'ils sont employés sans précaution.

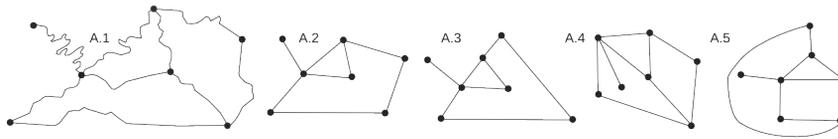
À titre de démonstration, on peut par exemple tenter de montrer l'intérêt de l'indice  $\alpha$ , dont la formule est rappelée dans la figure 6.1. Le numérateur de cette fraction correspond au nombre de cycles possibles dans un graphe, c'est-à-dire au nombre de circuits composés de liens consécutifs dont les deux extrémités sont le même lieu. Ce nombre est nommé  $U$  ; il est ici comparé au nombre de cycles théoriquement possibles dans le même graphe, ce dernier étant calculé à partir du nombre de lieux  $V$  qu'il contient de la manière suivante :  $2V - 5$ . Comme le montre l'exemple théorique présenté sur la figure 6.2(B), l'indice  $\alpha$  est donc nul ( $\alpha = 0$ ) pour un graphe « en arbre » qui ne permet aucun circuit. Il est en revanche égal à 1 ( $\alpha = 1$ ), quand tous les lieux du réseau sont directement connectés les uns aux autres. Entre les deux, de nombreuses configurations sont possibles

( $0 < \alpha < 1$ ) : chacune témoigne d'un état de développement du réseau entre deux cas de figure théoriques extrêmes. On notera d'ailleurs que la dernière configuration, si elle présente une forme d'excellence théorique, a en revanche peu d'intérêt en matière d'aménagement du territoire : sa connectivité est faite de redondances flagrantes (tout est directement connecté à tout), et peut apparaître démesurée par rapport aux pressions que le déploiement d'un tel réseau ferait peser sur l'environnement, ainsi qu'à l'absurdité financière que représente le développement « doublonné » de nombreux tronçons de routes pour passer d'un lieu à un autre sans escale, et les conséquences économiques que cela pourrait engendrer pour des villes qui tirent justement une partie de leur attractivité du fait qu'elles sont également des lieux de passage. L'excellence de l'indicateur ne reflète pas nécessairement l'excellence territoriale.

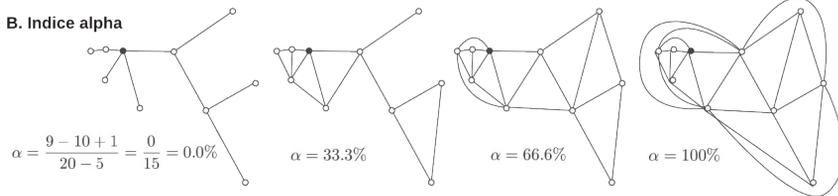
Figure 6.2

## Exemples d'application de la théorie des graphes

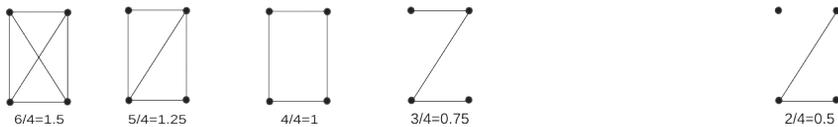
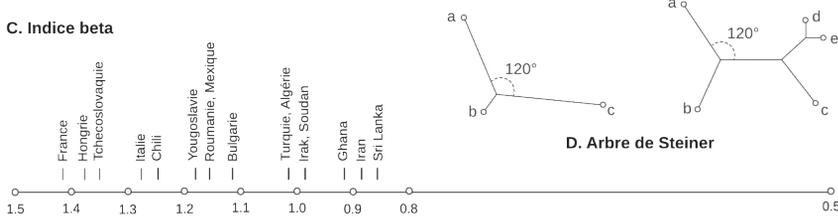
## A. Généralisation d'un réseau (A1) en quatre graphes alternatifs (A2,A3,A4,A5)



## B. Indice alpha



## C. Indice beta



A. Généralisation d'un réseau de routes en graphes topologiques ne tenant plus compte ni de l'orientation ni des distances (Source : Haggett et Chorley, 1974) ; B. Indice *alpha* indiquant le nombre de cycles d'un réseau ; C. Indice *bêta* calculé pour comparer les réseaux ferroviaires de différents pays ; D. *Arbre de Steiner* permettant d'optimiser la localisation et la connexion des carrefours.

L'indice  $\beta$  est quant à lui plus simple d'un point de vue mathématique. Il consiste simplement à diviser le nombre de tronçons par le nombre de lieux qu'ils desservent pour obtenir un indicateur synthétique du développement des réseaux. Sur la figure 6.2(C), construite dans les années 1970, il est utilisé pour comparer les réseaux ferroviaires de différents pays européens à partir de critères synthétiques communs. On y voit certes une excellente approche méthodologique conduite dans une perspective de comparaison objective. Mais, au regard des pays concernés et de leur score, on ne peut pas non plus s'empêcher d'y lire une justification de la planification spatiale mise en œuvre dans les pays d'influence soviétique, à une époque de guerre froide où la majorité des géographes universitaires français étaient encore encartés au parti communiste. Une preuve de plus que, sous le couvert de la méthode, on peut faire dire ce que l'on veut aux chiffres, qui deviennent d'autant plus démonstratifs qu'ils ont remporté l'« épreuve » de l'analyse scientifique. Cette remarque n'enlève rien à la validité de la méthode ; elle pose en revanche à nouveau la question soulevée par D. Pumain (2012) pour le calcul des lois rang-taille : quelle est la validité objective des données qui servent d'entrée au calcul des résultats ?

### 1.2. Optimisation des réseaux

Au-delà de la description, de l'analyse et de la comparaison des réseaux de transport, les méthodes issues de la théorie des graphes permettent également de définir des itinéraires ou de concevoir l'aménagement d'infrastructures dans une logique d'optimisation (chemin le plus court offrant un rendement maximal). En effet, si l'identification du chemin le plus avantageux apparaît *a priori* comme une opération banale pratiquée quotidiennement par des milliers de gens pour relier les quelques aménités associées à leurs activités journalières (domicile, travail, achat, accompagnement des enfants, etc.), elle devient rapidement très épineuse lorsque les graphes relient un nombre plus important de lieux par de nombreux chemins possibles. Le problème est encore plus complexe lorsqu'on y intègre certaines contraintes liées à la mobilité des personnes ou au fonctionnement des réseaux : comment faire lorsque la matrice des distances entre les lieux est asymétrique (les arcs contiennent des sens uniques et/ou sont plus longs ou plus chers dans une direction que dans une autre), ou quand le trajet doit impérativement être effectué en un seul circuit (le point de départ et d'arrivée doivent être identiques) ?

Le problème de *représentant de commerce* (*travelling salesman problem*) est une illustration typique de ce genre de questions : en partant de l'entreprise qui l'emploie, quel est le chemin le plus court permettant de visiter tous ses clients avant de revenir à l'entreprise ? Les solutions à ce type de problèmes sont aujourd'hui bien connues et sont même intégrées dans certains logiciels SIG pour une application immédiate aux questions de la logistique et du transport de marchandises. D'un point de vue informatique, elles relèvent toutefois clairement d'un problème d'optimisation relativement difficile, pour lequel aucun algorithme ne permet de trouver rapidement une solution « exacte ». Dans le cas de très grands graphes notamment, l'explosion combinatoire du nombre de possibilités ne permet généralement de calculer qu'une solution « approchée », et le problème constitue de ce fait également un excellent exemple pour introduire la théorie de la complexité.

Dans la perspective d'une optimisation à plus grande échelle, une extension de ce problème consiste à déterminer des « itinéraires minimums à flux maximums », afin d'optimiser le trafic et de rentabiliser l'investissement global des infrastructures de transport. D'un point de vue théorique, il s'agit donc de connecter un nombre maximal de lieux en passant par une route qui doit être la moins chère, et donc la plus courte possible. Ici encore, la solution la plus ancienne a été apportée par un mathématicien suisse, Jakob Steiner (1796-1863). Pour parvenir à cette solution, il considère dans un premier temps un ensemble de trois villes localisées quelque part dans l'espace, et il se fonde sur les angles du triangle formé par leurs positions relatives. Il montre alors que si l'un des angles est supérieur ou égal à  $120^\circ$ , les villes situées aux sommets opposés doivent être connectées directement à cet angle. En revanche, si tous les angles du triangle sont inférieurs à  $120^\circ$ , la meilleure solution consiste à créer un carrefour central localisé de manière à ce que les voies qui en partent forment des angles de  $120^\circ$  (figure 6.2(D)). L'ensemble des villes est alors relié par ce carrefour qui ne constitue pas une destination en tant que telle, mais un point de passage « artificiel » dénué d'attractivité, du moins au départ, puisqu'il ne sert qu'à l'optimisation du réseau dans son ensemble. Cette solution, dite de l'*arbre de Steiner*, peut être généralisée pour un ensemble  $N$  de lieux : par l'itération d'équations non linéaires, on montre aujourd'hui assez aisément que le nombre maximum de carrefours disposés à  $120^\circ$  est de  $N - 2$ , ce qui permet de tester de nombreuses solutions de localisation des carrefours et de choisir celles qui minimisent la longueur totale des routes.

Plus concrètement, l'application de telles méthodes a également servi à l'ingénieur anglais Arthur Wellington (1847-1895) pour la planification du système de transport du Mexique. Le problème pratique consistant à optimiser la relation entre la longueur totale des chemins de fer à poser (variable à minimiser) et le nombre de villes que les rails permettaient de connecter (variable à maximiser), il pose alors trois hypothèses qui correspondaient à son époque : (i) si toutes les villes intermédiaires entre le départ et le terminus sont capables de générer le même trafic, ce dernier variera selon le carré du nombre de lieux desservis ; (ii) si les villes intermédiaires sont peu compétitives par rapport au départ et à l'arrivée, le trafic sera réduit de 10 % par kilomètre reliant chaque station annulée ; (iii) si les villes intermédiaires sont de grandes villes industrielles, ce même trafic serait en revanche brutalement réduit de 25 % (Wellington, 1887). Ce raisonnement peut sembler un peu abrupt et n'a évidemment plus de raison d'être aujourd'hui, mais il a permis de poser la base d'une règle permettant de calculer les escales du réseau de chemins de fer pour optimiser la connexion des villes majeures et intermédiaires à l'échelle d'un pays. La règle n'a dès lors cessé d'être améliorée et reste utilisée avec de nombreuses variantes pour la planification des réseaux, notamment quand il s'agit de positionner les stations des transports en commun urbains, en fonction de la densité de population et de l'attractivité des quartiers en termes de commerces et de services.

Dans l'ensemble des exemples précédents, les lieux sont connectés les uns aux autres par des liens représentés schématiquement par des lignes droites, théoriquement optimales pour minimiser les distances. Dans la réalité, il est cependant évident que ces lignes droites sont extrêmement rares : le réseau antique des voies romaines, comme les autoroutes construites dans la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle ne font qu'approcher ce cas de figure géométrique. P. Haggett et R.J. Chorley (1974) expliquent comment et pourquoi les réseaux réels s'en écartent nécessairement par des *déviations* qu'ils qualifient de positives ou de négatives. Comme pour la construction du réseau ferré mexicain, une déviation positive modifie le tracé d'une route pour en maximiser le trafic (donc la rentabilité) en créant des escales supplémentaires. Une déviation négative permet quant à elle d'éviter les obstacles de la géographie physique (fleuves, montagnes, etc.) qui impliqueraient des coûts insupportables pour la construction du réseau ; de même, elles permettent de préserver certains secteurs d'intérêt, dont la traversée réduirait la valeur paysagère ou écologique.

Au début du 20<sup>e</sup> siècle, le géographe allemand A. Lösch s'était lui-même également intéressé à ces déviations négatives, dans un contexte

de nature très différente, celui du fret maritime et de la localisation des ports. Ici, la principale donnée du problème réside dans les coûts de transport qui sont moins élevés par voie maritime que par voie terrestre. Il utilise alors les lois de la *réfraction* pour calculer les déviations négatives optimales permettant de sélectionner la route la moins chère pour transporter un produit fabriqué en un lieu  $i$  et vendu en un lieu  $j$ , ces deux lieux étant séparés par une mer. Sur une côte qu'il considère comme abordable en tout point, la localisation du port d'arrivée est alors obtenue par un simple calcul de sinus. En effet, comme l'indique la figure 6.2, si la route directe entre  $i$  et  $j$  croise nécessairement la côte en un point  $P$ , la localisation la plus intéressante de ce point est celle pour laquelle :

$$T_1 \sin x - T_2 \sin y = 0$$

Dans cette équation,  $x$  et  $y$  sont les angles que forment la route maritime et la route terrestre avec une ligne perpendiculaire à la côte. Ils permettent de définir le point  $P$  comme le meilleur site d'implantation théorique pour la construction d'une plateforme d'échange intermodale, en l'occurrence un port de commerce.

Ces quelques exemples montrent qu'à partir de la formalisation de base qu'a apportée la théorie des graphes, de nombreuses méthodes peuvent être utilisées, combinées et modifiées pour schématiser de manière simple, mais pertinente, les options possibles de planification des infrastructures de transport. Cela étant, compte tenu des enjeux que représente cette planification d'un point de vue financier, ainsi que ses conséquences spatiales en termes d'inscription territoriale à long terme, de compétition entre les lieux et d'équité entre les villes, elle relève avant tout de choix politiques. En dehors de ces stratégies politiques, le développement d'un réseau de transport reste d'ailleurs extrêmement difficile à simuler de manière sérieuse. L'étonnante approche prospective proposée par R.L. Morill (1965) pour simuler la croissance d'un réseau de transport ferré complexe à partir de méthodes de Monte Carlo en Sicile et dans le centre de la Suède en témoigne. Dans ces régions de taille modeste, dont les réseaux restent assez simples, il a tenté de prédire la localisation des voies de chemin de fer à partir des caractéristiques géographiques de la région : la longueur, le nombre et l'extension des routes sont ici directement déduits de l'histoire régionale ou bien prédits à partir de diagnostics socio-économiques, selon une procédure en plusieurs étapes bien définies : (i) quantifier le poids économique d'une liste d'agglomérations majeures ; (ii) au sein de cette liste, sélectionner des agglomérations de manière aléatoire ; (iii) connecter les deux

plus importantes par une voie ferrée ; (iv) ajouter les autres liens de manière à ce que la prochaine « plus importante » soit reliée à la plus grande et à la plus proche déjà connectée au réseau. Si, après que toutes les villes ont été connectées, il reste des rails à poser, (v) les ajouter de telle sorte que le circuit soit complété entre la première, la deuxième et la troisième ville, et ainsi de suite pour la quatrième, la cinquième, etc. La carte du réseau peut au final être ajustée afin (vi) de simplifier le réseau obtenu et (vii) de tenir compte des formes du relief et de l'hydrographie locales. En conclusion, la méthode propose un programme très global et très bien séquencé auquel on peut croire, mais dont on peut également dès le départ supposer qu'à cette échelle, il ne correspondra pas à la réalité du fonctionnement des espaces socio-économiques, ni à la vision et aux impératifs politiques qui conditionnent des options d'aménagement aussi stratégiques que l'accessibilité des territoires.

Si cette remarque vaut pour des études censées poser le problème de manière rationnelle à partir d'hypothèses somme toute logiques quant à l'optimisation théorique des réseaux, il va sans dire qu'elle condamne immédiatement tous les essais méthodologiques qui vont dans le même sens, mais qui se fondent de surcroît sur des paradigmes complètement irréalistes. C'est notamment le cas de la proposition de Strano *et al.* (2012), pourtant publiée par *Nature*, qui étudie le lien entre le développement des réseaux viaires et les notions d'*exploration* et de *densification*, selon une approche quantitative (et plus ou moins organique) dont n'importe quelle étude de terrain montrerait sans difficulté qu'elle est probablement fallacieuse sur le plan des rapports de cause à effet qu'elle essaie de mettre en avant.

## 2. LES QUATRE ÉTAPES DU TRAFIC

Au-delà de la structure des réseaux de transport, les premières modélisations du trafic qui circule concrètement sur ces réseaux ont été élaborées dans les années 1950 et 1960 à partir d'une méthodologie désormais classique, dite à *quatre étapes* (Ortuzar et Willmussen, 1994). Historiquement, elles émergent en parallèle au développement du transport automobile et de la construction des autoroutes, sous l'impulsion de l'industrie automobile dont l'influence était croissante aux États-Unis comme en Europe. Bien que relativement sommaires et très agrégées au départ, elles se sont alors avérées utiles pour planifier les investissements d'infrastructures et pour envisager l'organisation de l'espace autour des flux et du trafic. Même si les modèles

inclus dans ce type de modélisations ont largement évolué, notamment pour mieux concevoir les mobilités individuelles et multimodales, la démarche reste globalement inchangée depuis l'origine. D'une manière ou d'une autre, elle consiste toujours à considérer la question du trafic en quatre étapes distinctes et successives : la génération des flux, leur distribution, la répartition des modes de transport et l'affectation sur les réseaux.

### *2.1. Génération et distribution*

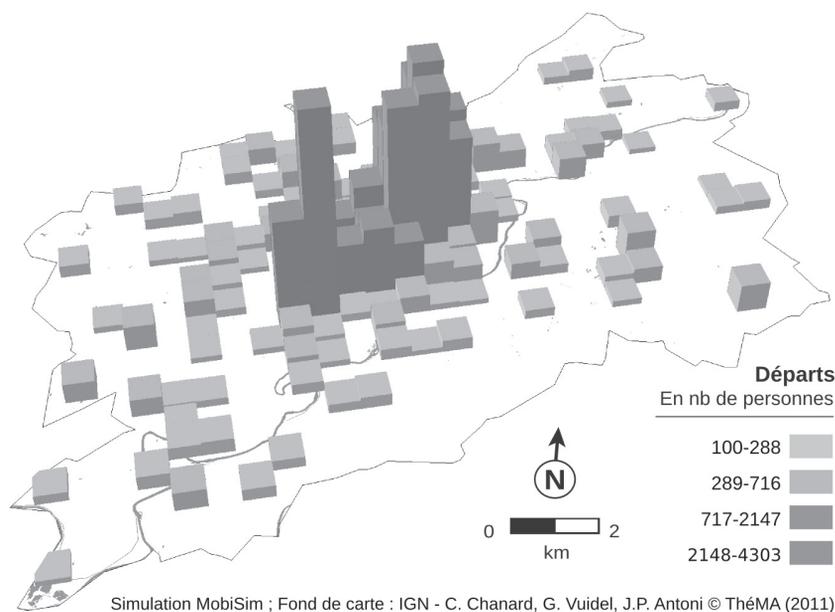
Déterminer le nombre de trajets qui seront effectués dans une région donnée passe généralement par la génération (ou la reconstruction) des déplacements entre les différentes zones qui constituent cette région. Intuitivement, il est d'ailleurs assez trivial de considérer que ces déplacements se répartissent d'emblée en deux catégories : (i) ceux que la zone émet (déplacements dont l'origine est située dans la zone), et (ii) ceux qu'elle attire (déplacements dont la destination est située dans la zone). Pour autant, l'identification concrète des origines et des destinations peut s'avérer délicate ; elle dépend souvent du motif pour lequel chaque déplacement est effectué. S'il est par exemple admis que, pour un déplacement entre le domicile et le lieu de travail, le nombre d'actifs par zone constitue une approximation raisonnable des émissions et que le nombre d'emplois dans ces mêmes zones est une estimation correcte des destinations, il est nettement plus délicat de reproduire ce raisonnement pour des mobilités plus complexes : que dire d'une personne qui profiterait du fait d'avoir déposé ses enfants à l'école pour acheter du pain à proximité de cette école, puis pour boire un café avec un ami sur le chemin du retour avant de rentrer chez elle en passant par le parc (satisfaction esthétique liée au paysage) plutôt que par la rocade comme à l'aller (satisfaction fonctionnelle liée à la vitesse) ? De même, comment définir précisément ces origines et ses destinations qui sont autant des lieux que des quartiers ou des éléments de réseaux ? Et comment comptabiliser le nombre de déplacements uniques effectués au final ? Il apparaît évident qu'une règle de comptage s'impose dès le départ. Dans la mesure où elle est fortement liée aux motifs de déplacements, la détermination de cette règle de comptage dépend fondamentalement des résultats que l'on souhaite obtenir à l'issue de la modélisation à quatre étapes.

Une question à peu près identique se pose également à propos de l'échelle de mesure des comptages. Mis à part le contre-exemple qu'illustrent quelques rares études réalisées à un niveau très agrégé,

c'est généralement l'échelle du ménage ou de l'individu qui est retenue comme unité de mesure de base. Fondamentalement, chacune de ces unités présente un certain nombre d'avantages et d'inconvénients qu'il est nécessaire, tant que faire se peut, de définir en fonction des objectifs du modèle. À l'heure actuelle, il semble que la grande majorité des études de mobilité focalisées sur l'origine des déplacements traite cette information à l'échelle des individus, dans une logique de désagrégation maximale qui s'accorde bien au potentiel offert par les *big data*. De même, dans le contexte d'une individualisation et d'une autonomisation croissante des pratiques de mobilité, l'évolution récente du cadre social et comportemental invite à focaliser les comptages sur les individus : la multiplication des moyens de locomotion personnels conduit en effet à ne plus considérer le ménage comme un élément structurant central de l'analyse des mobilités. De surcroît, les déplacements comptabilisés à l'échelle de l'individu sont souvent plus simples à expliquer que ceux qui relèvent de choix liés au ménage, plus complexes parce qu'ils intègrent une part de négociation et de contraintes inhérentes à la composition socio-familiale. Si l'on considère la modélisation comme un outil à la fois explicatif et prédictif, les comportements des ménages apparaissent en effet fondamentalement plus difficiles à prévoir que ceux des individus, en particulier si l'on part du principe économique que ces derniers sont rationnels et capables d'un « choix parfait ». Mais cette position reste une position rhétorique : elle ne change rien à la réalité des mobilités, qui n'échappent pas à une négociation intra-ménage. Elle permet simplement de mieux faire correspondre l'échelle de la mesure à la capacité de mettre en œuvre une modélisation cohérente vis-à-vis de ce que l'on pense avoir compris des stratégies individuelles de mobilité.

Fondamentalement, la modélisation à quatre étapes n'apporte donc aucune réponse à ces questions. Elle laisse les chercheurs et les décideurs libres de faire les choix liés à leurs objectifs. Mais quels que soient ces choix, à la fin de l'étape de génération, le nombre de déplacements est censé être estimé *depuis* et *vers* chaque zone de la région étudiée : c'est le principe de la méthode en elle-même. Ainsi, comme le montre la figure 6.3, la cartographie du nombre de départs dans chaque zone (ici des cellules de carroyage) pour le motif « travail » de la population active (ici calculé à différentes heures en fonction du programme d'activités complet des individus, puis réagrégées pour la journée entière) constitue un résultat de base pour construire les étapes suivantes.

Figure 6.3  
**Génération des départs quotidiens pour le motif « emploi »  
 dans les différentes zones (cellules de carroyage de 1 000 mètres)  
 de la communauté d'agglomération de Besançon**



La génération est effectuée à partir de la plateforme de simulation MobiSim en fonction du programme d'activités complet des individus, incluant des motifs de déplacement diversifiés (achats, loisirs, etc.). Les résultats sont calculés heures par heure, puis réagregés à l'échelle de la journée entière.

Source : Antoni *et al.*, 2011

Partant de ce premier résultat, la deuxième étape consiste à relier géographiquement les lieux d'origine et de destination les uns aux autres, généralement par une ligne droite. Cette opération produit naturellement un graphe relativement complexe, dans la mesure où il est fréquent que les flux émis par une zone (déplacements de travail par exemple) aient plusieurs zones de destinations (tout le monde ne travaille pas au même endroit) ; inversement, les employés d'une zone industrielle proviennent généralement de différentes communes périphériques. Comme c'est souvent le cas pour la représentation des flux, le graphe résultant de cette opération est donc difficile à cartographier et à lire. Il est dès lors plus commode de résumer cette distribution des flux dans un tableau appelé *matrice Origine-Destination (OD matrix)*. Dans une démarche à quatre étapes, la matrice Origine-Destination constitue le résultat essentiel de la distribution. Ce résultat ne doit tou-

tefois pas être considéré indépendamment de la génération du trafic (première étape) : la somme des valeurs que contient la matrice est logiquement censée correspondre aux émissions et aux attractions pour chaque zone, selon une condition que l'on qualifie de *contrainte à la marge*. Pour réaliser cette condition, il est possible de se fonder sur l'analyse de données de migrations spécifiques (enquêtes) ou sur une modélisation des processus qui sont censés les générer. L'analyse des données d'enquête révèle souvent une réalité identifiée depuis les hypothèses posées par E.G. Ravenstein (1885) pour l'étude théorique des migrations : les lieux les plus importants attirent plus que les lieux moins importants, mais cette attraction est inversement proportionnelle à la longueur des trajets nécessaires pour s'y rendre. Les destinations les plus lointaines sont en effet souvent les plus pénibles, même si cette pénibilité dépend des caractéristiques socio-professionnelles et des motifs de déplacement des individus. Pour quantifier cette variabilité, P. Bonnel (2002) a par exemple montré que, suivant les motifs, le calibrage des coefficients  $\alpha$  de la distance () suppose des valeurs différentes pour que la matrice corresponde aux données de mobilités obtenues par enquête (en l'occurrence l'Enquête Ménages Déplacement de l'agglomération lyonnaise). En particulier, les migrations domicile-travail semblent moins affectées par la distance que les déplacements d'achats ou de loisirs, généralement effectués dans des lieux plus proches du domicile. En d'autres termes, l'analyse fine des mobilités actuelles semble indiquer que les longues distances sont mieux acceptées pour aller travailler que pour acheter du pain, hypothèse que confirme également l'analyse socio-économique du marché de l'emploi. Pour tenir compte de l'ensemble de ces contraintes, il n'est donc pas étonnant que, pour construire une matrice origine-destination réaliste, la majorité des modèles de trafic recourent aujourd'hui à une logique gravitaire d'*interactions spatiales* pour calculer l'intensité des déplacements entre les lieux, en intégrant l'effet de la distance ou du temps comme une friction pour les mobilités les plus longues.

## 2.2. Choix modal et affectation du trafic

La génération et la distribution du trafic permettant théoriquement de savoir combien de personnes partent d'où pour aller où, elles conduisent également à se demander quelle est la probabilité que ces personnes utilisent un mode de transport ou un autre pour effectuer leur déplacement : c'est l'objectif de la troisième étape de la démarche à quatre étapes (Ortuzar et Willumsen, 1994). Cette troisième étape

est d'ailleurs également appelée *répartition* dans la mesure où elle vise concrètement à répartir les mobilités entre une série de modes de transport donnés et différenciés quant à leurs performances. D'un point de vue mathématique, elle consiste à « éclater » la matrice origine-destination issue de la distribution en autant de sous-matrices qu'il existe de modes de transport disponibles (Bonnell, 2002). Pour réaliser concrètement cette opération, la grande majorité des modèles de transport part aujourd'hui de l'hypothèse que trois variables expliquent fondamentalement les *choix modaux* : (i) les caractéristiques de chaque trajet exprimées en termes de pénibilité, de durée et de qualité, (ii) les caractéristiques des individus qui effectuent le trajet selon des contraintes qui leur sont propres d'un point de vue socio-professionnel ou socio-familial, et enfin (iii) l'offre de transport en elle-même, considérée mode par mode.

Tout d'abord, les caractéristiques de chaque déplacement sont considérées comme déterminantes du choix modal. Si l'on observe les origines et les destinations des mobilités au sein d'une aire urbaine ou d'un territoire régional, la répartition des flux montre en effet que, contrairement aux hypothèses simplistes posées par les premiers modèles économiques (Thünen par exemple), ils ne se répartissent pas de manière équiprobable dans l'espace, mais selon une logique de lignes radiales et/ou périphériques liée à la localisation géographique des principaux générateurs de mobilité. Généralement, ces flux sont plus réduits à mesure que l'on s'éloigne de ces générateurs, et l'offre de transport s'amenuise logiquement quand les flux deviennent périphériques (Bonnell, 2002). Ainsi, si un individu a théoriquement le choix entre différents modes pour se déplacer (marche à pied, vélo, automobile, transports en commun, etc.), sa localisation résidentielle et son lieu de destination concrets peuvent considérablement réduire cette offre supposée. Il n'est pas rare qu'au final, il n'y ait qu'un seul mode de transport qui réponde réellement à certains besoins. Comment utiliser les transports en commun s'ils ne desservent pas le point de départ ou le point d'arrivée (voire les deux) ? Comment privilégier quotidiennement la marche à pied quand l'origine et la destination sont à 25 kilomètres de distance ? À l'extrême, cette répartition locale de l'offre peut d'ailleurs conduire à une situation de *captivité* modale. En France, si la Loi d'orientation des transports intérieurs (LOTI) de 1982 précise « le droit qu'a tout usager de se déplacer et la liberté d'en choisir les moyens » afin de garantir théoriquement une certaine égalité spatiale ou sociale (Certu, 2008), il n'est pas rare que la dépendance à un mode de déplacement spécifique entraîne la captivité des individus à ce mode,

notamment dans les espaces ruraux ou périurbains lointains. Le choix modal correspond donc possiblement aussi à une absence de choix, notamment pour les transports en commun. Cette contrainte dépend des caractéristiques des réseaux en termes de déploiement et d'implantation des infrastructures, mais également des caractéristiques des individus.

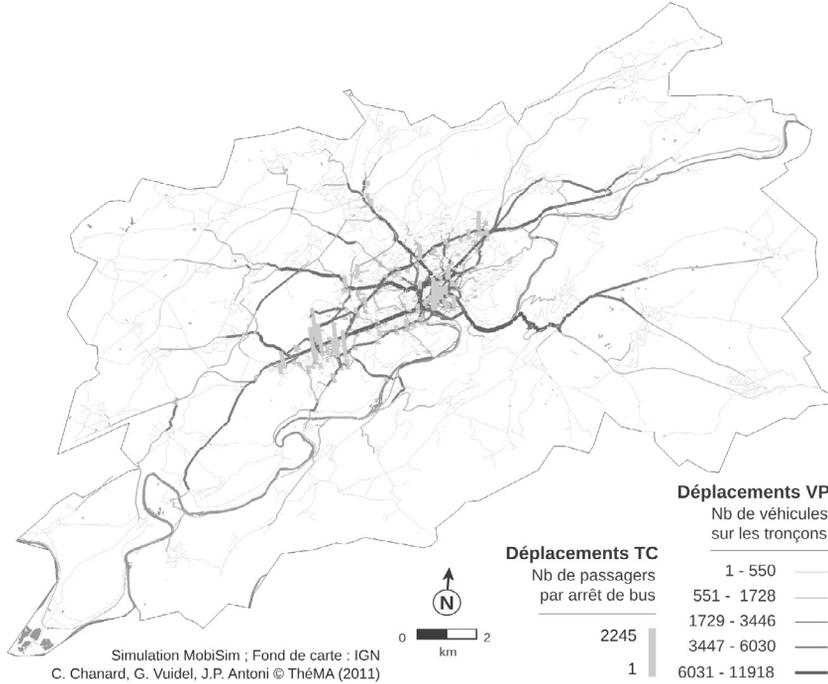
En effet, les caractéristiques de l'individu ou des ménages permettent d'identifier les catégories de population qui ne disposent que de peu d'alternatives : les mineurs qui n'ont pas le permis de conduire, les ménages qui n'ont pas de véhicule (Massot, Orfeuill, 2005), etc. Parallèlement, si la motorisation des ménages est un indice fondamental, le profil social des individus apparaît comme un révélateur plus subtil des pratiques modales. Le sexe, l'âge, la profession et la position au sein du ménage apparaissent souvent très structurants : ils conditionnent une partie des motifs des déplacements, ainsi que leur fréquence. Or, chaque mode de transport apporte une solution différente à chacun de ces motifs, solution qui se traduit par un confort différencié et susceptible de conduire à un choix. On constate par exemple que, pour une raison qui s'apparente aux notions de confort et de sécurité, l'automobile souvent est moins utilisée par les tranches de populations les plus âgées, alors que, pour une raison liée au statut social, les actifs des catégories socio-professionnelles intermédiaires et supérieures privilégient souvent l'automobile. De même, les personnes vivant seules ne recourent pas nécessairement à l'automobile, alors que, pour des raisons pratiques, elle est très fortement sollicitée par les ménages avec enfants.

Enfin, l'offre de transport doit également être évaluée par rapport à son *coût* et à son *temps*. Mais la notion de coût pose immédiatement la question de la perception qu'en ont les individus : le coût à prendre en compte n'est pas nécessairement le coût réel du déplacement mais plutôt le coût ressenti par la personne qui se déplace. L'automobile, par exemple, n'est souvent perçue que par les coûts de son usage direct (essence et éventuellement péages), sans intégrer les coûts indirects d'achats, d'amortissement, d'assurance, etc. (Raux, 2007). Parallèlement, la perception du temps des trajets est également difficile à quantifier : alors que les ruptures de charge (temps de marche ou d'attente aux arrêts des transports en commun) sont globalement toujours perçus comme pénibles, les temps de déplacement en eux-mêmes semblent être acceptés de manière variable selon les caractéristiques socio-professionnelles des individus : si un universitaire accepte de passer une partie de son temps dans les transports pour se rendre à Paris, ce n'est pas le cas d'un plombier

de province, qui refuserait de s'y rendre pour remplacer un évier. Le temps absolu n'est donc pas un facteur décisif du choix modal, et il peut être nécessaire de le définir par la notion de temps « pénibilisé ». Parallèlement, en ce qui concerne l'automobile, l'offre de stationnement constitue également une contrainte importante : les individus qui disposent d'une place de stationnement réservée (sur le lieu de travail ou au domicile) utilisent généralement plus facilement leur véhicule personnel que ceux qui sont contraints de se garer dans des secteurs où les places sont rares et chères (Kaufmann *et al.*, 2001). Le *temps pénibilisé*, tout comme le stationnement, font partie des critères de l'offre de déplacement, et ils sont rarement pris en compte de manière objective par les individus. Au-delà du temps et du coût, qui sont les critères évalués depuis le plus longtemps, de nombreuses études tentent aujourd'hui d'évaluer le poids du confort, de la promiscuité, de la sécurité ou de la fiabilité des modes de transport pour le choix du moyen avec lequel on effectue concrètement un déplacement, mais rares sont les études qui permettent aujourd'hui de quantifier l'importance de chacun de ces critères.

On pourrait multiplier l'étude des facteurs qui influencent le choix modal, notamment d'un point de vue psychologique. La considération d'un phénomène tel que l'*habitude* semble par exemple expliquer de nombreuses routines et montrer que la répartition entre les modes ne découle pas nécessairement d'un choix au sens rationnel du terme (Buhler, 2015). À notre connaissance, elle n'est pas encore intégrée dans les modèles à quatre étapes, qui se focalisent généralement sur des déterminants plus simples, plus tangibles et plus aisés à quantifier d'un point de vue méthodologique. Méthodologiquement, en effet, la question qui se pose au final reste de savoir comment synthétiser cet ensemble de facteurs pour les transformer en une probabilité de recourir à un mode de transport plutôt qu'à un autre. Techniquement, la majorité des modèles recourent à la notion de *coûts généralisés* puis aux modèles de choix discrets. La notion de coûts généralisés correspond à un équivalent monétaire de l'ensemble des contraintes associées à un déplacement, et peut être différenciée selon les modes de transport et la catégorie socio-professionnelle ou socio-familiale des individus, en incluant le prix (du billet ou du carburant), le temps, la vitesse, le confort, etc., des trajets (Crozet, 2005). Elle permet donc de comparer les avantages et les inconvénients de chaque mode pour chaque parcours et chaque individu, ce qui permet à ce dernier d'opérer un choix rationnel en minimisant son utilité pour le transport (modèle *logit*).

Figure 6.4  
**Affectation du trafic quotidien sur le réseau routier  
 et de transport en commun de l'agglomération  
 de Besançon pour le motif emploi**



Le nombre de véhicules (VP) est représenté par la largeur des tronçons de routes, et le nombre de passagers des transports en commun (TC) par des barres verticales indiquant le nombre de montées et de descentes à chaque station.

Source : Antoni *et al.* (2011)

Le choix modal étant connu à l'issue de la troisième étape, la quatrième et dernière étape de la modélisation du transport consiste à déterminer concrètement l'itinéraire que choisiront les usagers pour se rendre de leur lieu d'origine à leur lieu de destination. Ce choix est évidemment contraint par le mode de déplacement choisi à l'étape précédente : si l'automobile laisse un choix important à son conducteur, le public captif des transports en commun est contraint de suivre les lignes définies par l'opérateur du service. Pour les transports publics, l'affectation des passagers sur le réseau est donc relativement simple, et relève d'une opération identique à celle que fournissent la majorité des compagnies de transport pour calculer le chemin le plus rapide permettant de relier une station à une autre en laissant le choix de quelques préférences (trajet direct uniquement, optimisation du temps, du type

de véhicules, etc.). Pour les véhicules individuels circulant sur le réseau routier, le choix d'itinéraire est en revanche plus complexe. Il relève en général d'un calcul du plus court chemin (en distance, en temps, ou en coût) : en partant du principe que tous les individus sont omniscients et perçoivent de manière similaire et complète une offre d'itinéraires disponibles au sein de laquelle ils sont *a priori* capables d'identifier les plus courts ou les plus rapides, l'opération s'appuie généralement sur un simple calcul algorithmique dit « de détermination de l'arbre le plus court », dont le plus connu et le plus utilisé est certainement celui qui a été mis au point par l'informaticien néerlandais Edsger Dijkstra (1930-2002) en 1959.

À travers ces quatre étapes, la modalisation du trafic initiée dans les années 1960 jette donc la base de la modélisation des mobilités dans les systèmes de transport. À l'heure actuelle, elle fait toutefois l'objet d'un certain nombre de critiques, même si ces dernières restent difficiles à dépasser, tant d'un point de vue conceptuel que technique (Masson, 1998). Sur la forme, il est principalement reproché aux modèles à quatre étapes (i) de manquer de cohérence d'ensemble dans la mesure où, à chaque étape, la demande de déplacements est analysée différemment, selon des points de vue qui ne sont pas toujours strictement comparables pour les quatre étapes du modèle, et (ii) de ne pas assez prendre en compte les interactions entre le transport et l'usage des sols ainsi que les processus rétroactifs (remise en compte de la causalité uni-directionnelle d'une étape sur l'autre). Parallèlement, (iii) la séquentialité en quatre étapes n'est pas forcément la plus réaliste dans le parcours d'un individu et on pourrait imaginer inverser certaines étapes : si je vais au cinéma en tram, est-ce parce que j'ai choisi le tram comme le mode de transport le plus commode pour m'y rendre (la distribution précède le choix modal) ou est-ce que j'ai choisi ce cinéma parce que justement, il était desservi par le tram (le choix modal précède la distribution) ? Enfin, (iv) les modèles à quatre étapes agrègent souvent les données selon un critère géographique, ce qui contribue à modéliser des comportements « moyens » qui masquent l'hétérogénéité et la diversité des comportements réels des individus et des ménages. Ce dernier point pose à nouveau la question de l'agrégation ou de la désagrégation des données, ainsi que de l'échelle et du niveau de mesure qui conditionnent fondamentalement les résultats de n'importe quel type de modèle appliqué à la question de l'aménagement du territoire.



## Troisième partie

# **Approches méthodologiques : les réductions**

Cette troisième partie est consacrée aux réductions, celles des approches méthodologiques permettant concrètement de traiter un problème d'aménagement du territoire, mais impliquant de ce fait nécessairement aussi d'en diminuer la valeur pour « forcer » sa correspondance avec la méthode. Ce forçage est analysé en *decrecendo* selon trois aspects : (i) celui des chiffres, qui correspond globalement à l'acquisition de données et à leur analyse statistique, (ii) celui des images, qui s'associe au corpus de la cartographie, de la télédétection et des SIG, et (iii) celui de la complexité, qui apparaît théoriquement comme le plus abouti, mais qui reste difficile à appréhender d'un point de vue pratique, même si les outils informatiques de l'intelligence artificielle (automates cellulaires, systèmes multi-agents, réseaux de neurones) contribuent aujourd'hui à y aider. L'approche statistique apporte par exemple des outils extrêmement efficaces pour étudier la distribution et la répartition d'une variable ou pour tester la force des liens qu'elle entretient avec d'autres variables. Elle permet ainsi de comprendre et d'identifier des liens qui ne sont pas toujours indépendants des relations de voisinage et de leur répartition dans l'espace (auto-corrélation). Cette identification se révèle commode pour analyser les territoires et poser des hypothèses sur leur fonctionnement. Elle permet également d'y extrapoler certains phénomènes dans le futur, et d'en prédire la « suite », en construisant des scénarios ou en s'appuyant sur un prolongement de tendance qui peut être représenté et communiqué par l'intermédiaire d'une carte servant d'appui graphique aux débats et à la prise de décision. Mais le problème de réduction ré-apparaît immédiatement lorsque l'on tente de cartographier ce que l'on pense avoir compris de la réalité des territoires : ici aussi, il

est important de manipuler les chiffres en présentant objectivement la situation de manière démonstrative, et en évitant autant que possible de « faire mentir les cartes ».

Dans ce contexte, l'approche par les chiffres n'est pas toujours aussi explicative qu'elle peut le paraître au premier abord : le principe de « l'erreur écologique » rappelle par exemple que corrélation ne signifie pas nécessairement causalité, et que la nature des relations spatiales peut fortement dépendre de l'échelle à laquelle on se place pour mesurer, analyser et représenter les processus que l'on cherche à comprendre. La recherche en aménagement du territoire, en économie, en géographie, en psychologie ou en sciences de l'environnement tente évidemment de privilégier les approches causales. Ainsi, par exemple, si la théorie micro-économique de l'utilité permet effectivement de mesurer statistiquement la satisfaction qui découle de l'obtention d'un bien ou d'un service, cette relation trouve immédiatement une limite dans le *paradoxe de Saint-Petersbourg* : pourquoi, alors que l'on peut mathématiquement montrer qu'une situation est grandement profitable, certains acteurs refusent-ils de s'y investir ? En réalité, le problème ne relève pas simplement des statistiques, mais bel et bien du comportement des acteurs et des usagers du territoire face à une situation qui contient une part d'aléatoire, et qui peut de ce fait engendrer une posture de blocage. En conséquence, de nombreuses décisions, dont on pourrait montrer qu'elles sont raisonnables, ne sont concrètement jamais prises par les décideurs, et encore moins par les usagers de l'espace pour définir leurs choix de localisation résidentielle et leurs stratégies de mobilité. Mais, à partir d'une approche quantitative bien établie d'un point de vue conceptuel, les modèles statistiques et l'intelligence artificielle permettent néanmoins de définir de « bonnes » solutions parmi un nombre déterminé d'alternatives possibles, afin de satisfaire au mieux les objectifs de la planification et du développement durable des territoires. Ces prédictions ne sont que des réductions par rapport à la réalité du raisonnement des usagers d'un système de transport, des préférences résidentielles des ménages qui cherchent à déménager, ou de promoteurs immobiliers qui visent à maximiser leurs gains en lotissant des terrains à construire. Dans le cadre d'un problème bien identifié, elles peuvent néanmoins suffire à résumer le problème et à le traiter en bonne gouvernance.

## L'approche par les chiffres

*« Faites attention, la statistique est toujours  
la troisième forme du mensonge »*

Jacques Chirac

L'approche par les chiffres est une première forme de réduction, celle qu'imposent l'acquisition de données et leur étude statistique. Elle vise à collecter un jeu d'informations cohérentes, puis à les analyser objectivement, en mesurant leurs similarités, leurs différences, leur dispersion et leurs relations, afin de mieux comprendre les interactions qu'elles entretiennent et éventuellement d'en prolonger les tendances vers le futur. L'échantillonnage et les techniques d'enquêtes constituent de ce fait un préalable souvent indispensable pour l'aménagement du territoire, actuellement confronté à l'émergence des *big data*. Même si ces méthodes, qui s'appuient fortement sur les mathématiques, peuvent sembler rébarbatives par leur dimension technique, et même s'il est clair que l'on ne peut pas toujours leur faire pleinement confiance, l'approche par les chiffres n'en reste pas moins robuste et efficace, ce qui la rend indispensable, et parfois même relativement intuitive : les méthodes de corrélation développées par Bravais (1846) et Galton (1888), par exemple, mises au point pour répondre à des questions appliquées dans des domaines très concrets, ont été généralisées bien avant que l'enseignement de la statistique et des mathématiques ne se diffuse massivement. Il n'y a donc pas de raison pour que cette généralisation ne s'applique pas également aux problématiques concrètes de l'aménagement du territoire, même si l'exercice demande parfois un petit effort d'abstraction.

### 1. L'ACQUISITION DES DONNÉES

L'acquisition de données adéquates au traitement d'un problème d'aménagement constitue en elle-même un problème, tant pour l'analyse

que pour la visualisation ou la modélisation des répartitions ou des processus que l'on souhaite étudier. À ce sujet, on peut d'ailleurs théoriquement estimer que n'importe quel type d'analyse est possible si l'on dispose des données adéquates. Mais, dans la pratique, ces données ne sont que très rarement immédiatement disponibles dans le bon format, et ne peuvent souvent être acquises que par l'intermédiaire d'enquêtes spécifiques. L'acquisition de données constitue de ce fait une étape fondamentale mais parfois chronophage, d'autant plus importante qu'elle conditionne, dès le départ, la nature des hypothèses qui pourront être posées et la qualité des résultats escomptés.

### 1.1. Les sources de données

Pour comprendre le problème des données tel qu'il se présente dans les études d'urbanisme et d'aménagement du territoire, il peut être intéressant de le décomposer en quatre sphères qui peuvent sembler proches, mais qu'il est fondamentalement nécessaire de distinguer : (i) les données standard qui apportent une vision globale du terrain d'étude, (ii) les données de calibrage qui permettent de l'envisager d'un point de vue dynamique, (iii) les données de validation indispensables à l'évaluation des résultats et des hypothèses, et (iv) les données de scénario indiquant comment y implémenter concrètement un projet d'urbanisation ou y projeter une politique de transport.

Premièrement, la sphère des *données standard* constitue un jeu de données indispensable pour construire ce que l'on appelle l'état initial du territoire, notamment dans les documents réglementaires d'urbanisme et d'aménagement. Elle intègre des informations relativement basiques qui concernent autant l'espace administratif et ses découpages (département, communes, quartiers, etc.) que la population et ses caractéristiques socio-démographiques (structure familiale, parc de logements, motorisation, etc.) et économiques (nombre d'emplois et catégories professionnelles, niveau de revenu, etc.) ou encore les flux et la structure des réseaux de communication (migrations domicile-travail, types de routes) et l'occupation du sol (zones urbanisées, terrains agricoles, zones industrielles, espaces forestiers, etc.). En France, les données commercialisées par l'Institut géographique national (IGN) et par l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE) fournissent globalement l'ensemble de ces données de manière précise et détaillée. Toutefois, si ces informations sont souvent relativement complètes, il est rare qu'elles couvrent d'emblée l'ensemble des thématiques indispensables à l'étude des territoires, notamment quand cette étude concerne les mobilités. La structure des

transports en commun, par exemple, en particulier les réseaux de bus et de tram, n'y sont pas recensés, ni d'un point de vue spatial (lignes et arrêts), ni d'un point de vue temporel (heures et/ou fréquence des passages). De la même manière, pour des raisons liées à la protection de la vie privée, les informations concernant la population ne sont quasiment jamais livrées à l'échelle des individus, mais agrégées dans des espaces suffisamment vastes pour que ces derniers ne puissent pas être identifiés. Si cette agrégation est légitime, elle pose néanmoins la question de savoir comment débiter une étude à partir des caractéristiques individuelles des personnes si l'on ne dispose pas au départ d'informations à cette échelle. Une solution qui tend aujourd'hui à se généraliser consiste à recourir à une *population synthétique*, notamment pour les études fondées sur la microsimulation ou la modélisation par agents (*agent-based*). Une population synthétique apparaît alors comme une population artificielle d'agents (à distinguer des individus réels) construite à partir de données agrégées en les redistribuant à l'échelle des individus selon différentes méthodes : échantillonnage itératif (Beckman *et al.*, 1996), méthode de Monte-Carlo (Münnich et Schürle, 2003), analyse en composantes principales (Banos, 2010), probabilités conditionnelles (Mathis, 2006 ; Antoni et Vuidel, 2010). Ces deux exemples montrent que, malgré la mise à disposition par les services de l'État de données standard complètes, il est souvent nécessaire de les modifier, de les compléter et de les adapter spécifiquement au problème à traiter, ce qui, dans de nombreux cas, constitue une opération longue et fastidieuse.

Deuxièmement, la sphère des *données de calibrage* contient des informations qui ne sont plus uniquement statiques, mais qui intègrent une partie des dynamiques du territoire, notamment lorsqu'elles décrivent les comportements et les pratiques des individus et des ménages. Pour la question des mobilités en France par exemple, l'Enquête ménages-déplacements (EMD) est une procédure d'acquisition de données spécifique, orchestrée par les services du ministère de l'Environnement, qui recense des informations diverses sur la dimension spatio-temporelle des trajets des ménages, les distances qu'ils parcourent, les modes de transport qu'ils choisissent, etc. De par leur nature et leur complexité, elles sont donc rarement accessibles « partout » et « tout le temps », et découlent en partie de démarches *ad hoc*, à la demande des collectivités locales par exemple (CERTU, 2013). Parallèlement, la littérature scientifique et la littérature grise apportent également leur lot de données et de connaissances : la compulsion d'articles, d'études et de rapports permet de construire des listes et des bases de données dans des domaines divers et quasiment inépuisables.

Dans le cas de l'étude des mobilités résidentielles, par exemple, des dizaines d'articles internationaux renseignent sur les préférences résidentielles des ménages : quelle est la valeur de la proximité à un arrêt de transport en commun, à un espace vert, à une rocade autoroutière, etc. ? Cet exemple montre qu'il n'est jamais complètement impossible de trouver les informations dont on a besoin. En revanche, elles sont souvent livrées dans des formats bruts, qui nécessitent d'être uniformisés pour être comparés, et desquels il faut extraire précisément les seules variables véritablement utiles pour le problème à traiter. Ici encore, l'opération peut s'avérer longue et fastidieuse.

Troisièmement, dans le cas où l'étude envisage ou nécessite de recourir à la modélisation de processus spatiaux, le recours aux *données de validation* apparaît primordial pour garantir la qualité du modèle. Elle doit en effet permettre de mesurer les écarts entre les résultats obtenus (simulés par le modèle) et la réalité observée. Il apparaît de ce fait fondamental que ces données de comparaison ne soient pas les mêmes que celles qui ont servi au calibrage ou à la construction de l'état initial du territoire. Cette différenciation permet en effet d'éviter ce que l'on appelle l'*effet cerceau*, c'est-à-dire un raisonnement circulaire qui consiste à intégrer au départ dans le modèle ce que l'on entend justement prouver en l'utilisant. En d'autres termes, les données de validation permettent d'éviter que l'on ne tourne en rond et que le serpent ne finisse par se mordre la queue. Cette distinction, qui peut sembler anodine et triviale *a priori*, relève en fait du principe épistémologique de la méthode de la découverte scientifique en elle-même, telle qu'elle a été décrite par Karl Popper (1937).

Enfin, la sphère des *données de scénarisation* est probablement la plus complexe à acquérir. Elle ne contient pas véritablement de données, mais s'apparente à un recueil d'informations liées au réalisme des scénarios à simuler et à la dimension technique et opérationnelle des infrastructures et des politiques qu'ils nécessitent de développer. En effet, si la modélisation concerne avant tout les modélisateurs, la mise en place des scénarios à simuler est souvent préparée par les édiles et les décideurs dans un contexte de planification spatiale plus ou moins politique. Ainsi, c'est bien la consultation de ces édiles et des experts qui les accompagnent, qui peut conduire à la construction de ces informations, informations qu'il sera ensuite nécessaire de convertir en données quantifiées, en paramètres ou en couches spatiales compatibles avec un SIG. Cette conversion constitue d'ailleurs à la fois une force et une difficulté de la modélisation (et, de manière plus générale, des approches quantitatives). Si l'on prend l'exemple *a priori* simple du test d'un péage urbain et de son impact sur les

mobilités quotidiennes et résidentielles, il est nécessaire de définir de nombreux « détails » complémentaires. Sur quels tronçons faut-il le mettre en place ? Quels sont les véhicules concernés ? Pour quelles tranches horaires est-il opérationnel ? Quelle en est la tarification ? Est-elle dégressive ? etc. Fondamentalement, ces données de scénarisation démontrent que la modélisation nécessite de faire des choix très concrets, et que ces choix (correspondant globalement à des règles ou des paramètres) impliquent finalement les utilisateurs des modèles bien plus qu'un simple discours verbal ou écrit.

Ces quatre sphères permettent de considérer la question des données en aménagement de manière plus ou moins globale. Mais elles sont aujourd'hui confrontées à des mouvements rapides dans les logiques de production de l'information, dont les *big data* sont certainement l'expression la plus emblématique. Sur le plan des données spatiales, elles s'accompagnent d'opérations majeures de construction de bases de données fondées sur le *crowdsourcing*, c'est-à-dire sur une production participative et volontaire par un grand nombre d'individus, qui répertorient des informations géographiques jusqu'alors collectées par les collectivités territoriales ou les services de l'État (*Volunteer Geographic Information* ; Goodchild, 2007). À l'instar de l'*OpenSource* pour le développement de solutions logicielles, le projet *OpenStreetMap* (Bennett, 2010) apparaît comme un exemple particulièrement prometteur. Initié en 2004 à l'University College de Londres, *OpenStreetMap* utilise les capacités informatiques d'Internet comme une plateforme permettant de renseigner des informations géographiques, mais également de corriger ou de documenter celles qui y sont déjà référencées. L'objectif final vise à créer une carte numérique libre de droits (donc gratuite) du monde entier, et à la distribuer dans un format numérique standardisé compatible avec la structure des SIG. En quatre ans, près de 30 % de l'Angleterre ont ainsi été numérisés et mis en ligne, avec une qualité proche de la référence que constitue l'*Ordnance Survey* (Haklay, 2010). En France, la qualité variable d'*OpenStreetMap* (géométrie, informations attributaires, précision sémantique, exhaustivité) montre que l'hétérogénéité des processus et des échelles d'acquisition pose encore quelques questions, et qu'un équilibre reste à trouver entre la liberté des contributeurs à numériser ce qu'ils souhaitent et le respect de spécifications générales pour leur cohérence globale (Girres et Touya, 2010). On retrouve donc ici les éléments d'un débat que l'on a déjà connu au début des années 2000 lors du lancement de l'encyclopédie participative Wikipédia, dont la qualité a longtemps été suspectée de faire défaut ou de dissimuler des partis pris. Comme pour Wikipédia, on peut néanmoins croire qu'après la stabilisation

de sa méthodologie de production, *OpenStreetMap* sera en mesure de généraliser la livraison de données de grande qualité, comme c'est actuellement déjà le cas pour de nombreux territoires (en particulier les grandes villes). Couplée à l'émergence des *big data*, cette généralisation devrait alors contribuer à modifier en profondeur la question des données, et à ouvrir des possibilités jusqu'alors inédites pour traiter les problématiques d'aménagement du territoire.

### 1.2. Les enquêtes et les relevés

Malgré des sources relativement abondantes, précises, et parfois libres d'exploitation, l'absence de données adéquates au traitement d'une question spécifique peut conduire à effectuer des enquêtes ou des relevés (donc à mener un travail de terrain) afin de réunir des informations adaptées à la problématique à traiter (et inexistantes par ailleurs). Même si elle est parfois longue et difficile à mettre en œuvre (et qu'elle peut de ce fait s'avérer très onéreuse), l'enquête est d'ailleurs souvent le seul moyen d'y parvenir, ce qui justifie son usage fréquent en sciences sociales, en particulier en sociologie, en psychologie, en économie et aujourd'hui en géographie (Goeldner-Gianella et Humain-Laboure, 2010). Au sens strict, enquêter signifie en effet « interroger un certain nombre d'individus en vue d'une généralisation » (Blanchet *et al.*, 2013). Très limitative, cette définition généraliste est également retenue par N. Berthier (2016), qui élimine *de facto* du domaine toutes les études de documents (études de traces telles qu'elles sont pratiquées par les historiens), les observations directes telles qu'elles existent par exemple en ethnologie ou en anthropologie, ainsi que les expérimentations de laboratoire ou de terrain. L'enquête consisterait donc uniquement à susciter et à recueillir un ensemble de « discours » individuels, qu'il s'agit ensuite d'interpréter et de généraliser. Dans son sens scientifique courant, l'enquête s'intéresse donc avant tout aux personnes. Mais, en aménagement et dans les disciplines spatiales en général, il n'est pas rare que les individus soient remplacés par des lieux ou des véhicules, et le discours par des relevés ou des comptages, selon une méthodologie commune qui consiste à obtenir des informations sur des sujets, des endroits ou des objets, en mettant l'enquêteur en *contact direct* avec son « terrain d'étude ». On retrouve donc ici une définition classique des dictionnaires courants et des films policiers : « enquêter, c'est recueillir des renseignements sur une question à résoudre ». La nécessité d'une collecte spécifique avec des techniques précises peut, de ce fait, prendre plusieurs formes et cherche systématiquement à répondre à plusieurs questions (Cauvin *et al.*, 2008).

Premièrement, la question « Qui ? » est fondamentale : *pour qui* et dans quel but fait-on une enquête ? *Par qui* sera-t-elle concrètement passée ? Et finalement à *qui* pose-t-on les questions auxquelles on cherche à répondre ? Cette dernière question correspond au choix des individus enquêtés, et constitue un point fondamental puisqu'il conditionne en grande partie la validité des résultats par la sélection d'un échantillon représentatif : un *à qui ?* mal choisi peut conduire à des résultats totalement erronés. La deuxième question est certainement la question « Où ? », qui renvoie elle aussi à plusieurs sous-questions : le *où* peut être *d'où ?* (lieux de résidence ou de travail des enquêtés, origine des déplacements d'une population, etc.), ou *où (tout court) ?* (on s'interroge sur des lieux et/ou sur des personnes qui se rendent dans les lieux), etc. La question « Quand ? » peut, quant à elle, concerner deux choses : (i) le moment où se fait l'activité sur laquelle porte l'enquête ou (ii) le moment durant lequel elle se déroule. La première est directement liée aux objectifs de l'enquête (choix modal en fonction des heures de la journée par exemple) alors que la seconde dépend de l'enquête en elle-même : pour recueillir des informations sur le recours aux aménités (commerces et services par exemple) ou sur la congestion, il est important de situer les individus à différents moments de la journée pour identifier une modification de comportements entre les heures calmes et les heures de pointe. Enfin, la question « Comment ? » est étroitement liée à la question « Quoi ? » : il existe dans ce domaine une panoplie d'outils à la disposition des chercheurs et des décideurs, mais chaque instrument a un but particulier et des incidences spécifiques qu'il est important de connaître pour procéder à un choix cohérent et justifié en fonction des hypothèses de départ.

P. Frankhauser *et al.* (2012) ont tenté de lister ces instruments. Au-delà, des protocoles classiques tels que les entretiens, les questionnaires (comprenant des questions ouvertes ou fermées) ou l'observation du comportement, ils préconisent également des méthodes plus spécifiques et plus novatrices qui permettent de construire des bases de données sur la mobilité des individus et leurs représentations spatiales. La figure 7.1 liste la performance et les faiblesses de ces différentes méthodes, en indiquant la qualité des informations qu'elles permettent de recueillir. Ainsi, par exemple, les parcours commentés (enregistrement et analyse des commentaires d'un individu sur un itinéraire donné) permettent de comprendre l'impact affectif de l'environnement sur l'individu (Amphoux, 2001), alors que les cartes mentales (qui rendent compte des représentations de l'espace perçu et vécu ainsi que de son utilisation) sont utiles pour comparer la localisation et les caractéristiques des lieux que les individus fréquentent régulièrement, ou au contraire qu'ils

évitent (Gärling et Friman, 2002). Dans le même ordre d'idées, le « jeu de reconstructions spatiales » (Ramadier et Bronner, 2006) est plus original, et donc également plus difficile à mettre en œuvre : il consiste à positionner des objets représentant certaines aménités urbaines ou rurales (maisons d'habitation, commerces, végétation, etc., fabriqués en bois et reliés les uns aux autres par des fils de laine) sur un plan, et permet aux « joueurs » de reconstruire leur environnement (quartier, village), en vue d'une analyse simultanée de leurs représentations (repères et connaissances du voisinage) et de la structure spatiale (agencement spatial des éléments) qu'ils reproduisent (ou re-construisent). Même si elle reste rare, cette approche par le « jeu » (jeu sérieux ou *serious game*) semble aujourd'hui efficace pour lever un certain nombre de verrous liés aux artefacts d'une interrogation trop directe par questionnaire, et apparaît particulièrement cohérente quand elle est utilisée pour comprendre les déterminants économiques des choix de localisations des ménages et des entreprises. L. Denant-Boemont et S. Hammiche (2013) recourent, par exemple, à l'économie expérimentale et au jeu de rôle (les individus jouent un rôle en laboratoire et sont rémunérés en fonction de leur décision d'investir un lieu ou un autre pour localiser leur entreprise ou leur appartement) afin de mesurer l'impact théorique des coûts de transport sur la structure urbaine d'agglomérations plus ou moins polycentriques, et finalement de mieux comprendre les processus d'enchère foncière qui s'y mettent en place.

Quels que soient les instruments choisis pour réaliser l'enquête, on ne peut toutefois faire abstraction de points de vue très généraux sur l'exercice. Pour certains, l'enquêteur qui met en œuvre chacune de ces techniques est neutre et totalement objectif par nature (position qui se rattache au courant positiviste), alors que pour d'autres la réalité n'est jamais extérieure au sujet qui l'examine et il existe toujours une « relation » plus ou moins biaisée entre le sujet et l'objet qu'il observe (courant phénoménologique). En conséquence, par sa simple présence, l'enquêteur influencerait les résultats (interactions observé-observateur) de son enquête, avec une intensité variable en fonction de la méthode qu'il emploie (figure 7.1). Une solution pour contourner ce problème consiste désormais à remplacer l'enquêteur par une machine, sans que l'on sache vraiment si cette dernière est réellement plus neutre : l'usage d'Internet pour poser massivement des questions ciblées par l'intermédiaire de sites dédiés à cet objectif (construction d'enquêtes en ligne proposées par exemple par *limesurvey*, *keysurvey* ou *onlinesurvey*), comme le développement d'applications spécifiques pour téléphones portables, sont des solutions émergentes qui s'apparentent sur de nombreux points à la question des *big data*.

Figure 7.1  
**Performances et faiblesses des méthodes d'observation**

	Fréquentation de lieux	Références collectives (représentations)	Expériences vécues	Raison de l'action	Emotions	Arbitrage	Satisfaction	Passage à l'acte	Interactions observé - observateur	Précision de l'information	Certitude de l'information
Praxéologie (observation directe)	●	●	●	○	○	○	○	●	--	--	++
Cartes mentales / Jeu de reconstruction spatiale	●	●	●	○	○	●	○	○	-	+	-
Parcours commenté	●	○	○	○	●	○	●	○	+	+	-
Carnet de bord	●	●	○	●	●	○	○	●	+	+	+
Enquête	●	●	●	●	●	●	●	●	+	+	-
Entretien	●	●	●	●	●	●	●	●	++	++	-

Les techniques permettant de collecter des informations qui ne sont pas disponibles dans des bases de données standard sont nombreuses. Dans cet ensemble, les choix se justifient par les buts de l'enquête eux-mêmes (question à laquelle on cherche à répondre), mais également par la disponibilité des moyens techniques permettant de les mettre en œuvre.

Source : Frankhauser *et al.* (2012)

Dans la mesure où elles s'appliquent à des objets ou à des lieux et non à des individus, les techniques de relevés sont moins sensibles au problème des artefacts, mais relèvent globalement des mêmes questionnements que pour les enquêtes. Parmi ces questionnements, la question de l'échantillonnage apparaît fondamentale. La manière la plus commune de comprendre les enjeux de l'échantillonnage est de se référer aux sondages électoraux : à quelques jours, voire à quelques heures du scrutin, il est souvent possible de connaître avec une précision très fine les scores finals, en se basant sur le sondage de quelques milliers de votants seulement sur plusieurs millions. Le choix de cet échantillon de votants est évidemment crucial et doit tenir compte de la représentativité des opinions à une échelle large, en incluant la pluralité des opinions mais également des localisations géographiques : on imagine mal construire une statistique sérieuse en interrogeant uniquement les habitants du 20<sup>e</sup> arrondissement de Paris ou ceux de la Côte d'Azur. Statistiquement, trois questions se posent pour effectuer correctement cette sélection : (i) comment choisir

l'échantillon, (ii) quelle est sa taille optimale, et (iii) quelle confiance peut-on lui accorder pour témoigner de l'opinion générale ?

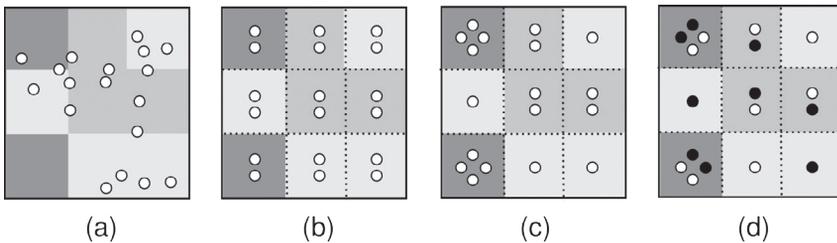
Dans le cas d'un échantillonnage aléatoire (figure 7.2(a)), le choix des individus est entièrement confié au hasard, comme si l'on tirait des noms d'un chapeau ou si l'on sélectionnait des lieux en suivant les gouttes de pluie qui tombent sur une carte. Le choix des individus n'est donc ni commandé ni influencé par les besoins de l'étude. Mais deux critères doivent être respectés : (i) chaque individu doit avoir une chance égale d'être tiré au sort et (ii) la sélection d'un individu ne doit pas influencer la probabilité qu'un autre individu le soit. Cette double contrainte semble triviale en apparence, mais pose un certain nombre de questions pratiques. En effet, si l'on cherche à sélectionner 50 personnes sur un total de 200, toutes ont au départ une probabilité de  $1/200 = 0,005$  d'être choisies. Mais dès que le premier individu est sélectionné et, en quelque sorte, sorti du chapeau, cette probabilité tombe automatiquement à  $1/199$ , et ainsi de suite. Le dernier individu sélectionné le sera donc avec une probabilité de  $1/151 = 0,0066$ , soit un rapport nettement supérieur à celui du premier. Mathématiquement, ce problème est incompressible si le tirage au sort est effectué sans remise. En revanche, si les individus sont « remis » dans le chapeau à l'issue de chaque sélection, la probabilité reste inchangée à  $1/200$ . Mais il devient dès lors possible qu'un individu soit sélectionné à plusieurs reprises, voire que le même individu soit sélectionné à chaque fois, ce qui introduit un nouveau biais dans l'échantillon. Une des solutions pratiques à ce problème consiste à utiliser une table des nombres aléatoires, calculés à partir d'un programme informatique, de manière à ce que chaque paire de chiffres ait une probabilité d'occurrence identique. Rien n'empêche toutefois qu'*in fine* tous les individus sélectionnés habitent le 20<sup>e</sup> arrondissement de Paris ou la Côte d'Azur.

Dans le cas d'un échantillonnage systématique (figure 7.2(b)), le choix des individus est effectué avec régularité de manière uniforme à partir du nombre total, de manière à éviter la double sélection d'un individu, ainsi que les effets de groupes qui pourraient apparaître pour un échantillonnage aléatoire. Dans le cas d'une approche spatialisée, on utilise par exemple une grille au sein de laquelle un individu est tiré au sort dans chaque cellule ; il est donc certain qu'ils ne seront pas tous localisés au même endroit. Pour autant, rien ne prouve réellement que la méthode produise un échantillon représentatif et non biaisé de la population totale. Il apparaît en effet immédiatement que la méthode n'accorde pas la même chance de sélection à tous les individus. Si l'on propose, par exemple, de sélectionner 10 % des individus d'une liste qui en

contient 100, en en prenant systématiquement un tous les dix à partir du premier (1, 11, 21, 31, etc.), chacun de ces éléments aura une probabilité de 1 d'être sélectionné, et les 90 % restants une probabilité nulle. Cette façon de faire présente l'avantage d'être plus rapide à mettre en œuvre qu'un tirage aléatoire, mais ne permet pas nécessairement de construire un jeu d'inférence fiable avec l'ensemble de la population sondée. Il est possible, suivant la population considérée, qu'elle introduise des biais importants, qui fausseront considérablement les résultats finals.

Figure 7.2

### Différentes possibilités d'échantillonnage



(a) échantillonnage aléatoire lorsque le choix des individus est entièrement laissé au hasard ; (b) systématique lorsqu'ils sont sélectionnés de manière uniforme pour éviter les doubles sélections et les effets de groupe ; (c) spatial quand la sélection varie selon les lieux pour tenir compte des distributions géographiques ; (d) stratifié si l'on souhaite sélectionner des individus au sein de groupes significatifs qui doivent être équitablement représentés par l'échantillon.

L'échantillonnage spatial (figure 7.2(c)) part quant à lui du principe que les informations que l'on souhaite collecter varient selon les lieux, et tente de tenir compte de leur distribution spatiale dès la constitution de l'échantillon. Cela étant, toutes les informations ne sont pas mesurables de la même manière dans l'espace : certaines sont des points alors que d'autres se réfèrent à une surface. Comme dans les deux méthodes précédentes, il faut ici opposer un échantillonnage spatial aléatoire à un échantillonnage spatial systématique, la seule différence étant que l'on sélectionne des points ou des entités au sein d'une surface continue et non des éléments discrets dans une liste. Dans le premier cas, on peut par exemple tirer au hasard les coordonnées  $X$  et  $Y$  des espaces qui seront sélectionnés ; dans le second, on peut poser une grille dont on sélectionne les intersections ou les centroïdes des cellules du territoire étudié. Une telle grille reste cependant délicate à dessiner dans la mesure où sa taille doit être adéquate pour respecter un bon espacement entre les lieux, mais également un nombre correct de lieux. Le danger est de manquer intégralement certains éléments si ces derniers se trouvent « en phase » avec une grille qui passe systématiquement à

côté, même si ce risque peut apparaître mineur par rapport à ceux que comportent des méthodes d'échantillonnage non spatialisées.

Enfin, l'échantillonnage stratifié (figure 7.2(d)) est employé pour sélectionner des individus au sein de groupes significatifs de taille connue qui composent la population totale, lorsqu'il est souhaitable que chacun de ces groupes soit équitablement représenté par l'échantillon. Pour ce faire, il est indispensable de s'assurer que chaque groupe soit représenté proportionnellement à la population totale (par exemple : 25 %, 50 % et 25 %). Si l'on considère par exemple une zone rurale au sein de laquelle on trouve alternativement des fermes très productives et des unités agricoles à bas rendement, il est important d'affecter les densités de population, les résultats économiques et les modes d'habitat de façon différenciée. Mais, dans ce cas, comment choisir un échantillon qui tienne compte simultanément de l'ensemble des différences mentionnées ? Une solution consiste à construire un *échantillon stratifié* : si un tiers de la zone rurale est improductif et que les deux autres tiers sont productifs, alors un tiers de l'échantillon sera extrait de la partie improductive et les deux autres tiers de la partie productive, de manière à ce que l'échantillon reste conforme aux caractéristiques et aux variations spatiales du terrain.

Pour conclure, il faut encore signaler que l'ensemble de ces subtilités n'est valable que dans un cas « particulier ». En effet, la détermination et la taille d'un échantillon se fondent systématiquement sur l'hypothèse d'une population distribuée selon une *loi normale*. C'est à partir de cette loi que la taille minimale d'un échantillon peut être calculée pour estimer une moyenne et un écart-type correspondant à la population d'origine selon un intervalle de confiance correct. Or, même si cette loi correspond à de nombreux cas de figure observés, rien ne prouve qu'elle s'applique au cas particulier que l'on souhaite tester, ce qui pose à nouveau un problème fondamental à tester. Le reste ne relève plus de choix, mais simplement de la méthodologie des statistiques. Cette méthodologie est d'ailleurs aujourd'hui confrontée à de nouveaux questionnements pour l'analyse et la sélection de données : ceux qu'implique la généralisation des *big data*.

### 1.3. Les big data

L'expression *big data*, péniblement traduite en français par « méga-données » ou « données massives », désigne l'ensemble gigantesque de données recueillies par le biais des nouvelles technologies, et dont la quantité est telle qu'elles ne peuvent plus être traitées de manière cohérente et globale à l'aide d'un système de gestion de base de données

classique ou d'un tableur (Batty, 2013). Au sein de cet ensemble, il serait concrètement possible de distinguer trois catégories (Kitchin, 2013, 2014) : (i) les données issues d'une manifestation active, mais parfois inconsciente ou involontaire, des utilisateurs de certains dispositifs, (ii) les données générées par un enregistrement automatique au sein duquel l'utilisateur n'est ni actif ni volontaire, et (iii) les données recueillies volontairement (*volunteered data*) par des utilisateurs/producteurs par le biais d'Internet, des réseaux sociaux, ou dans le cadre plus structuré d'une production participative d'informations (*crowdsourcing*). Globalement, on associe donc les *big data* à l'ensemble des informations enregistrées par les navigateurs de recherche sur Internet (Google), par les réseaux sociaux (Facebook, Twitter), les téléphones mobiles, la billetterie électronique (trains, avions, transports en commun, vélos en libre-service, etc.), les portiques (péages autoroutiers), les caméras de surveillance, les sites collaboratifs (OpenStreetMap), etc. Généralement, ces données recensent une information spatio-temporelle, dans la mesure où elles sont localisables dans l'espace (les lieux à partir desquels elles sont émises ou reçues) et dans le temps (le moment de la journée ou de l'année auquel elles sont produites).

Par définition, il est donc plus ou moins évident que les *big data* constituent une source de données possiblement révolutionnaire pour les chercheurs, les acteurs et les décideurs qui s'intéressent à la répartition des phénomènes permettant de mieux comprendre les dynamiques territoriales et les comportements spatiaux. Elles ont notamment l'avantage d'une représentativité considérable (quasi exhaustive), et on peut aujourd'hui les considérer non pas comme une simple image (statique), mais véritablement comme un film (dynamique) en temps réel pour l'observation des territoires, qui apportent des informations d'un genre nouveau que les enquêtes classiques peinent souvent à révéler. Les *big data* couvrent, de surcroît, des domaines extrêmement variés qui vont des pratiques spatiales aux relations sociales, en passant par les usages d'Internet et l'utilisation des équipements urbains. Si l'on considère les objets connectés comme des sources d'enregistrement qui tendent à se généraliser, elles s'ouvrent désormais aux questions de la santé, de l'environnement, de l'habitat et de l'énergie. Les applications connectées de domotique et les *smart grids*, qui n'en sont aujourd'hui encore qu'à leurs prémices opérationnels, constituent par exemple un enjeu qui ne vise pas uniquement une recension des pratiques, mais également une optimisation généralisée du fonctionnement des systèmes énergétiques, à partir de l'enregistrement et de la mise en commun des pratiques individuelles. Pour M. Goodchild (2007), nous serions donc bien face à un réseau potentiel de six milliards de capteurs humains au sein duquel

chacun peut apporter une information locale continue. Cette perspective fait naturellement émerger une nouvelle relation à la question des données, dans la mesure où l'utilisateur n'est plus uniquement un consommateur d'informations, mais en devient également producteur et diffuseur. À différentes échelles, les *big data* semblent donc indéniablement ouvrir de nouvelles pistes collaboratives pour comprendre les processus qui servent de ressorts à l'aménagement des territoires (Pumain, 2014).

Aujourd'hui, les *big data* apparaissent cependant avant tout comme un défi, qui pose encore de nombreuses questions. D'un point de vue technique, leur exploitation complète nécessite par exemple de renouveler conceptuellement les solutions informatiques permettant de les stocker, de les gérer et finalement de les analyser. Dans le monde de l'informatique, la structure SQL (*Structured Query Language*), majoritairement utilisée pour la gestion des données « classiques », apparaît en effet plus ou moins obsolète face à la nature même des *big data* ; et, même s'il semble que le système NoSQL (*Not only SQL*) puisse y apporter des compléments intéressants, il est encore loin d'être maîtrisé par les utilisateurs potentiels. D'un point de vue institutionnel également, les *big data* posent des questions : elles font émerger de nouveaux acteurs dans la production d'une information longtemps réservée aux services de l'État, aux instituts de sondages ou au monde de la recherche (par l'intermédiaire des enquêtes notamment). On considère que plus de 80 % des *big data* sont actuellement collectées et stockées par le biais d'applications propriétaires qui appartiennent au domaine privé et aux grandes entreprises, qui sont, de ce fait, les seules à y avoir pleinement accès. Or, il est encore rare que la recherche en sciences sociales liée aux problématiques de l'aménagement du territoire (sociologie, psychologie, géographie, économie) soit intégrée dans ces entreprises, ce qui pose immédiatement la question de savoir *qui a les moyens de travailler sur quoi*.

Pour autant, si l'accès aux données massives du domaine privé reste problématique, l'acquisition de *big data* « publiques » progresse également. Les bases de données volontaires et collectives (*crowdsourcing*), dont OpenStreetMap constitue une référence efficace en termes d'information géographique, proposent une alternative bénévole, et souvent militante, aux données privées (Audard *et al.*, 2014). Elles font néanmoins toujours face à une double limite, celle de leur harmonisation (l'acquisition de données produit-elle toujours des résultats comparables ?) et de leur validation (l'acquisition a-t-elle toujours été faite consciencieusement ?).

Parallèlement, en réponse à la « désinstitutionnalisation » de la production d'informations spatio-temporelles sur les territoires, le concept de *smart city* (Hollands, 2008 ; Townsend, 2014) apporte également une

réponse partielle. Théoriquement, une *smart city* (littéralement « ville intelligente ») est en effet une ville dont le fonctionnement durable d'un point de vue économique, social et environnemental reposerait presque intégralement sur les technologies de l'information et de la communication (TIC). Son « informatisation » (Dupuy, 1992) quasi totale permettrait alors de généraliser à tous les domaines le principe des *smart grids* actuellement développé pour la gestion intégrée de la production et de la consommation énergétique : gestion de l'eau, des télécommunications, des transports, des services d'urgence, des équipements publics, des bâtiments, des déchets, etc. Même si le concept relève souvent, avant tout, d'une stratégie de *marketing territorial* pour les villes qui déclarent s'engager dans cette voie, voire d'une nouvelle utopie urbaine, il est indéniablement rendu possible, du moins en partie, par le développement de dispositifs techniques de plus en plus performants et de plus en plus englobants dans tous les domaines du développement urbain (capteurs sans fil, détection automatique des fuites, gestion intégrée de l'éclairage public, poubelles « intelligentes », contrôle du trafic routier et optimisation automatique des transports publics, etc). Dans ce domaine, le projet coréen d'*U-city* (*ubiquitous city*) (Shin, 2009 ; Jang et Suh, 2010) apparaît d'ailleurs particulièrement novateur : il vise une connexion totale des bâtiments, des rues et des espaces urbains par le biais d'écrans et de capteurs qui permettraient d'en fluidifier et d'en faciliter le fonctionnement, en même temps qu'ils deviendraient une source encore plus massive d'enregistrement de *big data*. Au-delà du bénéfice qu'elle peut apporter à la population qui l'habite, une *smart city* devrait donc également permettre aux acteurs publics de (re)centraliser les données produites sur leurs territoires, en s'affranchissant des initiatives issues du monde privé. Associés l'un à l'autre, les concepts *big data* et *smart city* offrent aujourd'hui un cadre de réflexion pertinent et intéressant pour anticiper les attentes socio-économiques, voire environnementales, à partir d'une analyse mesurée et tangible, même si leur enregistrement dans des bases de données gigantesques invite immédiatement à se demander ce qu'elles permettent de conserver de la vie privée des individus.

À court et à moyen termes, il est toutefois fort probable que les *big data* ne fassent absolument pas disparaître le recours aux techniques classiques d'enquêtes et de relevés. Au minimum, elles pourront temporairement s'insérer dans les dispositifs établis, au sein desquels elles constitueront des informations complémentaires qui permettront, peut-être, par leur dimension quasi exhaustive, d'en enrichir certains points et d'en réduire certaines faiblesses. La question de savoir comment articuler ces deux catégories de données reste quant à elle actuellement en suspens.

## 2. L'ANALYSE DES DONNÉES

L'analyse des données est l'opération finale qui justifie leur acquisition, indépendamment de la manière avec laquelle elles ont été acquises. Cette analyse prend généralement son sens grâce à l'emploi de techniques statistiques, qui, par définition, visent justement à analyser mathématiquement et à interpréter la distribution d'à peu près n'importe quel type de données (qualitatives ou quantitatives) à travers des indicateurs synthétiques et des graphiques. Pour de nombreux auteurs, les statistiques apparaissent donc avant tout comme une branche des mathématiques. Mais pour d'autres, en particulier dans le monde anglo-saxon (Cleveland, 2001), elles constituent désormais une discipline à part entière qui entrerait dans le champ des sciences des données (*Data Science*) et consisterait véritablement à en extraire une *connaissance*, en recourant notamment à l'informatique pour traiter de grands volumes d'informations.

### 2.1. Statistiques univariées

D'un point de vue historique, les statistiques reposent sur un corpus relativement ancien : la théorie des probabilités. Selon les historiens des sciences et les mathématiciens, le problème posé par Antoine Gombaud (1607-1674), chevalier de Méré et écrivain français, à Blaise Pascal (1623-1662) en est l'une des premières illustrations. Réputé grand joueur auprès de la cour du roi, il en vint à lui poser la question suivante : lorsqu'on lance plusieurs fois quatre dés, « combien faut-il de coups au moins pour qu'on puisse parier avec avantage que, après avoir joué ces coups, on aura amené sonnez » (ce qui signifie aujourd'hui avoir fait un « six ») ? Mathématiquement, le problème est relativement simple :

$$\left(\frac{5}{6}\right)^4 = \frac{625}{1296} \simeq 48.23\%$$

En d'autres termes, la chance de tomber sur 5 des 6 faces des 4 dés est de 48,23 %, ce qui ramène la chance de tomber sur une de ces faces (en l'occurrence le 6), et donc de gagner, à 51,77 %. Comme le signale P. Deheuvels (1996) ces deux probabilités sont très proches l'une de l'autre ; on ne peut donc pas être assuré de gagner en ne lançant qu'une fois les dés. Sur un grand nombre de parties, en revanche, le calcul mathématique montre que l'on peut espérer gagner : c'est justement ce que suggère la notion d'*espérance mathématique*, définie comme la valeur que l'on s'attend à trouver, en moyenne, si l'on répète un grand

nombre de fois la même expérience. Elle apparaît comme l'une des conséquences de la loi des grands nombres.

En statistiques, la *loi des grands nombres* a été initialement définie par le physicien suisse Jacques Bernoulli (1654-1705), probablement avant 1700. Elle exprime le fait que les caractéristiques d'un petit nombre d'expériences ou d'observations aléatoires se rapprochent d'autant plus de ce que l'on peut en montrer statistiquement que le nombre de ces expériences ou de ces observations augmente. Ainsi, comme l'a fait remarquer le mathématicien russe Andreï Kolmogorov (1903-1987) : « la valeur épistémologique de la théorie des probabilités est fondée sur le fait que les phénomènes aléatoires engendrent, à grande échelle, une régularité stricte, où l'aléatoire a, d'une certaine manière, disparu ». L'expérience de l'*aiguille de Buffon*, mise au point par Georges-Louis Leclerc de Buffon (1707-1788) en 1733, permet de s'en convaincre. Après avoir tracé des lignes parallèles sur le sol en s'assurant qu'elles soient toutes séparées par une même distance appelée  $d$ , elle consiste à jeter par terre des aiguilles dont la longueur est inférieure à  $d$ , puis à compter le nombre de ces aiguilles qui intersectent les lignes parallèles. Si l'on mesure la fréquence moyenne des intersections pour un nombre important d'aiguilles, on tombe sur un chiffre qui converge vers 3,14159... soit la valeur de  $\pi$ . Pour le commun des mortels, l'expérience de Buffon relève tout bonnement d'un tour de magie ; pour les statisticiens, c'est simplement un exemple concret d'application de la loi des grands nombres, pour lequel il est facile de donner une explication mathématique.

La loi des grands nombres n'est pas la seule règle statistique qui semble tirée du chapeau. Au début du 19<sup>e</sup> siècle, la *loi normale*, que l'on appelle également loi gaussienne ou de Laplace-Gauss, est définie par Carl Friedrich Gauss (1777-1855) dans le cadre de la « théorie des erreurs », avec la méthode des moindres carrés, et par Pierre Simon Laplace (1749-1827) à travers un premier énoncé du théorème central limite. La loi normale permet de résumer de nombreuses distributions statistiques observées par une représentation graphique commune et très simple, qui prend la forme d'une courbe « en cloche », dite aussi courbe gaussienne. Pour illustrer son apport, on peut recourir à l'exemple dit de la *planche de Galton*. Mis au point par Francis Galton (1822-1911), il s'agit d'un dispositif constitué d'une planche plantée de clous, sur laquelle on fait rouler des billes, de telle sorte qu'elles passent soit à gauche soit à droite de chaque rangée de clous. À chaque « étage » elles ont deux possibilités : droite ou gauche. Après plusieurs « étages », leur parcours devient donc aléatoire. En bas de la planche, des petits casiers permettent de récupérer et de compter les billes à

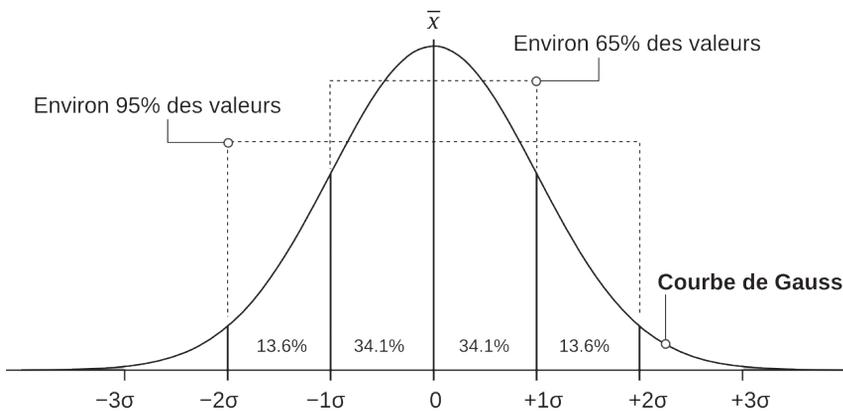
l'endroit où elles sont finalement arrivées. Lorsque le nombre de billes est grand, leur répartition dans les casiers suit approximativement la courbe de la loi normale (figure 7.3), qui en résume la distribution. Sous certaines conditions, la loi normale correspond ainsi au comportement de nombreuses expériences aléatoires similaires ; elle permet alors de modéliser des jeux de données extrêmement variés, mais également de les caractériser par l'intermédiaire d'indicateurs et de tester certaines de leurs propriétés statistiques.

Parmi ces indicateurs, ceux de la statistique dite descriptive sont nombreux (Grais, 2000). Il s'agit par exemple d'indices de tendance centrale simples comme le *mode* (valeur la plus représentée), la *médiane* (valeur permettant de couper la distribution en deux parties égales, l'une supérieure à la médiane, l'autre inférieure), et évidemment la *moyenne*, c'est-à-dire la valeur identique que devraient prendre toutes les valeurs pour que leur somme totale reste inchangée. Même s'il reste extrêmement simple, le calcul de la moyenne peut faire l'objet de subtilités relativement complexes qui, dans certains cas, peuvent amener à privilégier une moyenne géométrique, harmonique ou quadratique. La moyenne géométrique reste cependant la plus classique et la plus utilisée : dans le cas d'une loi normale parfaite, elle est théoriquement égale au mode et à la médiane. L'ensemble de ses règles de calcul est généralement bien décrit dans n'importe quel manuel de statistiques.

Mais, dans tous les cas, si ces valeurs centrales ont l'avantage de résumer une distribution de données en un seul chiffre, elles ont également l'inconvénient d'en masquer la distribution réelle : l'altitude moyenne de la France, par exemple, est de 356 mètres, mais aucune région, aucun département ni aucune commune ne se situe véritablement à cette altitude. Il en est de même pour la densité moyenne de population, établie à 112 hab/km<sup>2</sup>, alors que celle de l'Île de France avoisine les 995 hab/km<sup>2</sup> et celle de la Corse n'atteint pas 40 hab/km<sup>2</sup>. Outre le fait que ces chiffres nécessitent de couper des habitants en petits morceaux pour être calculables, ils ne représentent finalement pas grand-chose de la réalité du territoire. Les exemples présentés ci-dessus permettent de s'en rendre compte de manière triviale, mais la remarque s'applique de la même façon à toutes les études statistiques fondées sur des moyennes, et dont on peut se poser la question de la représentativité qu'elles donnent aux phénomènes étudiés : quel est le sens d'une durée moyenne de déplacement domicile-travail (alors que certains habitent « sur » leur lieu de travail et que d'autres le rejoignent en métro ou en train) ? Celui d'une accessibilité moyenne à l'emploi (alors qu'on ne se rend pas

quotidiennement dans *tous* les lieux d'emploi mais uniquement dans *son* lieu d'emploi) ? D'une densité urbaine (alors que la ville est faite autant de bâtiments haussmanniens, que de grands ensembles et de maisons individuelles) ? Cette remarque ne signifie pas que la moyenne (et avec elle l'ensemble des indices de tendance centrale) est un mauvais indicateur, mais simplement qu'elle doit obligatoirement être couplée avec d'autres indicateurs, indiquant la forme de la distribution des variables.

Figure 7.3  
**Loi normale**



La loi normale permet de résumer de nombreuses distributions statistiques observées par une représentation graphique commune et très simple, qui prend la forme d'une courbe de Gauss. Les lignes verticales indiquent les écarts-types : près de 65 % des valeurs se situent dans un intervalle de  $-1\sigma$  à  $+1\sigma$ , et plus de 95 % se situent entre  $-2\sigma$  et  $+2\sigma$ .

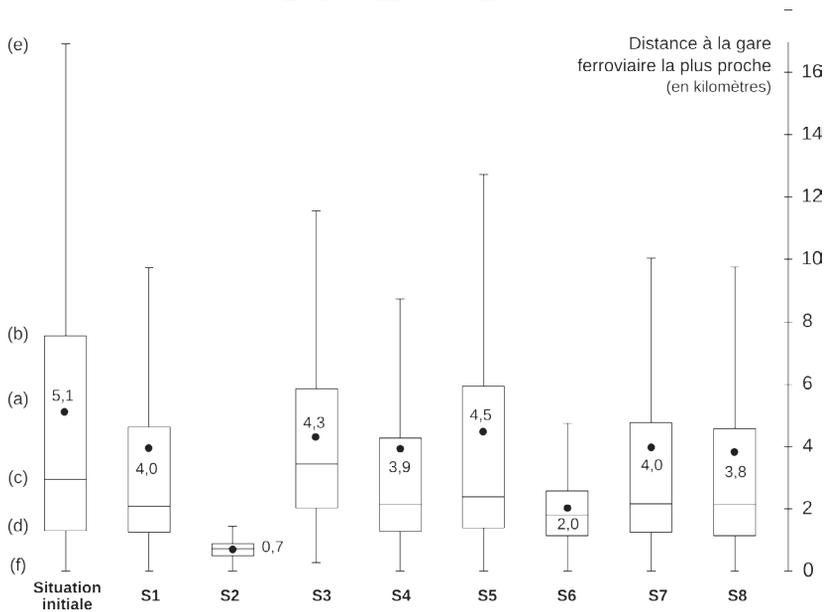
Les indicateurs de forme et de dispersion sont également nombreux et relativement bien connus : variance, écart-type, entendue (ou amplitude), coefficient de variation (etc.) peuvent être calculés rapidement dans quasiment tous les logiciels de statistiques. Parmi ces indicateurs, l'écart-type est probablement le complément le plus intéressant de la moyenne. Dans une certaine mesure, pour les études qui relèvent des problématiques de l'aménagement du territoire, on pourrait même dire que le couple « moyenne + écart-type » est généralement suffisant pour témoigner correctement de la distribution statistique d'une variable. Pour une variable  $x$  donnée, l'écart-type est en effet défini comme la racine carrée de la variance, et la variance comme la moyenne des carrés des écarts à la moyenne. La racine n'a pas ici d'autre but que d'annuler les carrés servant au calcul de la variance, carrés qui apparaissent eux-mêmes également très artificiels, dans la mesure où ils servent simplement à annuler la compensation que les valeurs positives pourraient avoir sur les valeurs négatives, et

inversement, par rapport à la moyenne  $x$ . La complexité apparente de la formule est donc avant tout liée à un artifice technique :

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}$$

L'écart-type permet ainsi de mesurer la dispersion d'un ensemble de données : plus il est faible, plus les valeurs sont regroupées autour de la moyenne (et donc homogènes au sein de la distribution) ; plus il est fort, plus les valeurs sont dispersées autour de la moyenne (et donc hétérogènes au sein de la distribution). Cette dispersion peut alors être généralisée si la distribution suit une loi normale : on sait en effet par définition que, dans le cas d'une courbe de Gauss, près de 65 % des valeurs se situent dans un intervalle de  $-\sigma$  à  $+\sigma$ , et plus de 95 % se situent entre  $-2\sigma$  à  $+2\sigma$  (figure 7.3).

Fig. 7.4  
**Boîte à moustaches**



Une boîte à moustaches regroupe six informations statistiques complémentaires dans une seule représentation graphique : la moyenne (a), les trois quartiles (b,c,d) dont le second (c) est la médiane, les valeurs maximale (e) et minimale (f).

Sur cette figure, huit scénarios de développement résidentiel sont comparés à la situation actuelle du Luxembourg selon un critère spécifique : la distance à la gare. Le scénario S2 couple une approche *Transit oriented development* et une urbanisation fractale simulée à l'aide du logiciel Mup-City.

Source : Frémond, 2015

En complément, dans la logique de la courbe de Gauss, la représentation graphique de données statistiques univariées permet également de faire comprendre certains résultats « en un coup d'œil ». Au même titre que les cartes, ces graphiques appartiennent à la famille des images, et sont plus utiles pour communiquer des ordres de grandeurs que des valeurs exactes. Ils prennent des formes diverses et variées, dont S. Rimbert (1964) a présenté une excellente synthèse, en même temps qu'elle en a précisé les règles de construction, selon des exigences sémiologiques partagées avec la cartographie : diagrammes en bâton (sur lesquels la hauteur informe de la répartition entre les différentes catégories), diagrammes circulaires (ironiquement appelés camemberts en France) dont l'amplitude des angles exprime des pourcentages, histogrammes représentant une variable continue (et qui sont souvent confondus avec les diagrammes en bâton, selon une erreur fréquente consistant à oublier que ce ne sont pas leurs hauteurs qui sont proportionnelles à la variable, mais bien leurs surfaces), etc. Parallèlement à ces graphiques que l'on peut considérer comme classiques, la « boîte à moustaches » (selon la terminologie française utilisée pour désigner ce que les Anglo-Saxons appellent *box-plot*) est plus complexe et constitue un premier élément pour l'analyse exploratoire de données. Proposée par le statisticien J. Tukey (1977), une *boîte à moustaches* concentre en effet six informations fortement complémentaires dans une présentation graphique qui reste facile à lire (figure 7.4) : la valeur minimum de la variable, ses trois quartiles , , , sa valeur maximum et sa moyenne. La valeur du deuxième quartile correspond à la médiane et divise la série de données en deux de manière à ce qu'il y ait autant de valeurs en dessous qu'au-dessus ; le premier quartile partage le groupe du haut en deux ensembles égaux et le troisième partage le groupe du bas en deux parties égales. Encore peu intégrée dans les logiciels de bureautique, et de ce fait trop peu fréquente dans les études liées aux problématiques d'aménagement du territoire et de mobilité, la boîte à moustaches constitue une modalité de représentation qui gagnerait probablement à être plus utilisée car elle permet de mettre en évidence de manière assez complète la dispersion d'un jeu de données sur la base de calculs qui restent simples à réaliser et à comprendre.

## 2.2. Statistiques multivariées

Contrairement aux statistiques univariées qui ne s'intéressent qu'à une seule variable à la fois, les statistiques multivariées ont pour objectif de mesurer les liens entre plusieurs variables. Elles sont appelées *inférentielles* lorsqu'elles se fixent pour objectif de réaliser des inférences

et des prédictions à partir des données rassemblées, de tester des hypothèses en comparant des moyennes ou des variances (test  $t$  de Student et analyse de variance) ou encore de vérifier le lien entre des variables (corrélation et régression). Pour en comprendre le principe, on peut revenir sur la notion d'échantillonnage en se posant les questions suivantes : quelle est la probabilité que les résultats obtenus à partir d'un échantillon soient similaires à ceux que l'on observe dans la population totale ? Quelle est la probabilité qu'une valeur mesurée par la moyenne soit réellement observée dans cette population ? Et, si l'on construit plusieurs échantillons à partir d'une même population, quelle est la probabilité que leur moyenne soit identique ? En d'autres termes, quelle confiance peut-on accorder à ces réductions ? La réponse à cette question peut être statistiquement mesurée au sein d'un intervalle, que l'on nomme justement « intervalle de confiance ».

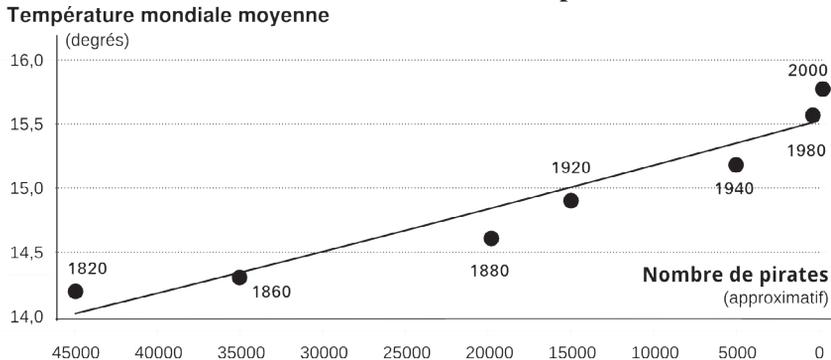
Concrètement, l'*intervalle de confiance* permet d'estimer la probabilité que la moyenne observée dans la population totale se retrouve avec 95 % de chance dans un échantillon (ou avec un autre pourcentage selon le test que l'on effectue). Pour s'en assurer, on pose avant tout l'hypothèse que la distribution suit une loi normale. L'étendue de l'intervalle de confiance peut alors être estimée à partir de l'écart-type de la distribution des moyennes pour l'ensemble des échantillons puisque l'on sait, par définition, que 95 % des moyennes sont à peu près comprises entre  $-2\sigma$  et  $+2\sigma$  autour de la moyenne des moyennes (figure 7.3). C'est sur cette base qu'est par exemple construit le test  $t$  de Student qui permet de déterminer si les moyennes doivent être considérées comme identiques (elles décrivent la même population) ou différentes (elles décrivent des populations différentes). Le test  $t$  de Student a été mis au point par le statisticien anglais William Gosset (1876-1937) en 1908 pour répondre à cette question. Il s'agissait alors de contrôler la qualité de la production des fûts de bière au sein de la brasserie Guinness à Dublin (la méthode est publiée sous le pseudonyme de Student afin d'éviter qu'elle ne parvienne trop rapidement aux mains de la concurrence). Le test sera par la suite généralisé et popularisé par Ronald Fischer (1890-1962), aujourd'hui considéré comme l'un des pères fondateurs de la statistique moderne. Son principe est le suivant : si la différence observée entre deux moyennes est improbable, on conclura que les deux échantillons (deux fûts de bière) sont bien issus de la même population (il s'agit bien de Guinness). Dans le cas contraire, on conclura qu'un élément exogène, à définir et à expliquer, est intervenu pour créer cette « différence » entre les moyennes et que les deux échantillons ne peuvent pas être considérés comme issus de la même population (la bière n'est pas une « vraie » Guinness). Dans la

mesure où il permet de tester cette hypothèse statistique sur à peu près n'importe quel type de variables, le test de Student est aujourd'hui très utilisé pour valider de nombreux échantillons de population, mais également pour tester les coefficients issus d'une régression linéaire.

La *régression linéaire* est l'une des méthodes fondamentales des statistiques multivariées ; elle fait partie des plus utilisées dans quasiment toutes les disciplines disposant de données quantitatives. Historiquement, elle a été élaborée par Francis Galton pour justifier son point de vue darwiniste sur la sélection naturelle, en étudiant la diminution (en fait la « régression ») de la taille des individus de génération en génération. Les statistiques devaient ainsi permettre de prévoir les évolutions à venir des espèces, et de les définir par une série de corrélations, elles-mêmes mesurées à travers un modèle de régression linéaire. Ce genre de modèle statistique consiste en effet à résumer la liaison entre deux variables à l'aide d'une droite (donc d'un ajustement linéaire). Ses paramètres sont alors définis de manière à ce que l'erreur entre la droite et la véritable répartition des variables l'une par rapport à l'autre soit la plus petite possible. Mathématiquement, cette minimisation est calculée par la méthode dite des *moindres carrés*, qui consiste à minimiser la somme de toutes les erreurs, après que ces dernières ont été passées au carré (artifice technique identique à celui de l'écart-type pour éviter la compensation des variables positives et négatives). La droite de régression (figure 7.5) résultant de cet ajustement est alors associée à un *coefficient de corrélation* (noté  $r$ ) qui permet d'en déterminer la qualité globale. Si la droite représente parfaitement la liaison entre les variables, le coefficient de corrélation est égal à  $+1$  (les variables sont fortement liées et évoluent dans le même sens) ou à  $-1$  (elles présentent également un lien fort mais évoluent dans le sens inverse) ; si la liaison est très mauvaise, en revanche,  $r$  est égal à  $0$  (les variables n'ont alors statistiquement aucun lien l'une avec l'autre). Définie de la sorte par Galton, la notion de corrélation sera formalisée mathématiquement par Karl Pearson en 1896, ce qui permettra d'en estimer la grandeur. Elle sera ensuite introduite en économie, puis dans l'ensemble des sciences sociales quantitatives, à partir des publications d'Arthur Bowley (1869-1957), notamment *Elements of Statistics* (1901), et des travaux de George Yule (1871-1951), qui la complètent par la notion de corrélation partielle. Enfin, la démarche sera également complétée par le calcul de régressions multiples et/ou non linéaires dans lesquelles les données d'observation sont modélisées par une fonction qui combine les paramètres de plusieurs variables indépendantes (et non uniquement deux) par une série d'approximations successives. Les relations entre

ces variables étant généralement plus complexes, elles ne peuvent plus être ajustées correctement par une simple droite, mais nécessitent de recourir à des fonctions non linéaires (exponentielles, logarithmiques, trigonométriques, de puissance, gaussiennes, courbes de Lorenz, etc.). Le principe est néanmoins toujours le même puisqu'il s'agit ici aussi de minimiser la somme des erreurs, mais par l'intermédiaire de nombreuses options, disponibles dans n'importe quel logiciel d'analyse de données avancée, et généralement bien décrites dans les ouvrages de statistiques (Bethea et Rhineart, 1991 ; Seber et Wild, 2003), autant sur le plan des calculs à réaliser que sur celui des précautions à prendre avant d'en interpréter les résultats.

Figure 7.5  
**Corrélation entre le réchauffement climatique  
 et la diminution du nombre de pirates**



L'excellente corrélation est montrée par la droite de régression et le coefficient de corrélation ( $r = -0,95$ ). Même si le lien entre les deux variables est irréfutable d'un point de vue statistique, seul le canular de l'« église pastafariste » invite aujourd'hui à croire qu'il ne s'agit pas d'une relation fallacieuse. Partout ailleurs, cette figure apporte uniquement la preuve que corrélation ne signifie pas nécessairement causalité.

Ainsi, si l'arsenal méthodologique développé par les statistiques est aujourd'hui parfaitement clair et bien connu, il ne fournit pas pour autant de techniques « magiques » pour analyser les données et comprendre les relations qu'elles impliquent. Même si, par exemple, les notions de *corrélation* et de *causalité* sont intuitivement très proches, le fait que deux variables soient fortement corrélées ne démontre pas nécessairement qu'il existe une relation de cause à effet entre elles. Avec l'émergence des *big data* qui permettent désormais de calculer automatiquement de nombreuses corrélations entre des variables de types très différents, il existe aujourd'hui toute une série d'exemples absurdes qui permettent d'en témoigner, et que la presse relaye parfois avec beaucoup d'humour. On apprend ainsi qu'il existe une forte

corrélation entre le taux de divorce et la consommation de margarine, l'âge de Miss America et le nombre de meurtres, la consommation de mozzarella et le nombre de diplômés en ingénierie civil, le nombre de soutenances de thèse en sociologie et le lancement de missions spatiales, ou encore entre le nombre de pirates et le réchauffement climatique. Si cette dernière corrélation est statistiquement indéniable (figure 7.5), elle ne permet pas de statuer sur la causalité des choses : les pirates disparaissent-ils à cause du réchauffement climatique ? Le climat se réchauffe-t-il à cause de la disparition des pirates ? Ou bien, malgré la corrélation, n'y a-t-il tout simplement aucun lien de cause à effet entre ces deux variables, ce qui apparaît pour beaucoup comme la réponse la plus probable ?

Aujourd'hui bien connues elles aussi (Spagnou, 2012), ces confusions entre corrélation et causalité relèvent de ce que l'on appelle *l'effet cigogne* (corrélation trompeuse). Cette erreur tire son nom du fait que l'on mesure effectivement un taux de natalité plus élevé dans les régions qui accueillent des cigognes que dans les autres ; et que l'on en conclut parfois un peu rapidement que, comme le dit la légende, ce sont bel et bien les cigognes qui apportent les bébés. En réalité, il se trouve que les cigognes nichent de préférence dans les villages plutôt que dans les grandes villes, et que la natalité est généralement plus forte en milieu rural qu'en milieu urbain. La relation entre les cigognes et les naissances est donc fallacieuse ; mais les deux jeux de données ne sont pas pour autant complètement indépendants. Ils trouvent un lien à travers une troisième variable : le niveau de ruralité, qui permettrait peut-être de les expliquer toutes les deux dans la mesure où il en apparaît vraisemblablement comme la véritable source causale. L'identification de ce type de variables tierces devient de ce fait un enjeu préalable à toute analyse statistique. Et, hormis si on la considère comme un exercice zététique de doute scientifique permanent, *l'analyse causale* ne peut trouver son origine que dans l'exploration du système réel que l'on étudie, dans un cadre problématique défini et avec des hypothèses claires quant aux phénomènes, aux processus et aux faits qui sont susceptibles de s'y produire, et donc d'y être mesurés et mis en relation.

### 2.3. Statistiques spatiales

Pour les disciplines spatiales impliquées dans les problématiques d'aménagement du territoire, en particulier la géographie, l'économie, l'archéologie, l'épidémiologie, les sciences régionales et les études environnementales, l'intégration de la dimension géographique constitue un enjeu supplémentaire au sein des analyses statistiques.

Pour répondre à cet enjeu, l'*analyse spatiale* apparaît comme une sorte d'analyse statistique appliquée à l'espace et, de ce fait, comme une approche fondamentalement interdisciplinaire qui reste difficile à définir. L'analyse spatiale consiste globalement à mettre en relation les données et leur disposition géographique, à travers une démarche cartographique intégrant des techniques et des algorithmes d'interpolation ou de lissage, voire d'intelligence artificielle (Zaninetti, 2005). Intuitivement, cette mise en relation spatiale peut apparaître relativement simple : l'œil exercé à la lecture des cartes détecte presque immédiatement comment le monde et l'environnement s'y organisent ; il comprend rapidement la manifestation des phénomènes géographiques ; il est parfois même capable de repérer la logique de leur répartition pour en déduire des hypothèses géographiques. Cette enchaînement est, en revanche, nettement plus délicat s'il se fonde uniquement sur la méthodologie des statistiques, en particulier lorsqu'il vise à reproduire un « raisonnement » par l'intermédiaire d'ordinateurs pour automatiser la lecture de données numériques. L'ordinateur n'ayant ni les références ni les connaissances de l'expert, il est probable qu'il ne détecte rien d'autre que des traces là où il faudrait voir des formes, et des listes là où l'on distinguerait des répartitions (Hangouet, 1999).

D'un certain point de vue, les méthodes aujourd'hui associées au champ de l'analyse spatiale visent à coupler ces deux approches, en analysant numériquement les données sans en perdre le sens, en les reconstruisant objectivement et, parfois, en les augmentant par de nouvelles associations thématiques ou spatiales. Dans tous les cas, l'analyse spatiale ne constitue donc pas uniquement une démarche idiographique fondée sur la description des territoires, mais contribue bel et bien aussi à la recherche nomothétique de similarités au sein des phénomènes analysés dans l'espace ; elle tente *in fine* d'établir des lois et des règles permettant d'expliquer ces phénomènes. Dans cette perspective, elle souhaite d'ailleurs souvent dépasser la simple analyse, et mettre en évidence des formes d'organisation spatiale récurrentes, que résumant par exemple les relations entre une ville et sa périphérie, les interactions spatiales qu'elles génèrent, la hiérarchie urbaine qui s'en dégage, les réseaux qui permettent de les connecter, etc. Plus précisément, elle vise même fondamentalement à identifier les processus qui sont à l'*origine* de ces « structures », et à les expliquer à travers des concepts simples comme ceux de distance, de centralité, d'accessibilité, de stratégie ou de choix spatial. Dans ce contexte, il apparaît clairement que l'ensemble de cet ouvrage est quasiment consacré à l'analyse spatiale, en particulier quand il traite des approches méthodologiques utiles aux problématiques territoriales.

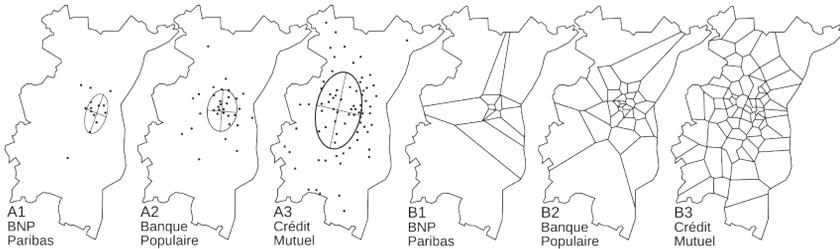
Malgré cet objectif très général qui s'appuie sur des méthodes et des techniques connues dans le monde de la cartographie, de la télédétection, des statistiques ou des SIG, certains indicateurs semblent néanmoins avoir été développés dans une démarche qui découle presque exclusivement de l'analyse spatiale. C'est notamment le cas pour l'analyse de *semis de points* divers et variés, qui peuvent représenter de nombreux phénomènes géographiques : la localisation d'un système de villes ou de villages, la répartition de ressources ou de matières premières, l'adresse d'entreprises ou de services à la population, etc. Pour analyser et mieux comprendre la logique de ces semis, il est possible de calculer leur distance moyenne par rapport à un lieu virtuel qui constitue leur centre moyen. Cette distance, que l'on appelle *distance standard de Bachi*, peut être visualisée par un cercle dont le diamètre correspond à la distance moyenne de tous les points par rapport au centre moyen (moyenne des  $x$  et des  $y$ ). Avec tous les problèmes de représentativité que pose le calcul de ces moyennes, la distance de Bachi correspond à une approximation très simple de l'étendue spatiale d'une répartition de lieux, et permet de les comparer avec d'autres configurations du même type, d'une région à une autre par exemple. Cet indicateur peut être complété par un calcul du même type, mais plus fin sur le plan de l'analyse géographique, et de ce fait également plus complexe à réaliser : l'*ellipse de variabilité* (figure 7.6). Ici, il ne s'agit plus de résumer le semis par un cercle, mais par une ellipse, ce qui nécessite de définir deux axes selon deux angles perpendiculaires. Ces axes correspondent également à une distance et se croisent au niveau du centre moyen ; les angles sont quant à eux calculés à partir de la tangente  $\theta$  de la manière suivante :

$$\theta = \frac{(\sum_i x'^2 - \sum_i y'^2) + \sqrt{(\sum_i x'^2 - \sum_i y'^2)^2 + 4(\sum_i x'y')^2}}{2 \cdot \sum_j x'y'}$$

Cette méthode de calcul, proposée par C. Cauvin (1998), est actuellement implémentée dans plusieurs logiciels SIG avec quelques variantes. Elle offre également un résumé souvent pertinent de la répartition d'un phénomène dans l'espace, et elle en permet une analyse objective ouverte à la comparaison. Pour compléter cette approche, la construction de polygones de Thiessen apparaît également comme une méthode utile (figure 7.6). Les *polygones de Thiessen*, ou de Voronoï si l'on se réfère aux diagrammes originels du mathématicien russe Georgi Voronoï (1868-1908), ont semble-t-il été utilisés pour la première fois en analyse spatiale par le météorologue américain Alfred Thiessen (1872-1956) afin de mesurer la répartition

des chutes de pluie et de prédire le temps qu'il fera en analysant leur distribution dans l'espace par une tessellation, c'est-à-dire un découpage en unités discrètes, du territoire. Les polygones qui résultent de cette tessellation sont alors définis par les médiatrices de chaque couple de points, qui constituent les « frontières » des unités spatiales. Outre le fait qu'elle présente graphiquement la logique de répartition et la densité locale des semis étudiés, la méthode permet également d'associer chaque lieu à une surface qui peut s'apparenter à une zone d'influence très sommaire, mais utile pour comprendre la logique des répartitions et des mobilités. Enfin, l'ensemble de ces indicateurs peut finalement être confronté à des configurations théoriques, indiquant si la répartition des semis qu'ils représentent apparaît plutôt groupée et/ou plutôt régulière, ou au contraire complètement aléatoire. Cette confrontation, facilitée par le simple calcul dit du *plus proche voisin*, apparaît alors non seulement comme un résultat descriptif, mais également comme un fondement pour énoncer les règles théoriques qui sous-tendent les logiques spatiales.

Figure 7.6  
**Indicateurs développés  
 dans une démarche d'analyse spatiale pour  
 la répartition de semis de points**



Sur cette figure la répartition des agences de trois banques est représentée dans l'agglomération de Strasbourg. Cette information peut être « résumée » par une ellipse de variabilité (A) ou par des polygones de Thiessen (B), qui témoignent graphiquement de leur dispersion et de leur couverture spatiales.

Source : Cauvin et Reymond, 1998

Parallèlement à ces indicateurs d'analyse spatiale, les années 1960 ont également vu émerger des expressions originales comme *data fishing* (littéralement « pêche de données ») ou *data dredging* (« drague de données »), utilisées par les statisticiens pour désigner ce qu'ils considéraient au départ comme de « mauvaises » pratiques, fondées sur l'analyse de données sans hypothèses préalables. Dans les années 1990, la notion de *data mining* a permis de renouveler ces approches, notamment au sein des sciences de l'information géographique, où

elles sont devenues relativement populaires. Le *data mining* a alors été défini comme un processus de calcul permettant de mettre à jour des modèles et des formes spatiales au sein de grands ensembles de données (*big data*), en impliquant des méthodes relevant à la fois des statistiques, des SIG et de l'intelligence artificielle, dans l'objectif de « transformer » les données de départ en une structure compréhensible et interprétable d'un point de vue géographique. L'expression *data mining* reste toutefois impropre, dans la mesure où l'objectif vise clairement l'extraction de structures et de connaissances à partir de données, et non l'extraction de données en elles-mêmes. C'est aujourd'hui un mot à la mode, fréquemment appliqué à toute forme des données à grande échelle ou de traitements de l'information : collecte, extraction, stockage, analyse, etc. Dans cet ensemble, le *data mining* propose certes des modèles intéressants, parmi lesquels l'analyse de *clusters* (« groupes » de données), l'identification d'enregistrements inhabituels (détection d'anomalies) ou de dépendances spatiales (extraction de règles d'association) apparaissent particulièrement pertinentes. Mais ces modèles impliquent généralement très peu d'innovation, et se contentent souvent du corpus fourni par les statistiques, les techniques d'enquêtes, la sémiologie graphique, la télédétection ou les SIG. Le *data mining* comble donc un certain fossé interdisciplinaire entre l'analyse spatiale et les statistiques (qui lui fournissent un arrière-plan mathématique), mais n'apporte rien de fondamentalement nouveau d'un point de vue méthodologique (Minvielle et Souiah, 2003), du moins rien que l'on ne connaissait déjà par ailleurs, parfois sous une forme un peu différente, et souvent depuis longtemps.

### 3. L'ERREUR DES DONNÉES

En statistiques, l'*effet cigogne* est une erreur d'interprétation relativement classique, qui découle directement de l'interprétation fallacieuse des liens de cause à effet entre les phénomènes et les processus que l'on souhaite étudier, sous couvert d'une approche méthodologique irréprochable d'un point de vue scientifique. Mais elle n'est pas la seule dans son genre. D'autres sources d'erreurs sont liées par exemple à la manière avec laquelle les données sont relevées au départ ou à la manière dont on les considère d'un point de vue spatial. Dans un cas comme dans l'autre, ces erreurs sont liées à une question d'agrégation, et dépendent de l'échelle à laquelle les individus (erreur écologique) et l'espace (erreur territoriale) sont pris en compte.

### 3.1. Erreur écologique

L'erreur écologique est une erreur de raisonnement logique qui apparaît « naturellement » lorsque l'on cherche à interpréter des données collectées à un niveau agrégé (macro) au niveau désagrégé des individus (micro), en particulier lorsque des conclusions fondées sur la nature des individus sont déduites de correspondances connues pour le groupe auquel ils appartiennent. Ce problème a été particulièrement bien illustré par les conclusions fallacieuses du statisticien américain William S. Robinson (1913-1996). En 1950, à partir de données recensées au sein de chaque État des États-Unis, il a pu montrer qu'il existait une corrélation extrêmement forte entre la proportion de populations noires et la proportion d'illettrés ; on pourrait en conclure que les noirs sont majoritairement illettrés (échelle macro). Mais, dans la même étude, il montre également que la corrélation entre le fait d'être noir et le fait d'être illettré (échelle désagrégée) est très faible ; on en déduit qu'il n'existe aucun lien de causalité entre ces deux observations (échelle micro). Pour appuyer ce paradoxe, H. Menzel (1961) utilise un autre exemple tout aussi contradictoire : peut-on conclure du fait qu'on mesure une forte corrélation entre la présence de populations juives et l'antisémitisme que les Juifs sont des antisémites ? Cette contradiction montre qu'une forte corrélation peut exister entre deux variables au niveau agrégé mais que celle-ci n'existe pas nécessairement au niveau désagrégé (les corrélations micro et macro ne sont pas égales). Il est d'ailleurs tout à fait possible que les deux soient totalement indépendantes, et que leur corrélation s'explique par une troisième variable intermédiaire permettant de reconstruire les véritables liens de cause à effet : dans le précédent exemple, Robinson a par exemple montré que les valeurs de corrélation s'expliquent aussi parce que les populations qui immigrèrent s'installent majoritairement à proximité de populations autochtones plus ou moins lettrées, et donc que l'illettrisme ne correspond pas à une variable propre à leur groupe, mais dépend de l'environnement dans lequel ce groupe évolue.

Le problème que soulève l'erreur écologique n'est donc pas très éloigné des réflexions qu'Émile Durkheim (1858-1917) a pu porter sur les liens entre l'appartenance religieuse et la propension au suicide, à une époque où il ne disposait quasiment d'aucun moyen statistique pour en calculer la corrélation. Dans son ouvrage qui deviendra un classique de la sociologie, *Le suicide*, il a présenté un taux de suicide 2,4 fois plus important pour les protestants que pour les catholiques à partir de données agrégées et 7,6 fois plus élevé à partir de données désagrégées. Ces résultats le conduisent à affirmer que des corrélations mesurables au

niveau des populations agrégées peuvent être différentes, voire ne plus exister, lorsque l'on considère les caractéristiques de la population au niveau des individus. Dans un ouvrage critique qui complète le précédent en 1930 (*Les causes du suicide*), Maurice Halbwachs (1877-1945) analyse à nouveau ce jeu de données ; il parvient à la conclusion qu'il n'existe aucun lien de cause à effet entre la religion et le taux de suicide. Dans l'intervalle, ce problème a été éclairci d'un point de vue statistique, et il est désormais assez aisé de démontrer que la corrélation calculée à partir de données globales ne correspond pas à la corrélation calculée à partir de données individuelles.

### 3.2. Erreur territoriale

L'erreur écologique est une erreur fréquente de l'analyse statistique car les territoires y sont souvent considérés comme des agrégats de personnes : il est tout à fait possible qu'une relation établie au niveau des lieux s'inverse au niveau des individus. Mais qu'en est-il des territoires en eux-mêmes ? La manière avec laquelle ils sont découpés, juxtaposés et analysés peut aussi conduire à des erreurs d'interprétation ou, au contraire, à une compréhension presque immédiate des processus qui y prennent place. La notion d'*autocorrélation spatiale*, par exemple, est un préalable essentiel pour déterminer dans quelle mesure l'espace s'influence lui-même dans la répartition des phénomènes économiques et géographiques : quelle est la sensibilité à la forme des unités spatiales et à la taille du territoire ? Que se passe-t-il si sa connectivité est mesurée par pas de  $n$  et non de 1 ? Comment pondérer des unités de nature identique mais de valeurs différentes ? Et finalement, ne faudrait-il pas systématiquement privilégier une approche exclusivement locale pour minimiser le risque d'erreur ?

L'idée de mesurer l'influence de l'espace est relativement ancienne : on en retrouve les principes de base dès les travaux de E.G. Ravenstein (1885), et on pourrait en lire la trame à travers le modèle de Thünen (1826). À la fin des années 1950, la question est abordée plus directement à l'université de Washington par les travaux de M.F. Dace, de L. Garrison et de E. Ullman, eux-mêmes très influencés par la théorie des lieux centraux de W. Christaller (1933). Techniquement, l'autocorrélation spatiale est toutefois plus proche de l'analyse statistique que des théories de l'espace. Elle se rapproche fortement de la notion de corrélation telle qu'elle a été conçue par Francis Galton (1922-1911), puis définie mathématiquement par Karl Pearson (1857-1936) en 1880 et Ronald Fisher (1890-1962) en 1920. Dans son application à l'espace géographique, elle se généralise véritablement après la publication

déterminante de A.D. Cliff et J.K. Ord (*The Problem of Spatial Autocorrelation*, 1969), rédigée à l'issue d'une conférence de sciences régionales durant laquelle ils mettaient en avant le fait que les modèles validés par une approche statistique ne peuvent pas l'être correctement si cette validation ne tient pas explicitement compte de l'espace. L'objectif de l'autocorrélation spatiale consiste alors à « desserrer la force des effets spatiaux » sur les variables que l'on souhaite étudier, mais également à tester des hypothèses de stationnarité (*stationarity*) ou d'hétérogénéité pour identifier d'éventuelles relations de dépendance entre elles (Getis, 2008). En complément, elle permet donc également de quantifier le rôle des distances sur les interactions entre les lieux, de mesurer l'influence de la géométrie des unités spatiales, de pondérer l'importance des effets temporels, et finalement d'étudier les faiblesses et les aberrations des hypothèses explicatives proposées pour comprendre le fonctionnement des territoires. Dans cette perspective, il est en effet parfois plus intéressant de regarder la manière avec laquelle les phénomènes prennent place dans l'espace que les phénomènes en eux-mêmes.

Concrètement, les outils d'analyse mis au point dans le cadre de ces recherches permettent aujourd'hui de calculer des indices relativement complexes pour mesurer l'autocorrélation spatiale. Parmi ces mesures d'association, l'indice  $I$  de Moran est certainement le plus utilisé (Moran, 1950) : à partir du rapport de la covariance entre des observations contiguës (définies par une matrice d'interactions spatiales) rapportée à la variance totale sur l'ensemble de l'espace (Jayet, 2001), il permet de calculer le niveau d'autocorrélation spatiale d'une variable et de tester sa significativité :

$$I_{Moran} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

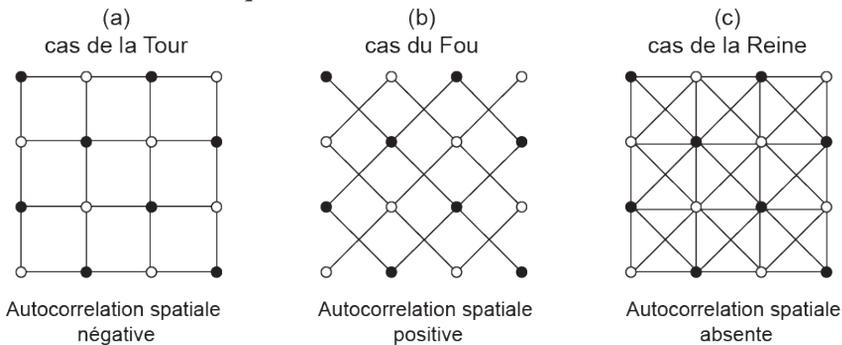
Les valeurs de cet indice sont nécessairement comprises entre  $-1$  (cas dans lequel la dispersion est parfaite) et  $+1$  (cas dans lequel c'est la corrélation qui est parfaite). Une valeur nulle ou proche de 0 signifie quant à elle que la distribution spatiale est répartie de manière complètement aléatoire sur le territoire. Pour valider la significativité du test, l'indice  $I$  de Moran peut être transformé en Z-scores. Les valeurs supérieures au seuil de significativité positive ou inférieures au seuil de significativité négative témoignent alors d'une autocorrélation spatiale réelle, avec un taux d'erreur correspondant au seuil testé (selon

l'hypothèse que l'ensemble suive une loi normale). Par la suite, le diagramme de Moran facilite l'analyse et l'interprétation de ces résultats : par l'intermédiaire d'un nuage de points, les couples de valeurs correspondant à la valeur de la variable dans chaque unité spatiale sont représentés en abscisse et la moyenne des valeurs des zones contiguës, définies par la matrice d'interactions spatiales, est représentée en ordonnée.

À l'heure actuelle, les mesures d'autocorrélation spatiale sont devenues très fréquentes dans les champs de la biologie et de l'écologie (Fortin et Dale, 2005). Leur usage a d'ailleurs été facilité par le développement de logiciels dédiés à l'économétrie spatiale et à l'analyse de données, notamment GeoDa, Spacestat ou Oasis (Irstea), qui ont permis de mieux en faire connaître les principes et d'en généraliser l'utilisation. Pour les problématiques qui concernent l'aménagement du territoire, ces méthodes ont également trouvé une grande variété d'applications, autant pour l'analyse de données environnementales que pour la répartition des votes lors des élections, l'analyse de l'occupation du sol, de la ségrégation et des inégalités spatiales, la distribution des habitats ruraux, des commerces et des services, etc.

Figure 7.7

### Calcul d'autocorrélation pour des configurations territoriales identiques, mais connectées différemment



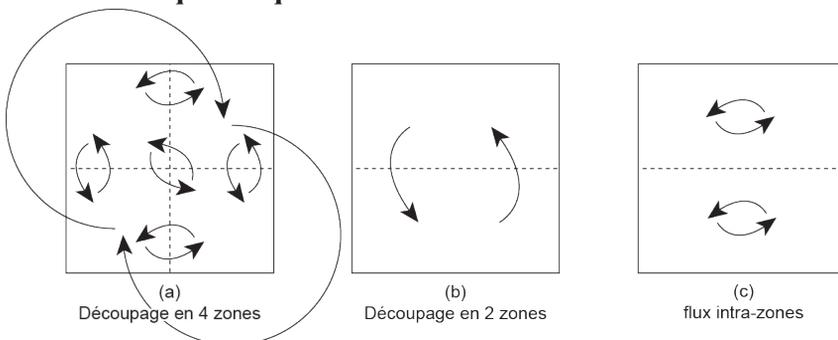
Dans le cas (a), les lieux connectés sont tous de couleur opposée (autocorrélation négative). Dans le cas (b), ils sont tous de la même couleur (autocorrélation positive). Dans le cas (c), chaque lieu est relié à un nombre identique de noirs et de blancs (pas d'autocorrélation). L'exemple est certes théorique, mais il montre que la définition du découpage spatial et de la continuité peut être à l'origine d'une interprétation contradictoire des processus spatiaux.

Source : Jayet, 1993

Mais dans tous les cas, comme toujours en statistiques, une autocorrélation spatiale significative ne fait que suggérer un lien de causalité ; elle ne l'implique pas nécessairement. Une erreur territoriale

d'interprétation sur les relations de cause à effet reste de ce fait possible malgré un test particulièrement probant. Pour illustrer ce problème, Cliff et Ord (1973) présentent un cas de figure pédagogique fondé sur le jeu d'échecs. Ils imaginent un espace de 16 points (correspondant à des lieux) disposés de manière régulière ; la moitié de ces points est blanche, l'autre moitié est noire (figure 7.7). Le calcul de la contiguïté entre ces lieux se fonde alors sur trois modes de connexion différents : celui de la *tour* (qui se déplace toujours sur la même ligne, horizontale ou verticale), celui du *fou* (qui ne se déplace qu'en diagonale) et celui de la *dame* (qui combine les deux précédents). Malgré une configuration de départ strictement identique, l'autocorrélation mesurée se révèle totalement contradictoire : dans le cas de la *tour* (a), H. Jayet (1993) fait remarquer que les observations continues à un lieu donné sont toutes de la couleur opposée à la leur et que les jointures sont toutes de type « noir-blanc », ce qui traduit une autocorrélation négative. Dans le cas du *fou* (b), les observations continues à un lieu sont de la même couleur que ce lieu et il n'y a aucune jointure « noir-blanc », ce qui traduit une autocorrélation positive. Enfin, dans le cas de la *reine* (c), chaque lieu est relié à un nombre identique de lieux noirs ou blancs, et il n'y a donc pas d'autocorrélation spatiale. Même s'il reste caricatural, cet exemple invite à reconsidérer le problème du découpage spatial et des réseaux de continuité de départ, afin de limiter les risques trop flagrants d'erreurs liées à la définition des relations territoriales.

Figure 7.8  
**La mobilité n'est généralement comptabilisée  
 que lorsqu'une limite de zone est franchie**



Comme le montre cette figure, un zonage large contribue automatiquement à réduire le nombre de déplacements enregistrés : d'une part, la mobilité estimée est toujours inférieure à la mobilité réelle ; d'autre part, sa mesure dépend artificiellement de la forme et de la finesse du découpage territorial.

Source : Pumain et Saint-Julien, 2001

Ce problème renvoie également à un questionnement classique pour la quantification et l'enregistrement des flux et des mobilités, notamment quand les lieux sont regroupés en zones. Même si un flux possède théoriquement toujours un point de départ  $i$  et un point d'arrivée  $j$ , la mobilité n'existe souvent véritablement que lorsqu'une limite est franchie entre une zone et une autre. Les mouvements internes à chacune de ces zones ne sont généralement pas comptabilisés. De ce fait, un découpage territorial en zones larges contribue automatiquement à réduire le nombre de déplacements enregistrés. Comme l'indiquent D. Pumain et T. Saint-Julien (2001), il en résulte deux erreurs classiques : d'une part, la mobilité estimée est toujours inférieure à la mobilité réelle et, d'autre part, sa mesure dépend artificiellement de la forme et de la finesse du découpage territorial. Comme l'illustre la figure 7.8, si 50 personnes habitent chaque zone et si chaque flux représente 10 personnes (a), la mobilité mesurée par ces flux est de 120/200, soit 60 %. Dans le cas (b), on dénombre en revanche 100 personnes par zones avec des échanges de 40 personnes chacun, donc une mobilité mesurée de 80/200, soit 40 %. La différence (c) provient de la méthode de comptage, successivement extra et intra-zones : 40 personnes sont ainsi « perdues » dans le comptage de la mobilité. Évidemment, ce problème de découpage du territoire n'existe pas que pour la mobilité. Il est tellement bien connu pour la définition des secteurs électoraux qu'on lui a donné un nom spécifique : le *gerrymandering*. Au début du 19<sup>e</sup> siècle, ce néologisme américain a été formé à partir du nom du sénateur Elbrige Gerry (1744-1814) et de la forme de salamandre (*salamender*) qu'il avait donnée aux circonscriptions électorales de Boston pour gagner les élections du Massachusetts en 1812. Cette pratique est probablement plus fréquente qu'on ne le croit, même en France (Chignier-Riboulon, 1997), et permet de donner l'avantage à un parti ou à un homme politique malgré une répartition des scrutins qui ne lui est pas favorable au départ, en manipulant simplement le découpage du territoire dans une logique partisane. Dans cette perspective, qui reste évidemment très controversée, l'erreur territoriale se transforme finalement en stratégie électorale.

## CHAPITRE 8

### L'approche par l'image

*« Aucune carte du monde n'est digne d'un regard  
si le pays de l'utopie n'y figure pas »*

Oscar Wilde

La seconde approche est celle qui relève des images, et plus généralement de ce que l'on pourrait appeler l'imagerie des territoires, en référence à l'imagerie médicale, dans toute sa diversité. Comme pour les méthodes statistiques, abondamment utilisées en cartographie, elle présente une seconde réduction méthodologique, résumée par une formule célèbre : « la carte n'est pas le territoire ». Elle n'en est évidemment qu'une généralisation et une simplification, donc une réduction. Mais, par ailleurs, l'image possède également ses avantages : elle permet de révéler les structures spatiales sous-jacentes à l'organisation des territoires, structures qui restent inexorablement invisibles sur les territoires en eux-mêmes. La cartographie, puis la télédétection, ont ainsi développé un corpus d'analyse spatiale qui propose des outils efficaces pour l'aménagement, d'autant plus conviviaux et intuitifs qu'ils se présentent sous la forme de « résumés graphiques » et de gammes de couleurs. Dans les années 1990, ces outils ont trouvé un complément essentiel dans l'utilisation des Systèmes d'information géographique (SIG) qui permettent de structurer, de standardiser et d'interroger efficacement les données spatiales, et qui constituent de ce fait un outil désormais incontournable des problématiques de l'aménagement du territoire.

#### 1. SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

L'ensemble des informations liées à l'analyse de l'espace terrestre fait aujourd'hui l'objet d'un pan spécifique de la recherche au sein des disciplines spatiales : les « sciences » dites de l'information géographique regrouperaient ainsi l'ensemble des approches, des méthodes et des outils ayant pour objet l'acquisition, l'analyse, le traitement et

l'exploitation des données à caractère spatial. Elles couplent de ce fait tout ce qui relève de la géomatique, des Systèmes d'information géographique et de la télédétection, dans une aventure renouvelée par la révolution numérique, mais dont l'histoire commence avec la cartographie thématique, qui a permis de construire les premières images objectives des territoires.

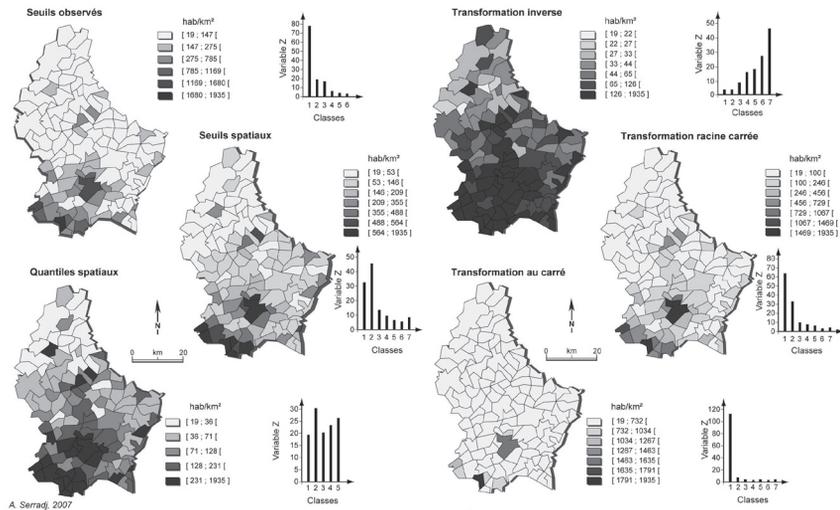
### 1.1. Cartographie thématique

Quelle que soit l'époque à laquelle on se place, la cartographie apparaît comme l'un des moyens les plus adéquats, voire le seul moyen, pour représenter l'espace géographique et le monde qui nous environne. L'espace y est mis en relation ; il est localisé par rapport à ses voisins et aux éléments topographiques qu'il contient. La carte offre ainsi un excellent support pour représenter des phénomènes thématiques très variés (démographie, emploi, catégories sociales, temps d'accès, etc.), qui n'appartiennent plus physiquement à l'espace des territoires, mais dont la configuration spatiale produit un sens permettant de mieux comprendre leur fonctionnement. La carte thématique apparaît de ce fait indéniablement comme l'un des outils privilégiés de l'aménagement du territoire, car elle permet simultanément de visualiser, de comprendre et parfois d'expliquer le déploiement géographique des hommes et de leurs activités, mais également de décrire la nature et l'ampleur des projets à mettre en œuvre pour contribuer à l'harmonie, à la commodité et à l'équilibre des territoires.

Historiquement, la *Carte figurative de l'instruction populaire de la France* (1826) du baron Charles Dupin (1784-1873) est considérée comme l'une des premières cartes thématiques (Palsky, 2003) : elle associe chaque département du territoire français à un chiffre relatant l'instruction populaire, selon un regroupement en cinq classes. Graphiquement, le résultat est extrêmement convaincant, dans la mesure où il propose une formule efficace et novatrice pour représenter des données que l'on ne savait jusque-là communiquer que sous la forme de tableaux, ce qui empêchait de percevoir immédiatement les structures spatiales susceptibles de se dissimuler derrière les chiffres. L'auteur la commente lui-même ainsi : « Pour rendre visible la principale de ces différences, j'ai conçu l'idée de donner aux divers départements des teintes d'autant plus foncées qu'ils envoient moins d'enfants à l'école [...] C'est l'activité, l'énergie morale plus ou moins développée [des habitants] qui produisent les énormes différences dont notre œil est frappé lorsqu'il s'arrête sur la carte offerte à nos regards. Remarquez, à partir de Genève jusqu'à Saint-Malo, une ligne tranchée et noirâtre qui sépare le nord et le Midi

de la France ». La démonstration semble faite, et des hypothèses géographiques et sociales pourraient en être tirées. Statistiquement, cette logique reste toutefois à démontrer dans la mesure où Charles Dupin fait l'impasse complète sur une opération fondamentale : il n'explique pas comment il obtient les cinq classes de valeurs qu'il cartographie, et donc les couleurs qu'il attribue à chaque département. Or, cette étape de *discrétisation* n'est pas anodine, et peut réserver quelques surprises.

Figure 8.1  
Méthodes de discrétisation



Différentes méthodes de discrétisation appliquées à la répartition des populations du Luxembourg : (a) seuils observés, (b) seuils spatiaux, (c) quantiles spatiaux, (d) transformation inverse, (e) transformation racine carrée, (f) transformation au carré. Chaque méthode conduit à un découpage en classes différent, et donc à une lecture particulière du territoire, ce qui n'est pas anodin si l'on souhaite utiliser ces résultats pour construire une politique d'aménagement. Volontairement ou involontairement, la discrétisation est donc un excellent moyen de faire mentir les cartes.

Source : Cauvin *et al.*, 2008

Concrètement, la discrétisation est en effet une opération qui consiste à découper une variable continue en un nombre réduit de classes discrètes, afin de simplifier l'information cartographiée en regroupant les objets géographiques dont les caractéristiques sont semblables (au sein du même intervalle) : de la même manière qu'un fond de carte doit être généralisé pour ne conserver que les éléments essentiels, les variables relevées selon une échelle de mesure supérieure doivent être synthétisées par un découpage en classes cohérent. Ainsi, même si Waldo Tobler considère de manière un peu provocatrice que ce regroupement équivaut à une « amputation » des données de départ

et qu'il peut largement fausser les résultats finaux, la majorité des cartographes s'accordent pour dire que la discrétisation est un impératif qui donne justement tout son sens à la représentation d'un phénomène dans l'espace. L'enjeu de l'opération consiste à simplifier sans tronquer, ni à perdre la représentativité statistique et spatiale de la variable représentée, à l'aide de méthodes plus ou moins sophistiquées que l'on a vu apparaître aux États-Unis à partir des années 1930. Dans les années 1960 et 1970, le cartographe américain George F. Jenks (1916-1996) y a apporté de nouvelles solutions en ouvrant un champ de recherche dont il semble que l'on ait à peu près fait le tour : on recense aujourd'hui plus d'une dizaine de méthodes (amplitude égale, effectifs égaux, progression arithmétique, écart-type, seuils naturels, répartition automatique de Jenks, etc.) pour définir le nombre de classes et le(s) découpage(s) en seuils adapté(s) à la nature et à la distribution statistique d'une variable, en tenant parfois compte des caractéristiques du fond de carte et des possibilités de représentation graphique disponibles. L'emploi de ces méthodes de discrétisation n'est donc pas le fruit du hasard ; il découle d'un raisonnement construit pour une finalité déterminée. En effet, il n'est pas difficile de montrer que ce choix peut modifier la représentation et donc les conclusions que l'on peut en tirer. Les exemples qui illustrent l'ouvrage de synthèse de C. Cauvin *et al.* (2008) sont particulièrement démonstratifs à ce sujet : à partir d'une même variable de départ, et relativement basique puisqu'il s'agit simplement de la répartition de la population du Luxembourg, des discrétisations différentes mènent à des classes qui sont également différentes, et donc à plusieurs lectures possibles de la structure du territoire. Au regard de la figure 8.1, il semble en effet possible de faire dire beaucoup de choses à la répartition des populations luxembourgeoises, ce qui n'est pas anodin si l'on souhaite utiliser ces résultats pour construire une politique d'aménagement du territoire qui vise justement à compenser les disparités pour définir un meilleur équilibre démographique. Volontairement ou involontairement, la discrétisation est donc un excellent moyen de *faire mentir les cartes* (Monmonnier, 1993) et donc de se tromper ou de tromper les autres dans l'analyse d'un phénomène spatialisé.

Pour superposer une variable thématique sur un territoire, il est nécessaire de se doter d'un fond de carte. Deux cas de figure sont alors possibles : (i) utiliser un fond topographique existant construit pour décrire les territoires, c'est-à-dire un fond de carte initialement prévu pour un objectif différent de la carte à produire, ou (ii) construire un fond de carte dédié à ce que l'on souhaite représenter, qui n'est donc plus strictement topographique, mais spécifiquement préparé pour accueillir des informations thématiques d'un autre ordre. La première

catégorie correspond à une certaine forme d'amateurisme cartographique, qui tend à se développer avec la multiplication des supports numériques issus de l'observation spatiale : on ne dénombre même plus la quantité de démonstrations un peu facilement appuyées sur la base de copies d'écran médiocres issues de Google Earth, de Google Maps ou de cartes routières initialement prévues pour faciliter les calculs d'itinéraire (Michelin, Mappy, etc.). La deuxième catégorie nécessite en revanche une série d'opérations plus construites qui la rapprochent d'une véritable démarche scientifique : les fonds de cartes dédiés doivent en effet être généralisés pour optimiser l'information géographique qui sera transmise par la carte. Pour S. Rimbart (1964), le terme *généraliser* ne signifie pas simplifier, mais plutôt schématiser selon certaines règles : les éléments qui pourraient apparaître secondaires pour la représentation du phénomène cartographié peuvent, et parfois même doivent, être supprimés afin d'augmenter la lisibilité générale de la carte. À l'inverse du topographe, qui note scrupuleusement le maximum de détails pour décrire son terrain d'étude, le cartographe élimine l'information superflue et schématise celle qui reste pour la rendre compréhensible. Si l'on considère par exemple la carte historique de John Snow (Figure Erreur : source de la référence non trouvée), on se rend rapidement compte que l'information topographique (le plan précis du réseau viaire), même si elle reste primordiale, est surreprésentée par rapport à ce que la carte souhaite montrer : supprimer le détail de certaines rues de Londres, ou les dessiner d'une façon plus schématique, n'aurait probablement pas nui à la localisation des pompes infectées par le choléra, mais aurait peut-être facilité l'analyse de leur répartition tout en allégeant la représentation pour mettre en valeur le contenu essentiel de la carte. La cartographie thématique relève donc avant tout d'un travail ciblé de *sélection* qui commence par la construction d'un fond de carte adéquat, dont les règles sont très bien rappelées par C. Cauvin *et al.* (2008).

Enfin, il est encore nécessaire de rappeler que la carte reste fondamentalement une image, faite de nuances et de couleurs, qui, en plus de sa dimension démonstrative, peut être construite pour être attractive, ou tout simplement belle. Rares sont d'ailleurs les véritables cartographes qui hésitent encore à associer leur production à une forme d'art créatif : le choix d'un trait, d'un style, d'une typographie ou d'une gamme de couleurs peuvent être combinés dans un graphisme harmonieux ; c'est d'ailleurs toute la force captivante des cartes. Toutefois, l'harmonie de la combinaison ne doit pas s'imposer aux objectifs. Si la liberté graphique est importante, elle reste contrainte par le sens que l'on souhaite donner à ce que l'on représente. C'est dans cette perspective que le travail colossal du cartographe Jacques Bertin (1918-2010)

devient fondamental : dans *La sémiologie graphique* qu'il publie en 1967, il livre les recettes de la cohérence cartographique dans un ensemble standardisé de règles, de signes et de variables visuelles qui permettent de traduire quasiment n'importe quelle information sous une forme graphique. Avec l'arrivée de la télédétection et des nouveaux supports cartographiques, en particulier les écrans qui permettent la diffusion de cartes numériques, dynamiques et interactives, ainsi que des SIG qui en ont automatisé la construction et la visualisation, ces règles ont évolué, et, pour une part, elles se sont assouplies ou elles ont été oubliées. Du point de vue de la méthode, il reste néanmoins fortement recommandé de s'y référer pour garantir une sémiologie adéquate, précisément adaptée à ce que la carte souhaite montrer.

### 1.2. Télédétection

Le fait de pouvoir survoler l'espace et le territoire que l'on souhaite aménager apparaît relativement tard dans l'histoire de la cartographie : avant l'invention de l'aérostat par les frères Montgolfier en 1783, l'observation à partir d'un point terrestre culminant, une colline par exemple, était la meilleure et probablement la seule façon de faire. Par la suite, c'est lors de la Première guerre mondiale que l'aviation militaire permettra aux cartographes et aux stratèges de prendre véritablement conscience de l'importance de la vue aérienne pour l'observation de l'espace terrestre, en particulier quand ce territoire se situe « au-delà des lignes ennemies ». Il reste alors à fixer cette observation sur un support pour en pérenniser l'information et lui donner un format pratique, opération qui relèvera tout simplement de la photographie.

À partir des années 1980, la photographie aérienne est rapidement complétée par la possibilité de fixer sur un support numérique l'ensemble des ondes du spectre électromagnétique. C'est essentiellement grâce à l'invention de nouveaux moyens de télédétection utilisant des semi-conducteurs que l'on a pu élargir la gamme spectrale de l'ultra-violet aux hyperfréquences, en passant par le visible, l'infrarouge proche, l'infrarouge moyen et l'infrarouge thermique. Les images ainsi obtenues ne sont plus fixées sur des films sensibles, mais sur des radiomètres qui enregistrent les intensités du rayonnement des objets terrestres. De surcroît, si de tels appareils peuvent être embarqués sans difficulté à bord d'un avion, il devient également possible, dès les années 1970, d'équiper les premiers satellites. C'est ainsi qu'a débuté en 1972 le programme spatial américain d'observation de la terre Landsat. En 1986, la France lance à son tour le projet Spot (Satellite probatoire d'observation de la Terre), qui ouvre une nouvelle voie dans le domaine de l'acquisition d'informations spatiales et de cartographie des territoires.

L'ère de l'exploration satellitaire fournira alors des données d'un genre nouveau à grande échelle, dont les premières exploitations connaîtront des applications très variées. Cependant, de par l'investissement technique et méthodologique que requiert cette exploitation, elle se solde par un coût global qui la laissera pendant longtemps hors de portée de nombreux acteurs du territoire.

D'un point de vue technique, l'information obtenue par télédétection satellitaire est composée de pixels (contraction de *picture element*), chacun d'eux constituant un élément homogène de référence sur une image enregistrée. Pour chaque pixel, les capteurs embarqués sur les satellites collectent plusieurs informations sous la forme de longueurs d'onde électriques et magnétiques. Ces longueurs d'onde peuvent alors être mises en correspondance avec certains éléments du paysage terrestre : à chaque objet du même type, correspond une signature spectrale à peu près identique, c'est-à-dire une même réponse aux différentes longueurs d'onde du rayonnement solaire. En comparant et en croisant les images rapportées par les différents canaux des satellites, ou en les utilisant un par un suivant les cas, il devient possible d'identifier chaque pixel, et donc de reconnaître et de nommer chaque objet de l'image. Cette identification passe souvent par une *composition colorée* qui consiste à associer les réponses de chacun des canaux spectraux à une couleur pour créer des images réalistes proches des photographies aériennes (images dites en « vraies couleurs ») ou à révéler des détails plus subtils de l'occupation du sol (images dites en « fausses couleurs »). De même, ces réponses spectrales peuvent être combinées pour créer des indices : le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), qui associe les valeurs des bandes rouge (R) et proche infra-rouge (PIR), permet par exemple de différencier l'état de la végétation.

Cette identification était déjà plus ou moins possible avec de simples photographies aériennes grâce aux techniques de photo-interprétation et de stéréoscopie (restituant le relief). Mais la grande innovation des capteurs satellitaires vient du fait qu'il est désormais possible de photographier des territoires très vastes, en ne se limitant plus à la seule information visible : les ondes spectrales permettent de visualiser des phénomènes invisibles pour l'œil humain car ils se manifestent dans des longueurs d'onde trop basses ou trop hautes par rapport à la sensibilité visuelle de l'homme : la télédétection montre des phénomènes que l'on ne peut pas voir, ou du moins, que l'on ne pouvait pas voir avant. Ces phénomènes sont à la fois très diversifiés et très riches : ils concernent des éléments solides (type de bâti ou de végétation), mais surtout des gaz (polluants et masses d'air), des liquides (différenciation de l'eau courante et de l'eau stagnante) ou encore des températures

(îlots de chaleur), désormais disponibles en Très haute résolution spatiale (THRS). Techniquement, ces nouvelles informations spectrales ne sont toutefois pas disponibles immédiatement ; elles nécessitent un traitement préalable, réalisé par exemple dans un SIG.

### 1.3. Systèmes d'information géographique

Le développement des Systèmes d'information géographique (SIG) est lié à deux éléments concomitants : les progrès vertigineux de l'informatique durant les années 1970 et l'esprit entrepreneurial de l'environnementaliste américain J. Dangermond. Au sein de l'*Environmental Systems Research Institute* (ESRI), et à partir d'un besoin clairement identifié pour les sciences de l'environnement, J. Dangermond oriente en effet rapidement ses recherches vers un couplage des concepts de l'analyse spatiale avec ceux de l'infographie, afin de développer une nouvelle génération de logiciels de manipulation de données géographiques. La première version (Arc/Info) sera commercialisée dès 1982, et l'entreprise ESRI deviendra le principal concepteur et fournisseur de SIG au monde en même temps qu'elle contribuera à leur véritable envol.

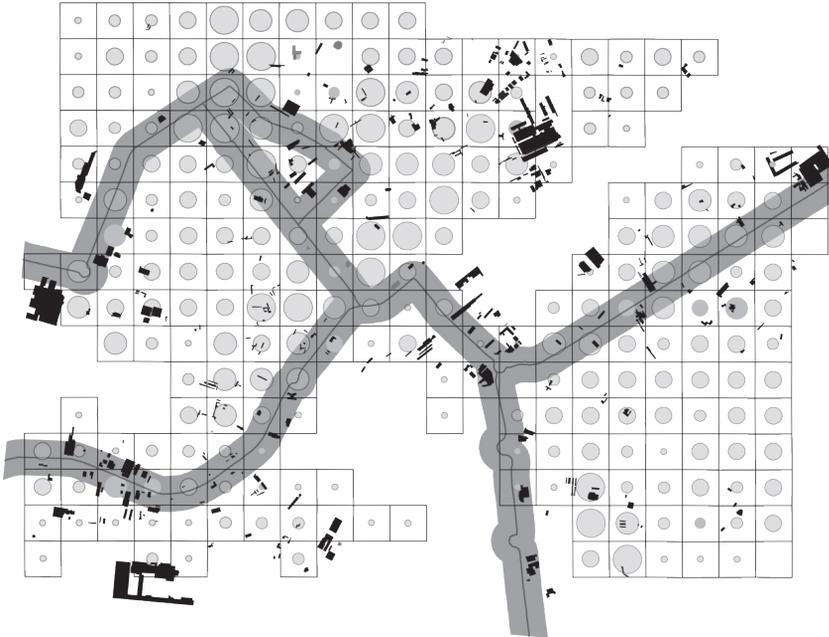
Cet envol n'est pas sans lien avec l'intérêt que le monde professionnel et les autorités publiques ont presque immédiatement porté aux SIG en tant qu'outils opérationnels. En collaboration avec le gouvernement canadien et l'entreprise de prises de vue aériennes *Spartan Air Service* (dont il a dirigé le service de cartographie numérique), le géographe anglais R. Tomlinson (1933-2014) avait en effet apporté une preuve de leur efficacité dès les années 1960 et 1970, en développant le premier système d'information géographique du Canada (et du monde). Ce système d'un genre nouveau, capable de gérer et d'analyser de lourdes bases d'images et de données, visait alors à offrir un premier outil informatique pour la régulation des procédures d'aménagement du territoire et la gestion des ressources naturelles. Aujourd'hui, ces objectifs n'ont globalement pas changé, mais ils se sont largement généralisés, et les SIG se sont ouverts à des champs bien plus vastes : selon la définition de la Société française de photogrammétrie et télé-détection, ils constituent actuellement un outil générique privilégié pour « rassembler et organiser, gérer, analyser et combiner, élaborer et présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace » à partir de sources très diverses au départ. Ainsi, même si l'on peut avoir tendance à les confondre, les SIG présentent une différence fondamentale avec la télédétection et la cartographie « classiques », dans la mesure où ils permettent un croisement informatique de données géographiques jusqu'alors inédit. Cette innovation a été rendue possible par deux types d'uniformisation.

Premièrement, il s'est agi de référencer n'importe quel type de données spatiales dans un système de coordonnées propre, afin de les représenter comme des couches superposées les unes aux autres selon un référentiel commun. Fondamentalement, l'exercice est connu depuis longue date : il consiste à localiser chaque lieu sur deux axes orthogonaux  $XY$  obtenus après que le géoïde (correspondant à la forme plus ou moins sphérique de la Terre) a été projeté sur un plan (ce qui simplifie par la suite les calculs réalisés à partir de ces lieux en termes de distances et de surfaces notamment). L'opération peut certes paraître simple dans son principe, mais elle s'avère assez compliquée en pratique et peut soulever d'importants enjeux géopolitiques : dans la mesure où chaque système de projection provoque irrémédiablement une transformation des continents, les territoires politiques apparaissent nécessairement plus ou moins déformés selon le système choisi. Au-delà de ces questions incompressibles mais relativement anodines à l'échelle plus locale de l'aménagement de l'espace, ce principe de géoréférencement a surtout l'avantage de créer une norme commune (ou une série de normes locales communes) et de rendre compatibles des données acquises dans des systèmes de coordonnées ou de mesure différents au départ, ce qui conforte la position plus ou moins universelle des SIG pour le traitement de données spatiales.

Deuxièmement, l'émergence des SIG a également contribué à structurer les données spatiales selon un ensemble de normes permettant de coupler leur géométrie avec les attributs qui leur correspondent dans des formats compatibles. Cette seconde uniformisation est à l'origine d'un cadre théorique renouvelé pour définir les principaux concepts aujourd'hui considérés comme standard pour le stockage, la manipulation et l'analyse d'informations géographiques. Compte tenu de la diversité des données mobilisables pour décrire l'espace géographique, ce cadre théorique autorise toutefois la juxtaposition de deux structures de données. D'une part, les données *raster* présentent l'information selon une grille régulière organisée en lignes et en colonnes, au sein de laquelle chaque cellule (ou pixel) correspond à une portion de l'espace terrestre et se trouve associée à une valeur que l'on peut représenter par une couleur (ou une intensité de gris) ; on retrouve ici un schéma très similaire à celui des données acquises par télédétection (images satellitaires) et presque immédiatement compatible avec les modèles d'automates cellulaires dédiés à la simulation des changements d'occupation du sol. D'autre part, les données *vecteur* décrivent les objets spatiaux de manière plus précise, selon trois primitives géométriques : en fonction de l'échelle de représentation et de l'objectif du système, les lieux peuvent être considérés comme des objets ponctuels

et représentés par des points (villes, bâtiments, gares et stations, etc.), les éléments linéaires (réseau de transports, etc.) peuvent être associés à des lignes (ou des polygones), et les objets considérés comme surfaciques peuvent être représentés par des polygones (champs, forêts, zones commerciales, espace bâti, etc.). L'ensemble de ces informations prend alors une forme précise et plus ou moins réaliste, selon une logique identique à celle du dessin technique et des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO ou DAO). Mais les SIG permettent de surcroît de lier des valeurs attributaires associées à ces objets géométriques grâce à un fichier d'informations complémentaires non spatialisées (nom des lieux, fonction des bâtiments, propriété ou attractivité des parcelles, etc.) dans une logique de tables et de clés issue des Systèmes de gestion de base de données (SGBD). Dans les deux cas (raster ou vecteur), les SIG présentent aujourd'hui une façon de formaliser les données géographiques qui constitue une base et un socle communs pour les applications géomatiques (selon le terme proposé par le géomètre canadien M. Paradis au début des années 1980 pour associer géographie et informatique).

Figure 8.2  
Systèmes d'information géographique



Les SIG sont à la base d'applications techniques et thématiques diverses : gestion d'informations spatiales et attributaires, analyse de phénomènes et prévision des risques, planification d'infrastructures, analyse de processus spatiaux, calcul d'itinéraire, etc. Sur cette figure, la population localisée dans des cellules de carroyage est comptabilisée dans des « zones tampons » de 100 mètres de part et d'autre des infrastructures routières et par rapport aux bâtiments industriels (Image : S. Moisy).

Enseignée dans les écoles d'ingénieurs et les universités (notamment en géographie et en environnement, et plus timidement en économie, en sociologie ou en psychologie), la géomatique est devenue une discipline à part entière, dédiée aux outils et aux méthodes permettant de gérer, de représenter et d'analyser une information géographique disparate et complexe. Par l'intermédiaire des SIG, elle a contribué à décupler les possibilités d'analyse spatiale pour les problématiques d'aménagement et de gestion des territoires, et à faire évoluer les pratiques et les spécialités professionnelles (la géomatique représenterait un marché de plusieurs milliards d'euros dans le monde et emploierait plusieurs centaines de milliers de personnes). Au sein des collectivités territoriales, des bureaux d'étude et des laboratoires de recherche, sous des formes assez variées, les SIG apparaissent à la base d'applications diverses tant d'un point de vue technique que thématique (figure 8.2) : stockage et mise à jour des données et des métadonnées, gestion d'une multiplicité d'informations attributaires, analyse de phénomènes et prévision des risques, planification d'infrastructures, analyse de processus spatiaux, cartographie automatique, calcul d'itinéraire et production de cartes ou de plans adaptés, etc. La géomatique constitue de ce fait à la fois une alternative numérique aux plans sur papier qui rend possible l'automatisation des procédures de calculs et d'analyse, mais également une structure permettant leur mise en relation, indépendamment des échelles, des acteurs et des institutions qui sont à l'origine des données. Les SIG ont de ce fait largement contribué à intégrer la révolution numérique dans le monde de l'aménagement, et sont devenus des outils incontournables pour les problématiques de gestion de l'espace, de planification et de prospective territoriale. Ils apparaissent de surcroît aujourd'hui comme solution avancée pour absorber avec intelligence les masses de données géoréférencées produites quotidiennement dans le monde entier par les systèmes de cartographie embarqués et de téléphonie mobile (*big data*), et demain par les objets connectés.

## 2. VISUALISATION ET EXPLORATION

Si les SIG sont des outils adéquats pour cartographier et visualiser l'information géographique, ils atteignent leur limite lorsque cette information devient trop importante et trop complexe. La représentation de *big data*, dans la mesure où, par définition, elles ne correspondent plus à une structure de donnée classique, pose évidemment un problème. Fondamentalement, ce problème n'est d'ailleurs pas très

différent de celui que l'on rencontre pour visualiser des données individuelles de mobilités, lorsque les flux sont nombreux et enchevêtrés. Ici, la géovisualisation n'apporte pas de solution *clés en main*. Mais elle ouvre des pistes techniques pour explorer l'information et décortiquer la manière avec laquelle les données s'inscrivent dans l'espace.

### 2.1. Géovisualisation

La géovisualisation est apparue progressivement au cours des années 1990, grâce au développement de l'informatique qui a permis de multiplier les outils interactifs pour montrer, révéler et finalement mieux comprendre les processus spatiaux caractérisant les dynamiques territoriales (Cauvin *et al.*, 2008). Son objectif a dès lors rapidement consisté à accompagner graphiquement cette volonté de comprendre les territoires, en particulier pour les chercheurs et les décideurs qui en élaborent les stratégies d'aménagement. Même si certains auteurs considèrent qu'elle constitue désormais une discipline à part entière, la géovisualisation apparaît très clairement dans la filiation de la cartographie thématique, dont les buts sont à peu près similaires. Étymologiquement, le terme a néanmoins été formé par la contraction des mots « visualisation » et « géographique » ; on peut de ce fait également la considérer comme une branche de la visualisation scientifique, celle qui s'intéresse spécifiquement aux processus et aux systèmes géographiques, soit une spécificité qui, au sein des disciplines spatiales, la rapproche immédiatement des Systèmes d'information géographique et de l'analyse spatiale.

La visualisation scientifique est considérée comme l'étude pluridisciplinaire, sous une forme graphique, de résultats scientifiques très divers (en médecine, en biologie, en météorologie, en architecture, etc.). Elle inclut de ce fait également la production de ces graphiques à partir d'outils informatiques permettant d'intégrer la *troisième dimension* (le résultat graphique ne prend pas la forme d'un plan, mais d'un volume) et le *temps* (il n'est pas statique, mais dynamique), que l'on peut ici considérer comme une quatrième dimension supplémentaire. Appliquée à la représentation des territoires, elle prend alors plus ou moins nécessairement la forme d'une « cartographie numérique » : l'écran apparaît simultanément comme un support de communication et comme un canal de diffusion de l'information à visualiser. Quelle que soit sa forme, cet écran permet alors de coupler l'image à d'autres médias, dans une relation qui peut devenir interactive avec celui qui la regarde et qui l'analyse.

Dans le domaine de la géographie et de la géovisualisation, l'écran numérique permet d'afficher tout type de cartes. Si l'on se contente

d'un affichage basique, il n'apporte d'ailleurs pas d'évolution majeure par rapport à une carte classique sur un support en papier : on peut tout aussi bien en masquer certaines parties, s'en éloigner, s'équiper d'une loupe pour la voir de plus près, mais sans que la communication de l'information ne s'en trouve véritablement augmentée. Les choses changent toutefois du tout au tout si l'on profite de l'écran pour y ajouter une certaine « valeur » (Antoni *et al.*, 2004), qui peut prendre différentes formes. Le temps, par exemple, permet de rendre la carte dynamique en y intégrant une durée, un taux de changement ou un ordre, éventuellement complétés par une phase (MacEachren, 1994). Ces ajouts successifs permettent d'identifier deux types de cartes dynamiques : (i) les cartes animées qui présentent une série de séquences au cours desquelles l'utilisateur acquiert la liberté de démarrer et d'arrêter l'animation graphique, et éventuellement de la lire en boucle ; (ii) les cartes interactives qui intègrent généralement un curseur de défilement (qui permet d'effectuer des arrêts sur certaines images et de choisir le sens et la vitesse de défilement), voire des commandes de navigation qui permettent de tourner autour. L'animation constitue de ce fait un apport important pour une lecture efficace et réfléchie des résultats cartographiques comme le montre par exemple l'animation d'anamorphoses (Antoni et Klein, 2003) appliquée à l'accessibilité des TGV en France (figure 5.3) : si la carte déformée de l'espace français n'est pas évidente à lire quand on la voit seule, le fait d'utiliser l'animation pour passer de cet espace de référence à son anamorphose constitue une aide qui permet de mieux comprendre les différentes étapes de transformation de la carte et de l'espace par l'accessibilité ferroviaire (Antoni et Klein, 2003). Si l'on utilise les possibilités de la programmation informatique pour franchir un cap supplémentaire, il devient également possible de recourir à la géovisualisation pour construire des cartes « en temps réel ». Les possibilités d'interagir avec la représentation graphique sont alors telles que l'on peut visualiser les informations sous une infinité de formes différentes, en modifiant par exemple l'échelle, les couleurs, la généralisation des informations, les paramètres de discrétisation des données, les variables visuelles utilisées, etc. On se rapproche alors des caractéristiques de l'analyse exploratoire.

Ces possibilités relativement récentes dans le monde de l'informatique ne sont pas sans intérêt pour les problématiques actuelles de l'aménagement du territoire et des politiques de transport. Par l'intermédiaire de la modélisation, la simulation prospective du développement urbain et des mobilités quotidiennes et résidentielles génère en effet une quantité très importante de données connectées les unes aux

autres à l'échelle des individus ou des quartiers : caractéristiques des ménages, itinéraires empruntés, satisfaction résidentielle, modes de transport, etc. Concrètement, l'exploitation complète de ces données se confronte à un problème majeur de gestion et de manipulation informatique. Ainsi, même si certains modèles LUTI (comme UrbanSim ou plus encore MobiSim) sont capables de produire des scénarios d'aménagement de grande qualité, l'analyse de leurs résultats n'est pas évidente. Par définition, la géovisualisation doit théoriquement permettre de gérer cette difficulté et offrir une solution pour analyser et explorer une grande quantité de données désagrégées (de type *big data*). Pour ce faire, il faut probablement entendre la géovisualisation dans un sens élargi, qui regroupe différentes méthodes et techniques (visualisation non cartographique, *visual analytics*, *visualization in scientific computing* (ViSC), etc.), et l'appuyer sur des approches connexes relevant de l'ergonomie (cognition et analyse des interactions homme-machine). Dans cette perspective, la visualisation peut offrir un cadre de recherche pour le filtrage des données, considérées à la fois dans leur dimension spatiale, temporelle et thématique, et l'analyse des interactions entre mobilités quotidiennes et résidentielles par le recours à l'analyse statistique. Par conséquent, la géovisualisation peut également aider à mieux comprendre le système de mobilités urbaines et à mieux communiquer les résultats de simulations LUTI et de scénarios d'aménagement aux acteurs du territoire et aux aménageurs.

## 2.2. Analyse exploratoire

L'apport potentiel de la géovisualisation aux problématiques de l'aménagement du territoire est également confirmé par une approche complémentaire : l'analyse exploratoire. Dans le champ des statistiques, l'analyse exploratoire de données a en effet ouvert de nouvelles voies extrêmement intéressantes, quoiqu'encore peu développées. Elle apparaît comme une démarche, et presque une philosophie d'analyse, qui mobilise de nombreux aspects techniques et conceptuels (dont la plupart sont graphiques) pour maximiser la signification d'un jeu de données, découvrir ses structures sous-jacentes, en extraire les variables fondamentales, mettre en lumière et expliquer ses anomalies internes, et finalement tester des hypothèses sur le fonctionnement de l'objet qu'elles représentent.

En tant que concept pour l'analyse de données, l'approche exploratoire a été formalisée par le statisticien américain John Tukey (1915-2000) dans le cadre de ses recherches sur les tests d'hypothèses et la méthodologie des statistiques. Après avoir conçu le terme informatique

*bit* (binary digit) pour les travaux qu'il a menés en collaboration avec John Von Neumann sur les premiers ordinateurs, il publie un ouvrage de référence, *Exploratory Data Analysis* (1977), dans lequel il présente notamment la « boîte à moustaches » et le diagramme par quartile comme de nouvelles formes graphiques de représentation de l'information statistique. Pour l'exploration de grandes bases de données, il part alors du principe qu'il est nécessaire de filtrer l'information pour en extraire temporairement les informations les plus manifestement aléatoires et, dans le même élan, pour n'en retenir que les structures essentielles et fondamentalement explicatives. Tukey résume la philosophie de l'analyse exploratoire par un slogan « data = smooth + rough » (données = rugueux + lisse). Pour parvenir à dissocier le « lisse » du « rugueux », il pose alors l'hypothèse qu'il est fondamental de visualiser simultanément la même information sous des formes différentes, qui offrent chacune un regard complémentaire sur les données, mais dont la combinaison interactive doit permettre de découvrir et d'explorer des liens quasiment impossibles à identifier sans cette combinaison.

Figure 8.3  
Visualisation de données de mobilité quotidienne et analyse



Le logiciel *Geographer* permet de sélectionner et de manipuler différentes vues du même jeu de données (histogrammes, diagrammes en bâtons, listes, etc.), elles-mêmes connectées à une cartographie interactive. La modification de chacun de ces éléments se répercute immédiatement sur l'ensemble des autres, ce qui permet théoriquement d'impliquer plus facilement le « facteur humain » dans l'exploration des données.

Source : T. Thévenin, E. Lerond

Pour les sciences régionales et la représentation de données géolocalisées (Symanzik, 2014), l'analyse exploratoire trouve un complément pertinent à travers la notion d'ESDA (*Exploratory Spatial Data Analysis*). Le paradigme essentiel consiste ici aussi à « laisser parler » les données, à ne pas contraindre leur analyse par une structure pré-établie, à les « laisser suggérer » par elles-mêmes des hypothèses, tout en révélant les observations atypiques, aberrantes ou fortement autocorrélées. Pour ce faire, la méthode consiste à les manipuler par différentes « vues », chacune correspondant à un résultat graphique (histogramme, diagramme en bâtons, diagramme circulaire, nuage de points, boîte à moustaches, etc.), lui-même connecté à une cartographie interactive. L'ensemble de ces informations est alors projeté dans les différentes fenêtres d'un écran d'ordinateur, et elles sont reliées les unes aux autres de manière à ce que la visualisation d'un ou de plusieurs éléments sur l'un de ces graphiques se répercute immédiatement sur l'ensemble des autres. Cette interactivité nécessite une mise à jour immédiate des vues résultantes, rendue possible par un calcul informatique en temps réel. Elle permet de ce fait, au moins en théorie, d'impliquer le *facteur humain* dans l'exploration des données : à l'aide de la souris (ou de n'importe quel autre média équivalent), l'utilisateur devient capable de détecter des motifs et des structures dans les données, qu'il visualise de manière plus complète et plus profonde que par une simple vue statique et rigide. Pour A. Banos (2001), « l'objectif d'une telle multiplication des vues n'est pas seulement de choisir une représentation parmi un ensemble de solutions. Il s'agit également de favoriser l'émergence d'hypothèses concernant l'organisation spatiale sous-jacente à la carte brute, au moyen de vues aux propriétés variées mais néanmoins connues [...] La souris devient un prolongement naturel de l'esprit, l'utilisateur interrogeant ses données à travers les multiples vues à sa disposition, alternant les angles d'approche, naviguant en surface comme en profondeur par simple requête graphique, s'immergeant dans ses données jusqu'à en avoir une connaissance intime ».

D'un point de vue logiciel, dès le début des années 1990, la plateforme Spider-Regard-Manet (Haslett *et al.*, 1990) a fait partie des premières applications pour l'exploration de données. Relativement limitée dans son approche cartographique, elle a été complétée par le logiciel SpaceStat (Anselin, 1992, 1995) permettant une analyse plus solide des données spatiales, et plus ou moins directement connectée avec un Système d'information géographique permettant de faciliter les requêtes spatiales et les opérations de superpositions de couches d'informations. L'EDA et l'ESDA apparaissent ainsi véritablement comme une forme de Système Interactif de réflexion assistée par ordinateur (SIRAO), ce

qui les oriente vers une prise en compte plus systématique du voisinage des données étudiées, dont l'échelle influence incontestablement la visualisation (Antoni *et al.*, 2004). Concrètement, le programme Geographer (figure 8.3) offre aujourd'hui un exemple de ce type de système exploratoire dédié à l'analyse des mobilités urbaines à partir des enseignements de la *Time geography*.

## CHAPITRE 9

### **L'approche par la complexité**

*« Il n'y a aucune limite à la complexité des choses,  
car un élément en entraîne un autre »*

Sénèque

La troisième approche est celle qui relève de la complexité, c'est-à-dire, pour faire simple, de l'« entremêlement » de variables en interaction. Pour R. Brunet *et al.* (1992), cette complexité peut toutefois (et ironiquement) apparaître comme un « mot commode pour masquer le renoncement à l'analyse scientifique ». On dit en effet d'un être humain normalement constitué qu'il est capable de raisonner correctement en manipulant simultanément jusqu'à trois variables ; dans le cas d'un génie, ce chiffre pourrait monter jusqu'à sept. Réfléchir à la complexité réelle du monde apparaît donc plus ou moins naturellement hors de notre portée. Mais le raisonnement artificiel des ordinateurs peut aujourd'hui largement y aider. Initialement mise au point par les mathématiques et l'informatique pour les besoins de la cybernétique, l'intelligence artificielle apporte désormais des solutions pour l'aménagement du territoire. Les automates cellulaires sont par exemple utilisés pour simuler l'évolution de l'occupation du sol ; les systèmes multi-agents permettent de reproduire la mobilité quotidienne d'individus dans leur environnement ; les systèmes experts sont commodes pour localiser certains équipements (stations de transports et plateformes de rabattement par exemple). Fondamentalement, c'est toutefois l'intégration de la théorie générale des systèmes (1968) au sein des sciences sociales qui a probablement été la plus décisive pour combiner ces approches, dans une démarche interactive de réflexion assistée par ordinateur. En particulier, les modèles LUTI (*Land Use and Transport Integrated*) apparaissent comme une solution méthodologique pertinente pour répondre simultanément aux questions d'urbanisation et de mobilité, tout comme l'approche encore émergente du *Life cycle assessment* (LCA ou Évaluation du cycle de vie) semble l'être pour l'évaluation environnementale des aménagements. Dans ce contexte,

les modèles LUTI constituent aujourd'hui l'un des aboutissements les plus avancés pour l'aide à la décision et la gouvernance territoriales.

## 1. LES SYSTÈMES « INTELLIGENTS »

### 1.1. La systémique

L'une des premières approches que l'on pourrait considérer comme systémique provient du *Traité des systèmes* publié en 1749 par Étienne Bonnot de Condillac (1715-1780). Dédié aux sciences politiques, ce traité présente une approche très critique de la philosophie de son époque, en s'inspirant des travaux de John Locke (1632-1704) sur la nature des idées (simples ou complexes). Il estime à ce sujet que les concepts mis en œuvre par les philosophes sont souvent trop abstraits, et qu'ils sont faits des présupposés non démontrés, ce qui lui confère une position très polémique vis-à-vis de la philosophie, mais également de la psychologie, et plus généralement du rationalisme de Descartes. Dans son ouvrage, E. Bonnot de Condillac prend un exemple particulièrement démonstratif de ce qu'il considère comme un système : « Je suppose qu'un homme qui n'a aucune idée de l'horlogerie, ni même de mécanique, entreprenne de rendre raison des effets d'une pendule : il a beau observer les sons qu'elle rend à certaines périodes, et remarquer le mouvement de l'aiguille, privé de la connoissance de la statique, il lui est impossible d'expliquer ces phénomènes de manière raisonnable [...] Ouvrez-lui cette pendule, expliquez-lui en le mécanisme ; aussitôt il saisit la disposition de toutes les parties, il voit comment elles agissent les unes sur les autres, et il remonte jusqu'au premier ressort dont elles dépendent ». On retrouve ici en filigrane les éléments du débat qui oppose l'approche analytique à l'approche systémique.

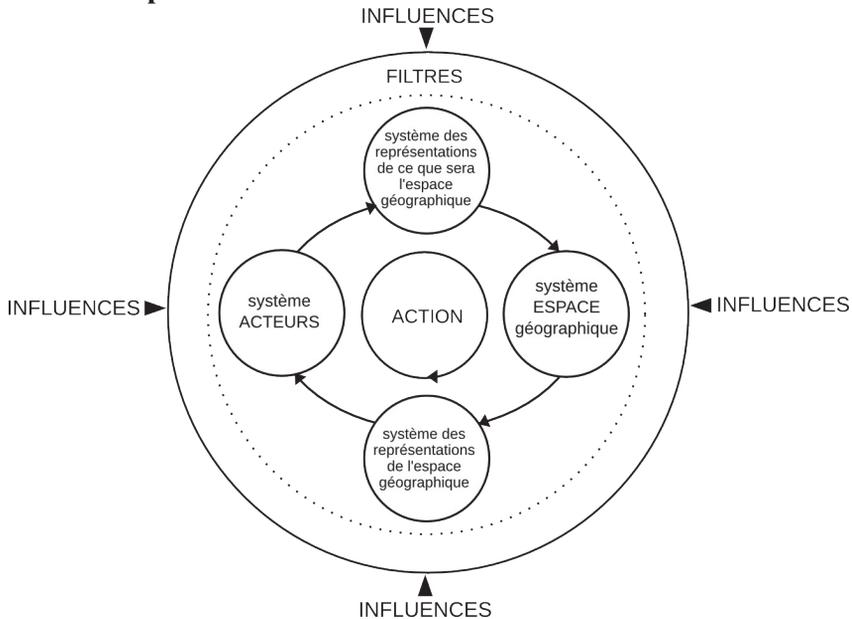
Concrètement, l'approche systémique ne s'affirme cependant qu'au milieu du 20<sup>e</sup> siècle, et sera véritablement révélée par l'ouvrage que L. von Bertalanffy publie en 1968. *La Théorie générale des systèmes* est depuis reconnue comme une publication fondatrice pour la systémique, même si les bases qui permettent de l'appuyer apparaissent assez diversifiées dans le temps et dans l'espace. Biologiste de formation, Ludwig von Bertalanffy (1901-1972) s'intéresse avant tout aux organismes, qu'il considère comme des systèmes ouverts (1937), dans une conception holiste de la nature et de la vie. Largement développé et défendu par l'écrivain britannique Arthur Koestler (1905-1983) dans *The Ghost in the Machine* (1967), le holisme correspond à une

manière de voir le fonctionnement du monde en *totalité* (le terme grec *holos* signifiant « totalité » ou « entier ») dans la mesure où, dans la nature, les ensembles constitués seraient supérieurs à la simple somme des parties qui les constituent. Selon cette logique, chaque phénomène constitue un ensemble indivisible, et sa décomposition en une somme de parties différentes ne peut pas suffire à le définir, à le comprendre et à l'expliquer. D'emblée, l'approche systémique se trouve donc en opposition avec le réductionnisme cartésien qui vise justement à décomposer la complexité en parties plus simples. Le paradigme systémique considère donc fondamentalement les éléments constitutifs d'un processus comme indissociables les uns des autres, et tente d'analyser les liens qui les unissent et qui les font fonctionner comme un tout « supérieur » à la somme des éléments qui le composent. Dans ce schéma, les notions d'organisation et de régulation deviennent centrales, et se trouvent plus ou moins résumées par une série de *boucles de rétroaction*. L'ensemble constitue de ce fait une sorte de modèle qui, au-delà de la biologie à partir de laquelle il a été conçu, peut s'appliquer à des domaines très variés. Paru en 1975, *Le macroscope* de Joël de Rosnay en offre une excellente illustration et tente d'en appliquer les principes à des systèmes aussi différents que l'écologie, l'économie, l'entreprise, les cellules biologiques ou encore la ville.

À la fin des années 1970 et dans les années 1980, les développements réalisés autour de la systémique permettront l'émergence de deux nouveaux concepts essentiels : la communication et l'auto-organisation. Telle que développée par L. von Bertalanffy, la notion de « système ouvert » permet en effet de concevoir des échanges de matière et d'information qui témoignent de la capacité des systèmes à s'organiser par eux-mêmes. Cette hypothèse d'auto-organisation se trouve alors renforcée par les travaux du physicien Ilya Prigogine (1917-2003) sur les structures dissipatives en physique. L'auto-organisation semble dès lors compatible avec le second principe de la thermodynamique tel qu'il a été défini par Sadi Carnot (1796-1832) dans la mesure où elle permet de concevoir le fait qu'ils sont capables de créer des boucles de néguentropie, ce qui ouvre une nouvelle voie théorique pour concevoir les organismes vivants, mais aussi les systèmes sociaux et les organisations économiques. Entendue dans ce contexte, l'auto-organisation permet aux systèmes de se mettre en *ordre* et de maintenir cet ordre de manière dynamique : au-delà d'un certain seuil que l'on pourrait considérer comme critique, ils parviennent à accélérer leur croissance, à changer d'état, à passer d'un état stable à un état instable, ou inversement. Cette capacité leur permet également de

développer des propriétés dites émergentes, c'est-à-dire, pour essayer de faire simple, des caractéristiques qui ne peuvent pas leur être associées au départ dans la mesure où elles n'existent pas, mais qui permettent de les définir à l'arrivée. Ces caractéristiques auraient donc émergé dans l'intervalle, par le fonctionnement interne du système en lui-même, sans intervention extérieure. Pour illustrer cette théorie de l'émergence appliquée aux systèmes urbains, D. Pumain *et al.* (1989) ont par exemple proposé d'interpréter l'organisation et l'évolution des villes à travers une série d'expérimentations théoriques centrées sur les notions de boucles de rétroactions, de dynamiques et d'interactions socio-économiques.

Figure 9.1  
**La théorie générale des systèmes : un prisme théorique pour décrire le fonctionnement des territoires**



Sur cette figure, l'espace géographique est considéré à travers l'interaction de sous-systèmes d'acteurs, d'espaces et de représentations, qui sont également influencés par l'extérieur à travers un ensemble de « filtres ».

Source : Moine, 2006

D'un point de vue technique, la théorie des systèmes a également conduit à des applications pratiques. À partir des conclusions qu'il tire de ses études sur le perfectionnement des systèmes de visée pour l'artillerie anti-aérienne, le mathématicien américain Norbert Wiener (1894-1964) en utilisera par exemple les principes pour en repenser

le fonctionnement selon un système de rétroactions : la circulation de l'information, nécessaire au contrôle du système, doit s'effectuer sous la forme d'une boucle fermée, ce qui permet d'évaluer ses résultats et de l'optimiser à partir de chaque expérience passée. Ici, les boucles de rétroaction ne sont donc plus uniquement des éléments de réflexion théorique : il devient possible de les appliquer à des machines et de concevoir leur fonctionnement à partir d'elles. C'est dans ce contexte que la cybernétique (Wiener, 1948) étudiera les régulations au sein des systèmes artificiels (machines), comme des systèmes vivants (organismes biologiques), à l'aide de la systémique. Très « populaire » dans les années 1970 et 1980 dans quasiment toutes les disciplines scientifiques, la cybernétique déclinera néanmoins rapidement après la mort de N. Wiener. Mais l'ambition qu'elle a générée a constitué une motivation importante qui permettra de revisiter de nombreux principes à la lumière de la théorie des systèmes : les sciences cognitives et la psychologie, les théories biologiques et l'écologie, les automates cellulaires (qui seront les premiers outils mathématiques permettant l'étude formelle des systèmes auto-organisés), ou encore la théorie de la communication de C. Shannon, la théorie des jeux, le principe des circuits et des files d'attente utiles à la modélisation des transports, le développement de logiciels, l'organisation des systèmes sociaux, la régulation monétaire et financière, soit, en somme, n'importe quel objet d'étude dont les éléments peuvent être mis en relation et décrits sous la forme d'un système de boucles. D'un point de vue philosophique, la systémique marquera également la façon de penser de la fin du 20<sup>e</sup> siècle, notamment en France où elle constituera un socle de réflexion fondamental pour les travaux d'Edgar Morin (1990) ou de Jean-Louis Le Moigne (1999), qui la considéreront comme un principe d'organisation fondamental, permettant de créer de l'ordre là où il était difficile d'en apercevoir auparavant. En géographie, la théorie générale des systèmes reste fondamentale pour décrire le fonctionnement des territoires, considérés comme des systèmes territoriaux. A. Moine (2006) a par exemple proposé de les considérer à travers l'interaction d'un sous-système d'acteurs, d'espaces et de représentations qui s'influencent les uns les autres (figure 9.1). Ce type de considérations théoriques peut être complété par une approche plus opérationnelle : la dynamique des systèmes.

### *1.2. La dynamique des systèmes*

La dynamique des systèmes peut être considérée comme la branche mathématique ou informatique de la systémique. Elle est née à la fin

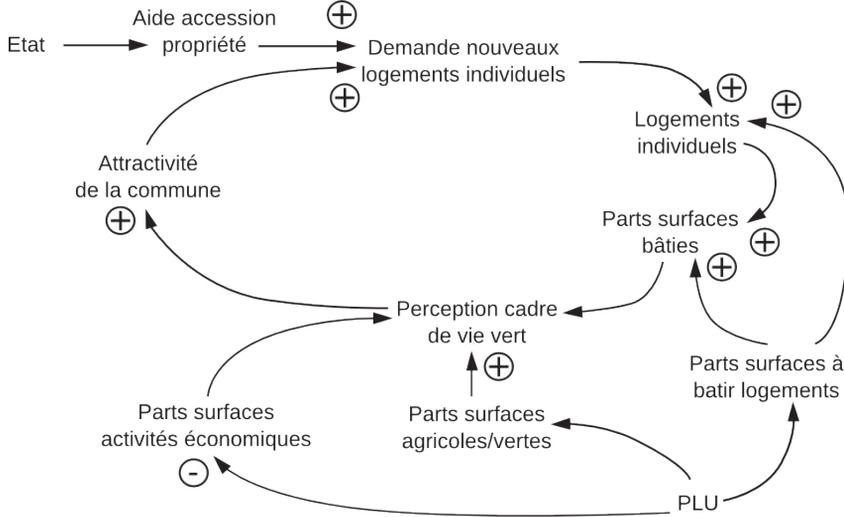
des années 1960, sous l'impulsion de l'informaticien J.W. Forrester (1968). Même si les travaux alarmants réalisés au sein du Club de Rome lui accordaient déjà une grande importance pour renouveler les méthodes permettant de répondre aux enjeux de la fin du 20<sup>e</sup> siècle, c'est véritablement le développement de l'informatique et des ordinateurs personnels qui contribuera à son succès scientifique. Comme la systémique, la dynamique des systèmes tente en effet de décrire le monde sous la forme de systèmes complexes composés d'éléments reliés les uns aux autres par des boucles de rétroaction, dans l'objectif de comprendre leur fonctionnement dans le temps. Mais, pour ce faire, elle se fonde sur un outillage spécifique qu'elle partage avec la cybernétique : une formalisation mathématique stricte, qui permet notamment de décrire les systèmes sous la forme d'équations. L'avantage de cette façon de faire est qu'elle permet de calculer des solutions et, en s'appuyant sur la puissance des ordinateurs, de résoudre « rapidement » des problèmes relativement complexes, en particulier lorsqu'il s'agit de décrire des grands systèmes. Le résultat de cette résolution équationnelle est alors obtenu par simulations, simulations qui permettent de déterminer la valeur des variables composant le système au cours du temps.

Mais, pour parvenir à cet objectif, il est nécessaire de considérer une étape très concrète : la définition de la nature des boucles que contient le système, schématisées sous la forme de diagrammes d'influence, et de *diagrammes causaux*. Ces boucles peuvent être de deux sortes. D'une part, les boucles de *rétroaction* dites négatives ont une action stabilisatrice sur le système et lui permettent de revenir à son équilibre ; l'image simple d'un homme devant un feu en hiver permet d'en comprendre facilement le principe : j'ai froid, donc je m'approche du feu, donc j'ai chaud, donc je m'éloigne du feu, donc j'ai froid, donc je m'approche du feu, etc. Il s'agit ici d'une boucle stabilisatrice ou régulatrice, qui s'apparente à un cercle vertueux (tout reste dans l'ordre au sein d'un système dynamique mais stable). D'autre part, les boucles de rétroaction dites *positives* ont au contraire tendance à amplifier un processus et donc à conduire le système vers un déséquilibre, selon une logique proche de l'« effet boule de neige » ou du cercle vicieux, tel qu'il est par exemple connu en économie dans le cas d'une spirale inflationniste : lorsque le prix d'un produit essentiel augmente, il entraîne l'augmentation mécanique des autres produits avec lui, mais avec un effet retard ; chaque tentative de correction des écarts de prix n'a plus alors comme effet que de contribuer à leur augmentation future.

Comme le montre le dernier exemple, la notion de *retard* constitue un élément essentiel de la dynamique des systèmes. Elle permet d'introduire des *stocks* au sein du système, et de simuler leur *écoulement* avec des vitesses différenciées. Le cas des mobilités et du trafic automobile permet de l'illustrer par l'intermédiaire d'une boucle de rétroaction positive relativement classique en économie des transports. De manière simplifiée, les aménageurs et les décideurs considèrent souvent un peu rapidement que si une route est congestionnée par des véhicules (stock), la construction ou l'ouverture d'une voie supplémentaire permettra d'en fluidifier le trafic (écoulement), et donc d'augmenter la vitesse moyenne sur le réseau. L'expérience montre cependant que cet effet, somme toute assez logique, ne dure qu'un temps : progressivement, des usagers qui n'empruntaient pas la route modifiée se trouvent incités à l'utiliser pour profiter de cette vitesse, jusqu'à ce que cette dernière atteigne un niveau de congestion équivalent à celui qu'elle connaissait avant la mise en service de la nouvelle voie. Cet effet est dit induit, et constitue une conséquence assez classique de la création de nouvelles infrastructures routières. Le deuxième effet de congestion intervient logiquement avec un certain *retard*, comme cela a été démontré par le paradoxe de Downs-Thomson (Thomson, 1972 ; Downs, 1992, 2003). Ici, la congestion du trafic invite à construire plus d'infrastructures routières qui, à leur tour, génèrent paradoxalement plus du trafic, etc. Nous sommes donc bien face à une boucle de rétroaction positive (cercle vicieux), avec un délai de réponse qui en rend le fonctionnement difficile à comprendre de manière immédiate.

Dans la réalité, les phénomènes rétroactifs de ce type font généralement intervenir une multitude de boucles (négatives et positives), dont les interactions deviennent rapidement non linéaires avec, dans la plupart des cas, des délais ou des retards qui augmentent en même temps que la complexité d'évolution du système. Pour les décideurs, cette complexité joue en défaveur de la lisibilité du système dans sa totalité, et peut provoquer une perception biaisée ou trop partielle des phénomènes et de leurs conséquences, possiblement contre-intuitives. Dans tous les cas, elle invite à ne pas limiter l'analyse du projet d'aménagement à ses conséquences immédiates, d'un point de vue temporel comme d'un point de vue spatial. Pour pallier cette difficulté et tenter de mieux comprendre le fonctionnement complet du système, une solution consiste à recourir à la modélisation, dont les simulations permettent de tester des scénarios différents et alternatifs à plus ou moins long terme.

Figure 9.2  
**Le modèle Dynacité (Gacogne, 2010)**



Le modèle offre une illustration de la dynamique des systèmes appliquée à l'aménagement du territoire. Sur ce diagramme simplifié, l'influence des variables est schématisée par une flèche (+) lorsqu'elles évoluent dans le même sens (processus amplificateur) ; les flèches (-) indiquent une boucle de rétroaction négative entre des variables qui évoluent en sens inverse (stabilisation du système). L'ensemble tente de représenter de manière réaliste le comportement d'acteurs face à la périurbanisation.

Source : Gacogne, 2010

Dans cette perspective, le modèle Dynacité (Gacogne, 2010) offre une bonne illustration de l'intérêt concret de la dynamique des systèmes pour l'aménagement des territoires. Développé à partir du logiciel Vensim (Ventana Systems), il intègre près de 280 variables reliées entre elles par de nombreuses boucles, qu'il est relativement aisé d'identifier et de comprendre lorsqu'elles sont prises en compte de manière isolée. L'ensemble tente de représenter de manière réaliste les comportements d'acteurs confrontés à la question de la périurbanisation. Dans le modèle, les espaces naturels (« verts ») sont considérés comme une ressource finie, qui disparaît peu à peu avec le développement de la forme urbaine et des espaces bâtis. *Grosso modo*, les aides à la construction fournies par l'État tendent à augmenter la demande de maisons individuelles dans les communes périurbaines et, par voie de conséquence, la part des surfaces bâties, au détriment des espaces verts et de leur perception par les habitants. Ces modifications auront tendance à affecter le cadre de vie et l'attractivité de la commune, et donc à remettre en cause les choix de localisation résidentielle des propriétaires. Le système intègre également la présence d'activités

économiques et agricoles ainsi que l'urbanisme réglementaire par le biais des plans locaux d'urbanisme. Sur le diagramme simplifié (figure 9.2), l'influence qu'exercent les variables les unes sur les autres est schématisée par une flèche accompagnée du signe (+) lorsque les deux variables évoluent dans le même sens (plus la « perception du cadre de vie vert » augmente, plus l'« attractivité de la commune » augmente), soit une relation qui témoigne de processus amplificateurs. En revanche, le signe (-) indique une boucle de rétroaction négative entre des variables qui évoluent en sens inverse (plus la « part des surfaces bâties » augmente, plus la « perception du cadre de vie vert » diminue), ce qui contribue à la stabilisation du système. Le diagramme offre ainsi une « image » des interactions entre les variables, mais sans déterminer *a priori* l'évolution dynamique qui peut en résulter. Ce sont ensuite les simulations informatiques qui rendent effectivement compte de cette dynamique. À titre expérimental, le modèle a été appliqué dans la périphérie de Lyon, où il a servi d'outil d'aide à la décision prospective aux acteurs locaux pour cadrer les politiques publiques ; il a notamment permis d'identifier certains leviers d'action et de tester l'efficacité de mesures réglementaires en simulant des scénarios variés qui n'avaient jamais été expérimentés par le passé.

Ainsi, comme l'avait déjà souligné J.W. Forrester, la dynamique des systèmes n'a pas pour objectif fondamental de déterminer des situations optimales (optimisation) ou de prévoir le futur (prédiction). Son rôle premier consiste plutôt à analyser des situations complexes et à les rendre intelligibles pour un groupe diversifié d'acteurs dont les objectifs sont souvent divergents, afin de répondre à des questions du type *what-if?* : que se passerait-il si l'on faisait ceci ou cela ? La simulation par dynamique des systèmes présente donc également un intérêt pédagogique pour la gouvernance des territoires, dans la mesure où, par sa nature, elle permet d'intégrer une approche interdisciplinaire. Dans ce sens, elle trouve un complément intéressant, et désormais presque indispensable, dans l'ensemble des méthodes de simulation qui découlent de l'intelligence artificielle.

### 1.3. L'intelligence artificielle

L'expression « intelligence artificielle » est assez difficile à définir et peut prêter à confusion selon les disciplines qui l'emploient. Elle intègre généralement deux conceptions différentes mais complémentaires : (i) l'étude des mécanismes de l'intelligence par l'intermédiaire du calcul informatique et de la simulation qui permettent de tester un modèle ou une théorie ; (ii) la volonté de doter les machines (en

l'occurrence des ordinateurs) de « capacités habituellement attribuées à l'intelligence humaine » (Haton et Haton, 1993). Si la seconde conception est généralement plus répandue que la première dans le monde scientifique et technique, c'est essentiellement la première qui concerne les sciences sociales et l'aménagement du territoire, malgré une approche longtemps réservée au monde de l'informatique.

Historiquement, c'est en effet au 19<sup>e</sup> siècle, quand le logicien anglais George Boole (1815-1864) conçoit les règles de la logique moderne et que le mathématicien Charles Babbage met au point sa « machine analytique » (1842) que le monde scientifique envisage pour la première fois un concept proche de l'intelligence artificielle. Ce dernier ne sera pourtant concrétisé techniquement qu'au milieu du 20<sup>e</sup> siècle, avec les travaux de l'informaticien Alan Turing (la *machine de Turing* date de 1936), avec la cybernétique (née à partir des travaux de Norbert Wiener aux alentours de 1943) qui a mis en évidence les systèmes de boucles de rétroactions dans le traitement des informations par le cerveau, et surtout avec l'émergence de l'informatique et des premiers ordinateurs. Le principe consiste alors à utiliser ces ordinateurs pour reproduire un raisonnement, comme le ferait un être humain quand il tente de reconnaître certaines situations et de s'y adapter. Officiellement, l'intelligence artificielle naît véritablement en 1956, lors de la conférence de Dartmouth (États-Unis) à laquelle participait notamment Claude Shannon, conférence novatrice liée à l'étude de la manière avec laquelle les ordinateurs pouvaient être dotés d'intelligence. Même si le psychologue Allen Newell (1927-1992) ou le politologue Herbert Simon (1916-2001) se sont immédiatement opposés à l'expression « intelligence artificielle », elle y sera consacrée à travers un premier exemple concret : le *Logic Theorist*, un programme informatique écrit entre 1955 et 1956, le premier du genre à être capable de démontrer des théorèmes à partir d'une recherche sélective, à l'instar de l'être humain.

L'expression « intelligence artificielle » pose toutefois en elle-même un certain nombre de problèmes. Le mot « intelligence », d'abord, renvoie à un concept très flou, complexe et relatif (Haton et Haton, 1993) : l'intelligence est extrêmement difficile à définir et, de ce fait, à mesurer et à appréhender concrètement. Ensuite, l'association des mots « intelligence » et « artificielle » suggère implicitement qu'il existerait une intelligence *naturelle*, c'est-à-dire relative à l'homme (voire aux animaux supérieurs) et une intelligence *artificielle*, relative aux objets techniques et aux machines. Dans ce cadre d'idées, l'objectif de l'intelligence artificielle consiste à copier l'intelligence naturelle de façon artificielle, afin de l'introduire dans des machines, qui deviendraient dès lors capables d'un comportement

ressemblant à un comportement intelligent. Dès 1950, le test d'Alan Turing (1912-1954) permettait en effet de savoir si une machine peut être considérée comme intelligente avec une réponse binaire : oui, elle l'est ; non, elle ne l'est pas. Ces développements successifs et rapides montrent bien l'intérêt que l'on porte à cette époque à la mise au point de machines intelligentes. Au tournant du 20<sup>e</sup> siècle, la majorité des définitions de l'intelligence artificielle confirment encore cette idée : pour J. Haugeland (1989), l'intelligence artificielle est un « effort passionnant de faire penser des ordinateurs et des machines avec des esprits, au sens figuré et au sens propre » ; pour R. Kurzweil (1990), elle se concrétise comme un art, celui de « créer des machines qui réalisent des actions qui requièrent de l'intelligence quand elles sont accomplies par des humains » ; pour G.F. Luger (2008), l'intelligence artificielle apparaît techniquement comme « la branche de l'informatique qui est consacrée à l'automatisation du comportement intelligent ».

À l'heure actuelle, en s'appuyant sur des machines fonctionnant avec des processus parallélisés capables de décupler leur puissance, cette branche a produit une famille assez hétéroclite d'outils permettant de résoudre de nombreux problèmes. Les sciences humaines et sociales en utilisent généralement trois types, désignés par l'expression *Neurocomputing* (Fischer et Leung, 2010) dans le monde anglo-saxon : les systèmes d'arbres (systèmes experts et réseaux de neurones), les automates cellulaires et les systèmes multi-agents.

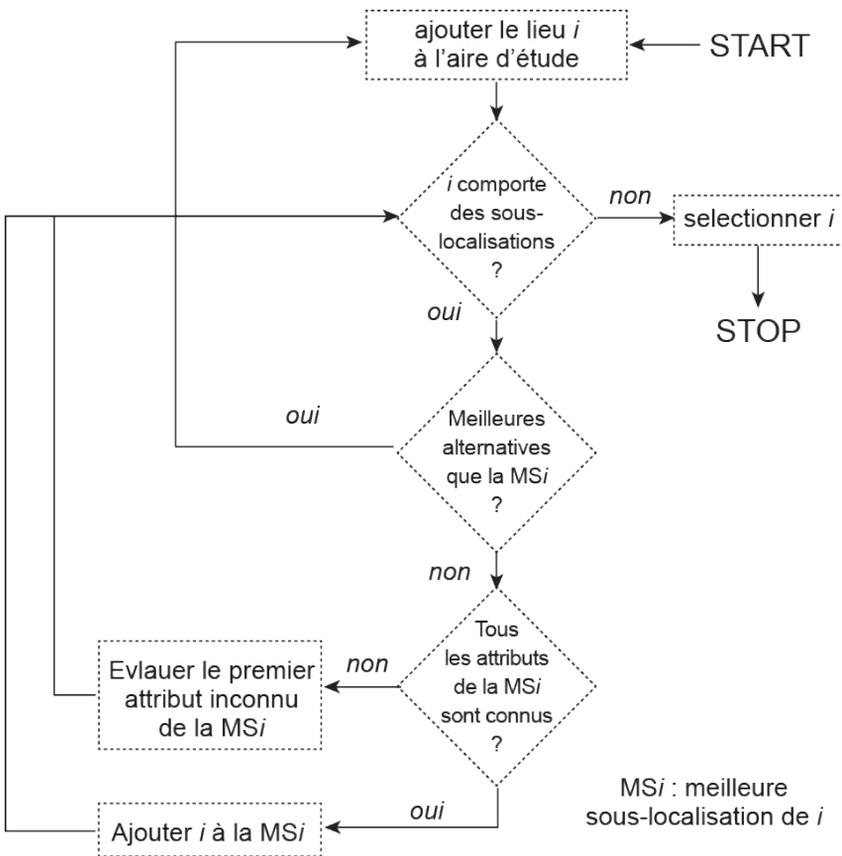
## 2. LES SYSTÈMES INTÉGRÉS

### 2.1. *Systèmes experts et réseaux de neurones*

Un système expert peut se définir comme un logiciel (ou un ensemble de logiciels) capable des mêmes performances qu'un expert humain pour répondre à une question (ou une série de questions) données dans un domaine de compétences restreint et limité, à partir de l'exploitation de connaissances qui lui ont été explicitement fournies par des experts de ce domaine. Il se compose généralement de trois éléments : (i) une base de connaissances qui correspond au savoir-faire nécessaire pour répondre à la question posée, (ii) une base de faits contenant les données qui permettent de définir la question à laquelle il s'agit de répondre et qui peut s'enrichir au fur et à mesure des raisonnements du système, et (iii) un moteur d'inférence qui exploite simultanément les connaissances et les faits pour conduire un raisonnement. Ainsi, de manière

générale, le fait qu'un système expert soit capable de manipuler des données et des connaissances selon sa propre logique (certes programmée) lui permet de proposer des solutions que des experts humains n'auraient pas considérées, même si leurs bases de connaissances sont identiques. En conséquence, la machine permet aux experts qui l'ont conçue d'enrichir leurs connaissances sur un sujet qu'ils maîtrisent à partir d'un mode de raisonnement opéré en parallèle, et qui ne serait peut-être pas apparu de manière immédiate ou naturelle.

Figure 9.3  
Système expert



À partir d'une base de connaissances et de faits permettant de définir la question à laquelle il s'agit de répondre, le moteur d'inférence du système expert conduit un raisonnement programmé et propose des solutions.

Cette figure présente le schéma simplifié d'un système expert dédié à la localisation de sites (algorithme profMat ; Arentze *et al.*, 1996). La méthode consiste à tester plusieurs localisations alternatives d'implantation et à choisir automatiquement la meilleure selon des critères (attributs) définis dans la base de connaissances.

Pour l'aménagement du territoire et la localisation d'activités diverses et variées, l'utilisation de systèmes experts pose toutefois un certain nombre de questions quant à la compatibilité de ce type d'approches. D'une part, en effet, il n'existe pas *a priori* de base de connaissance clairement définie dans le domaine de l'aménagement, de l'urbanisme ou de la prospective territoriale ; même pour des problèmes dont les solutions peuvent apparaître simples au premier abord, comme la répartition d'industries, les connaissances acquises sur les règles de localisation ne sont pas suffisamment claires pour être implémentées dans un système automatique. D'autre part, les processus opérationnels de décision sont souvent trop complexes pour être imités par un système informatique : ils tiennent souvent compte de logiques sociales, psychologiques, techniques, économiques, environnementales ou politiques qui restent difficiles à articuler et à structurer de manière satisfaisante. Cela étant, les systèmes experts ont été utilisés de manière efficace dans différents cas (Witlox, 2005) : la localisation de dépôts, l'aide à la délimitation de sites militaires stratégiques, la définition de zones à privilégier pour l'accueil d'investisseurs économiques, etc. De même, T. Arentze *et al.* (1996) ont développé un algorithme de sélection spatiale couplé à un système expert capable de définir le meilleur site d'implantation pour une problématique donnée à partir d'un nombre important de possibilités et de critères de décision, incluant, pour l'exemple d'un commerce, le potentiel de vente, le niveau de concurrence, l'accessibilité, l'environnement économique et le potentiel commercial de chaque site. Dans un premier temps, ce système identifie les meilleures localisations par un processus d'évaluation itératif des différentes options possibles ; dans un deuxième temps, il réduit et affine les recherches au sein de ces zones afin de déterminer précisément les lieux d'implantation (figure 9.3). Durant ces deux opérations, le principal avantage du système expert est la vitesse avec laquelle il est capable de trouver une solution pour des décideurs qui doivent gérer un nombre important de données et de connaissances. En conséquence, le recours aux systèmes experts permet non seulement de réduire les coûts de l'évaluation et de la définition des sites les plus adéquats, mais également d'améliorer la disponibilité et l'accessibilité à un savoir spécifique, balisé par les acquis de la théorie de la localisation.

## 2.2. Automates cellulaires et systèmes multi-agents

Les premiers automates cellulaires ont été inventés dans les années 1940 à partir des travaux du mathématicien John von Neumann (1903-1957).

Ils n'intéressaient au départ que les théoriciens des mathématiques et de l'informatique, qui les utilisaient essentiellement pour résoudre des casse-têtes ou pour construire des « jeux » mathématiques. Dans les années 1970, le *Jeu de la vie* inventé par John Horton Conway est typique de ces expérimentations : cet automate cellulaire possède en effet la particularité que les objets (c'est-à-dire les configurations de cellules alternativement blanches ou noires) qu'il contient peuvent croître ou diminuer de manière complexe, sans que personne ne puisse dire à l'avance si elles se développeront à l'infini ou si elles disparaîtront complètement. À l'inverse de cette complexité, les règles du jeu sont pourtant extrêmement simples : les cellules sont soit vivantes (noires), soit mortes (blanches) ; une cellule vivante reste vivante si deux ou trois voisines sont vivantes, autrement elle meurt ; une cellule morte devient vivante si trois de ses voisines sont vivantes, mais reste morte autrement. Quelle que soit la configuration de départ, c'est-à-dire l'arrangement des cellules noires et blanches sur la grille de l'automate cellulaire, ces règles produisent un mouvement sans fin en créant des objets étranges qui ont été largement étudiés dans la littérature scientifique américaine : des configurations simples et figées (bloc carré de quatre cellules par exemple), des objets oscillateurs périodiques (clignotants, planeurs, etc.), et des formes évolutives plus complexes auxquelles on donna le nom de navette, de crapaud, de phare, de serpent, etc. En 1974, on pouvait ainsi lire dans les colonnes du magazine américain *Time* que des heures de calcul représentant des millions de dollars avaient probablement été gaspillées par la horde grandissante des « fanatiques » de ce jeu mathématique.

Dans les années 1980, les travaux de Stephen Wolfram (1983) contribuent à remettre les automates au goût du jour, et à les faire connaître pour une multitude d'applications possibles dans des disciplines très diverses. Dans la logique de l'intelligence artificielle, S. Wolfram les définit comme des systèmes de cellules interagissant de manière simple, mais qui manifestent un comportement global complexe. D'abord focalisée sur les problèmes des sciences physiques et de la chimie, leur utilisation s'est alors ouverte à la biologie, à la médecine et à l'écologie, avant d'intégrer les disciplines spatiales. En géographie, la logique des automates cellulaires a en effet rapidement fait écho à la conception cellulaire de l'espace géographique (*Cellular geography*) défendue par W. Tobler (1979) et H. Couclelis (1985), ce qui a permis de révéler le caractère profondément territorial de ce type d'outils (Couclelis, 1988). L'usage du sol représenté par carroyage ou par la télédétection correspond en effet presque parfaitement à une configuration d'automates cellulaires, dans laquelle des cellules catégorisées

en fonction de leur occupation du sol (ville, industrie, champ, forêt, eau, etc.) se substituent aux cellules noires et blanches du *Jeu de la vie*. Pour l'évolution de l'occupation du sol, et donc, par exemple, pour la simulation du développement urbain, une des propriétés fondamentales des automates reste également identique : faire émerger des structures complexes au niveau global à partir de règles relativement simples au niveau local (Langlois *et al.*, 1997).

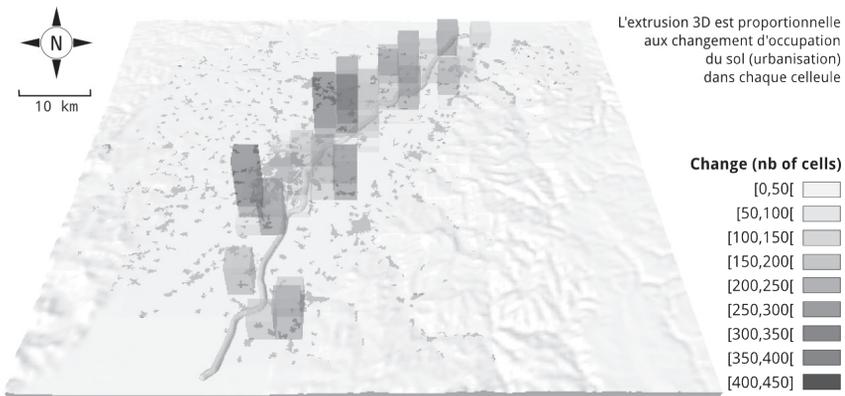
Pour ce faire, l'occupation du sol est représentée par un ensemble de cellules disposées sur une grille (une sorte de carte faite de cellules), dont chacune correspond à une catégorie (et une seule) au temps  $t$ . Cette catégorie peut évoluer dans le temps ( $t + 1, t + 2, \dots, t + n$ ) selon des règles de voisinage : je deviens comme-ci si mes cellules voisines sont comme-ça; ou comme-ça si elles sont comme-ci. Ces règles de transition sont alors appliquées de façon itérative, autant de fois qu'on le souhaite, ce qui fait des automates cellulaires des modèles dynamiques dans lesquels l'espace (par l'intermédiaire des cellules), le temps (par l'intermédiaire des étapes) et les états (par l'intermédiaire des catégories d'occupation du sol) sont tous discrets (Jen, 1990). De nombreux modèles d'automates cellulaires se sont développés sur cette base pour modéliser et simuler les changements futurs de l'occupation, en particulier dans les espaces urbains et périurbains (White et Engelen, 1993 ; Batty et Xie, 1994 ; Benenson et Torrens, 2004 ; Couclelis, 2005 ; Koomen *et al.*, 2011). Ils sont d'ailleurs particulièrement utilisés aux Pays-Bas où ils répondent aujourd'hui à une longue tradition planificatrice en aménagement par l'intermédiaire du modèle Metronamica (*Research Institute for Knowledge Systems*), ou ailleurs en Europe avec l'outil Sleuth (Clarke *et al.*, 1995 ; Clarke, 2008). En France également, le logiciel LucSim est un automate cellulaire dédié à l'analyse et à la simulation géographiques qui a été utilisé pour construire des scénarios prospectifs d'évolution de l'étalement urbain dans la région de Belfort (Antoni, 2006) et qui contribue aujourd'hui à une réflexion plus globale sur le développement de l'eurométropole strasbourgeoise en intégrant le rôle de la frontière et une partie du Bade-Wurtemberg en Allemagne (figure 9.4).

Ainsi, si les automates cellulaires apparaissent comme des outils tout à fait pertinents pour l'aménagement et la prospective territoriale, il est toutefois rare qu'ils se suffisent à eux-mêmes quand on souhaite les appliquer à la prospective et à l'aménagement des territoires. D'une part, il est souvent nécessaire de les contraindre par des *suitability maps*, que l'on pourrait qualifier de cartes d'aménagement « possible » ou « logique », desquelles sont exclus les zones non constructibles, les milieux difficiles à urbaniser, les secteurs les moins accessibles, etc. En ajoutant ces contraintes aux règles de transition des automates, il devient possible

d'augmenter considérablement la pertinence et de mieux contrôler le réalisme des résultats de simulation. D'autre part, il peut également se révéler judicieux de coupler les automates avec d'autres modèles pour associer leurs performances aux concepts qui sous-tendent, par exemple, les principes de l'interaction spatiale, les projections issues d'une chaîne de Markov, les règles obtenues par arbres de décision, etc. Malgré l'ensemble de ces améliorations possibles, qui fondent le champ spécifique des « automates cellulaires géographiques contraints », H. Timmermans (2003) fait toutefois remarquer un de leur point faible plus ou moins incompressible : dans beaucoup de ces modèles, la composante « mobilité » est faiblement représentée dans la mesure où la structuration de l'espace en cellules se marie mal avec la topologie linéaire des réseaux de transports qui restent de ce fait difficiles à intégrer.

Figure 9.4

**Simulation du développement résidentiel à l'horizon 2050  
sur l'espace transfrontalier de l'eurodistrict Strasbourg-Kehl,  
à l'aide de l'automate cellulaire LucSim**



Le scénario simulé prévoit un renforcement de la cohésion territoriale autour du Rhin à partir des ponts qui matérialisent les connexions de part et d'autre de la frontière.

Source : Antoni *et al.*, 2015

De par leur structure plus souple, les systèmes multi-agents permettent en partie de pallier ce problème. Également issus de l'intelligence artificielle distribuée, ils ne se résument pas à une simple grille de cellules différenciées, mais intègrent des éléments et des interactions nettement plus complexes et plus difficiles à formaliser d'un point de vue général. Pour Ferber (1995), un système multi-agents se compose : (i) d'un environnement *E*, c'est-à-dire d'un espace défini selon une certaine métrique, (ii) d'objets *passifs* *O* localisés au sein de cet environnement *E* et susceptibles d'être perçus, déplacés ou modifiés par des agents ;

(iii) d'agents  $A$  qui sont les objets ( $A \in O$ ) actifs du système, (iv) de relations  $R$  qui unissent les objets et les agents entre eux, et (v) d'opérations  $Op$  permettant aux agents  $A$  de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler les objets  $O$ . Ces éléments permettent ainsi de concevoir d'une manière plus formelle la définition donnée par Bond (1988) considérant que la « recherche sur les SMA porte sur la coordination de comportements au sein d'un ensemble d'agents autonomes intelligents, et sur la coordination de leurs connaissances, de leurs buts, de leurs compétences et de leurs plans, afin de réaliser collectivement des actions ou de résoudre des problèmes », rappelant toutefois que ces agents ne sont finalement toujours que des « processus informatiques ayant un unique mécanisme de contrôle et/ou d'intention ».

Selon cette définition, les SMA ont été utiles à toutes les disciplines cherchant à comprendre le comportement collaboratif d'une population sur un espace donné. En biologie et en écologie, ils permettent de reproduire et de spatialiser le système dynamique « proie-prédateur » formalisé par les équations de Lotka-Volterra : une population de prédateurs ne peut pas se maintenir en situation « optimale » si elle élimine l'ensemble des proies dont elle se nourrit, réalité de laquelle découle un équilibre oscillant. Dans le même ordre d'idées, un SMA permet de simuler de manière très réaliste un vol groupé d'oiseaux selon trois règles relativement simples : (i) éviter les collisions en n'étant jamais trop proche de son voisin, (ii) rester aligné avec ses voisins en se déplaçant dans la même direction qu'eux et (iii) rester proche du groupe, dans un rayon de distance déterminé. Cette simulation (générée par exemple par le programme américain *Boids*) fait typiquement émerger un comportement de groupe dans la mesure où le vol se structure selon une forme globale à partir d'une information qui n'est connue qu'au niveau local (les voisins proches), à l'image d'un essaim d'étourneaux.

En sciences sociales, et en particulier pour les questions liées à la géographie ou à l'économie urbaine et aux politiques de transport, les SMA peuvent donc s'avérer utiles pour simuler de nombreux scénarios (Amblard et Phan, 2006). Certaines applications (dont on ne peut fournir ici que quelques exemples) sont avant tout théoriques : le modèle AccesSim (Delage *et al.*, 2009) permet par exemple de réfléchir à la localisation et à l'accessibilité des services d'une ville pour la population. Développé à partir de la plateforme NetLogo (université Northwestern), il est essentiellement utilisé pour tester des hypothèses et des scénarios de répartition des aménités dans une perspective exploratoire et pédagogique. À une autre échelle, les modèles Simpop (Pumain *et al.*, 1997 ; Bretagnolle et Pumain, 2010) et Eurosim (Sanders *et al.*, 2007) font appel à la « technologie agents » pour modéliser et simuler le déve-

loppement des villes et des réseaux urbains dans le long terme (1300-2000). Ici, les villes prennent la forme d'agents localisés de manière fixe dans l'espace mondial ou européen et communiquent entre elles par des échanges (commerce et innovations) qui permettent de faire émerger et de reproduire l'évolution d'une structure urbaine hiérarchisée. Dans une optique complètement différente, les SMA s'avèrent également utiles pour traiter la question des ségrégations urbaines, et ont permis de faire évoluer le modèle historique de Schelling à partir des fondements de l'intelligence artificielle : le système implémenté par I. Benenson *et al.* (2002) sur l'exemple de Tel-Aviv permet de formaliser et de simuler les mouvements résidentiels des populations en fonction de la composition de leur voisinage local. Enfin, dans une perspective plus pratique ou plus opérationnelle, le modèle Parkagent (Levy *et al.*, 2013) a également permis de traiter la question du trafic et du stationnement en ville afin de proposer des scénarios faisant intervenir la tarification ou le temps de stationnement comme des variables de calibrage pour la mise en place de politiques de transport. De même, certains modèles LUTI comme Illumas ou MobiSim recourent aux SMA pour simuler les mobilités quotidiennes ou résidentielles d'agents et de ménages de manière à reproduire des dynamiques complexes et intégrées.

### 2.3. Modélisation LUTI

L'émergence des modèles LUTI (*Land Use and Transport Integrated*) est issue d'un constat qui découle de l'approche systémique : pour la majorité des chercheurs et des décideurs impliqués dans les questions d'aménagement du territoire, il est en effet à peu près clair depuis les années 1980 que les politiques de transport et la planification de l'urbanisation sont les deux faces d'une même pièce, et qu'elles doivent donc être intégrées et prises en compte comme les éléments interdépendants d'une même boucle de rétroaction (en l'occurrence positive). Cette boucle a d'ailleurs été dessinée par M. Wegener et F. Fürst (1999) dans un schéma relativement célèbre, qui sert de référence à quasiment tous les modèles LUTI : l'urbanisation n'est possible que dans les lieux qui sont accessibles ; pour rendre ces lieux accessibles, il est nécessaire de les doter d'un réseau de transport ; la construction d'un réseau de transport les rend plus attractifs ; cette attractivité conduit à leur densification et à l'urbanisation de leurs alentours ; la densification provoque une nouvelle demande de transport ; qui conduit à une nouvelle urbanisation ; et ainsi de suite. Partant de ce schéma, on peut considérer que les modèles LUTI sont simplement les outils qui permettent de simuler ces interactions et de développer des scénarios

prospectifs pour les aménagements futurs, en tenant compte autant que possible des effets de retard et des conséquences contre-intuitives qu'ils pourraient engendrer au sein du système. La littérature consacrée à ce sujet montre en effet qu'ils sont censés répondre à trois objectifs complémentaires mais bien différenciés : (i) évaluer les options stratégiques possibles en matière d'infrastructures de transport et de développement résidentiel, commercial ou industriel ; (ii) fonder cette évaluation sur des critères objectivés de développement durable (émissions liées aux transports, impacts environnementaux, qualité et diversité des cadres de vies) ; (iii) discuter de cette évaluation et de ces options dans le cadre d'un débat ouvert, illustré par des résultats prospectifs tangibles. Par définition, les modèles LUTI se situent donc à la croisée des principaux objectifs de l'aménagement du territoire, et il n'est pas étonnant que leur usage se soit largement développé à partir des avancées réalisées en économie, en géographie, en psychologie ou en géomatique depuis la fin des années 1970 et le début des années 1980.

En effet, si certains considèrent que le premier modèle de type LUTI est apparu en 1964 avec Metropolis, directement dérivé du modèle de Lowry, c'est véritablement à l'aune des années 1980 que se développent les modèles d'interaction entre transports et usages des sols. Ils émanent de travaux de recherche à peu près concomitants dans le temps, mais plus diversifiés dans l'espace: les laboratoires américains en sont les principaux initiateurs, mais ils partagent ce rôle avec le continent sud-américain, notamment au Venezuela avec le modèle Tranus en 1982 (de La Barra, 1998) et au Chili avec le modèle Mussa en 1992 (Martinez et Donoso, 2010). Les modèles LUTI trouvent ainsi leurs racines historiques dans le monde américain et son aire d'influence de l'époque, auquel s'ajoutent quelques contributions européennes, notamment le modèle Irpud développé en Allemagne pour la ville de Dortmund (Wegener, 1982, 1985) ou asiatiques, avec le modèle Rurban développé au Japon (Miyamoto et Kitazume, 1989).

D'un point de vue méthodologique, la plupart de ces modèles sont fondés sur la théorie économique et s'appuient sur la maximisation de l'entropie pour modéliser les processus spatiaux à une échelle très agrégée, ou sur la théorie de l'utilité aléatoire qui permet une modélisation plus fine à l'échelle des individus. Au courant des années 1990, grâce à la puissance accrue des ordinateurs et à la généralisation des SIG, cette approche désagrégée sera complétée par les techniques de micro-simulation, notamment au sein des modèles Delta (Simmonds, 1999) et Urbansim (Waddell, 2002). Tout en se poursuivant aux États-Unis, ce développement s'étend alors au-delà de l'espace anglo-saxon, notamment en France, avec la mise à disposition des premiers logiciels

(dont certains sous licence libre comme *Tranus* ou *Urbansim*). À partir des années 2000, elle permettra une généralisation (somme toute relative) du recours à la modélisation LUTI pour traiter les problématiques d'aménagement les plus complexes. À l'échelle internationale (figure 9.5), le développement méthodologique et opérationnel des modèles LUTI a presque immédiatement fait l'objet d'une observation globale et collaborative permettant de suivre, d'évaluer et de situer ces modèles les uns par rapport aux autres ; c'était notamment l'objectif de l'étude *Isgluti* (*International Study Group on Land Use Transport Interaction*, 1981) qui sera par la suite complétée par les programmes *Spartacus* (*System for Planning and Research in Towns and Cities for Urban Sustainability*, 1996) et *Propolis* (*Planning and Research of Policies for Land Use and Transport for Increasing Urban Sustainability*, 2000). La lecture des nombreux rapports fournis dans ce contexte montre que si les modèles LUTI reposent tous sur des bases à peu près communes, ils présentent aujourd'hui une grande diversité structurelle et méthodologique qui rend leur comparaison et leur typologie difficiles. Une opposition classique consiste à distinguer les modèles agrégés et les modèles désagrégés, c'est-à-dire la manière avec laquelle ils traitent la question de l'échelle d'analyse et de représentation des données pour modéliser les interactions spatiales.

Figure 9.5  
Les modèles LUTI (*Land Use Transport Integrated*)



Les modèles LUTI intègrent les problématiques d'utilisation du sol et du transport comme les éléments interdépendants d'une même boucle de rétroaction. Ils émanent de travaux de recherche à peu près concomitants (années 1980, 1990 et 2000) : les laboratoires américains en sont les principaux initiateurs, mais ils partagent ce rôle avec le continent sud-américain, auquel s'ajoutent quelques contributions européennes et asiatiques. La liste présentée sur cette carte n'est probablement pas exhaustive, mais elle recense la majorité des modèles LUTI aujourd'hui connus dans le monde.

Source : Hély, 2012

Dans les modèles agrégés (qui sont plus anciens), les territoires sont généralement représentés par un ensemble de zones, plus ou moins grandes selon les résultats escomptés : l'étude de l'impact d'une implantation de gare nécessite un zonage fin (carroyage à 100 ou 200 mètres par exemple ; Nguyen Luong, 2011), alors que l'analyse des effets généraux d'une politique de transport ou d'urbanisation à l'échelle d'une région entière peut se contenter d'espaces plus agrégés (commune, aire urbaine, département). De nombreux modèles ont ainsi choisi de traiter les problématiques de l'aménagement à une échelle agrégée *meso*, avec des résultats donnés pour une taille moyenne de zones et pour des agrégats de ménages ou d'industries (Wegener, 2004). Dès lors, les simulations produites se fondaient presque automatiquement sur l'hypothèse que tous les agents agrégés au sein d'un même groupe sont supposés avoir le même comportement. En revanche, dans les modèles désagrégés (qui sont plus récents), le traitement de données individuelles se fait à une échelle très fine qui répond à une nouvelle exigence conceptuelle, issue de l'évolution des sociétés occidentales, prospères et très mobiles, facilitant la montée de l'individualisation des choix et des modes de transport. La nécessité de prise en compte de ces choix individuels invite à une approche à l'échelle des agents et non plus du groupe auquel ils appartiennent. Cette approche renouvelée doit théoriquement permettre de mieux capter l'hétérogénéité des comportements (Wegener, 2011) et d'éviter les confusions entre ceux qui relèvent du groupe et ceux qui relèvent des individus (erreur écologique).

Ainsi, les modèles LUTI se sont peu à peu tournés vers les techniques de micro-simulation (Orcutt *et al.*, 1961) en s'appuyant notamment sur les méthodes de Monte-Carlo et les modèles de choix discrets. Au niveau spatial, le découpage régulier de l'espace sous la forme d'une grille, dont l'efficacité a été montrée par la cartographie par carroyage, la télédétection ou les automates cellulaires, s'est également révélé pertinent pour la modélisation des systèmes urbains à une échelle fine. Le couplage entre un espace cellulaire et la micro-simulation a pu être approfondi et complexifié à travers l'usage des systèmes multi-agents, intégrant des modèles de mobilité désagrégés et des réseaux de transport formalisés selon la logique de la théorie des graphes. Outre la prise en compte de la dimension individuelle des comportements, l'intégration d'une approche par activités telle qu'elle a été utilisée par les études de *Time geography* a également permis de différencier les déplacements durant une journée, en décomposant les trajets des individus par destination pour mieux retracer leurs pérégrinations quotidiennes (accompagnement des enfants à l'école, puis

travail, puis achats, etc.), par tranches horaires, voire à la minute. De même, en modélisant les interactions entre les individus, les systèmes multi-agents ont ouvert la voie à une meilleure ventilation spatio-temporelle du trafic, et donc à une meilleure simulation des phénomènes de congestion des véhicules sur les réseaux. Dans leur dernière génération, les modèles LUTI offrent ainsi des possibilités de simulation relativement réalistes et plutôt cohérentes vis-à-vis de ce que l'on sait des spécificités des comportements individuels, des interactions et des boucles de rétroactions multiples qui interviennent au sein des systèmes urbains. Appuyés sur un corpus méthodologique suffisamment souple, riche et varié, les modèles LUTI ont ainsi permis d'intégrer assez naturellement un ensemble très hétérogène d'éléments conceptuels et techniques ; ils apparaissent aujourd'hui comme des solutions synthétiques très avancées pour répondre aux questionnements de l'aménagement durable des territoires.

Développé en France depuis la fin des années 1990, MobiSim est un modèle LUTI qui permet d'illustrer cette évolution et cette ambition. À partir de prototypes fondés sur la mécanique des fluides pour simuler les déplacements de personnes dans de petits espaces (des stations de transport souterraines par exemple), la première version du modèle s'est inspirée de la dynamique des systèmes pour étudier l'évolution du système urbain à l'échelle macroscopique par l'intermédiaire d'une série complexe de boucles de rétroactions. Par la suite, la modélisation a été repensée dans une approche plus mésoscopique au sein de laquelle l'espace urbain était pris en compte par l'intermédiaire de zones radioconcentriques (à l'image du modèle historique de Lowry) et d'une grille cellulaire, puis par un système multi-agents permettant de construire une plateforme intégrée transport/urbanisme pour la simulation du comportement désagrégé des ménages et des entreprises (micro-simulation). Sur le plan des données, cette nouvelle version (MobiSim SMA) intégrait la construction d'une population synthétique composée d'agents caractérisés par des attributs individuels (Casanova *et al.*, 2005). Dans sa version actuelle, simplifiée au sein d'une architecture logicielle permettant la parallélisation et donc la réduction des temps de calculs, MobiSim couple trois modèles complémentaires pour simuler simultanément : (i) l'évolution du contexte spatial (développement urbain) et démographique (dynamique de la population), (ii) les programmes d'activités des individus ainsi que les mobilités quotidiennes qui leur sont associées et permises par différents modes de transport (marche, automobile, bicyclette, transport en commun) (Antoni et Vuidel, 2010), et (iii) la mobilité résidentielle des ménages qui cherchent à optimiser leur satisfaction en fonction de

leur cycle de vie, du développement de l'offre en logements et de leurs besoins en transport (Tannier *et al.*, 2015). Récemment, MobiSim a notamment été appliqué à l'agglomération de Besançon pour tester l'opportunité offerte au développement résidentiel et aux mobilités quotidiennes par la réhabilitation d'« ouvrages lourds » intégrant les casernes et les fortifications (Thierry, 2015), et à l'espace luxembourgeois pour statuer sur la pertinence de différents scénarios d'urbanisation afin de réduire les mobilités automobiles (Frémond, 2015).

Ainsi, si la micro-simulation et la simulation par agents apparaissent comme des techniques de modélisation porteuses au regard des connaissances et des possibilités informatiques actuelles, elles n'en comportent pas moins des limites et des écueils. Un premier défi consiste à lever un verrou technique : la quantité et la lourdeur des données désagrégées conduisent à des temps de calculs parfois excessivement longs, qui ne se comptent pas en heures mais en jours, voire en semaines. Les progrès de l'informatique ont certes rendu possibles des calculs plus sophistiqués, mais pas nécessairement plus rapides (Wegener, 2011). De même, la question des données de départ reste un point délicat : la résolution requise pour des simulations désagrégées tant du point de vue spatial (bâtiments, tronçons de routes, etc.) que du point de vue démographique (individus, emplois, etc.) n'est que rarement disponible de manière standard au sein des bases de données classiques. Ici, le recours à une population synthétique est certes une solution viable pour répondre aux impératifs de protection de la vie privée des individus sans trop entraver les possibilités de modélisation, mais il apparaît également comme un biais important dans la constitution des jeux de données de départ. Enfin, d'un point de vue plus conceptuel, la micro-simulation et les systèmes multi-agents trouvent également une limite dans le recours aux probabilités et à l'aléatoire qui découle presque obligatoirement d'une modélisation à l'échelle désagrégée : l'aléa génère certes un certain flou dont on peut supposer qu'il résume le bruit correspondant à ce que l'on ne connaît pas du fonctionnement des territoires et des systèmes urbains, mais sans pouvoir en être complètement sûrs (ce qui renvoie au problème théorique de l'incertitude en aménagement).



## CONCLUSION – LES ENJEUX

À l'issue de l'analyse, certes brève, de ce qu'implique la volonté d'agir sur l'espace pour l'aménager, on ne s'étonne pas que l'aménagement soit difficile à définir de manière simple, dans ses aspects théoriques comme dans ses réalités pratiques : il reste plus aisé à concevoir par négation, en indiquant ce qu'il n'est pas ou ce qu'il ne souhaite pas être. C'est une discipline dont le guide des bonnes pratiques reste à écrire, et pour laquelle on souhaite bien du courage à celui ou celle qui sera chargé de sa rédaction. Au sein des systèmes complexes auxquels correspondent les sociétés dont on aménage l'espace pour leur harmonie et leur commodité, on peut en effet planifier un certain nombre de choses, mais pas tout. Et il reste extrêmement difficile d'anticiper les conséquences de ces changements à long et moyen termes, dans un contexte que la mondialisation et les avancées technologiques font souvent évoluer dans une temporalité plus rapide que celle des politiques d'aménagement du territoire et de leur mise en œuvre concrète. Dans ce contexte incertain, le poids des convictions est important et doit nécessairement être pris en compte : il commande les décisions politiques en même temps qu'il les rend cohérentes ou contradictoires.

Depuis que la charte d'Aalborg (1994) a littéralement pris le contre-pied de la charte d'Athènes, les acteurs de l'aménagement sont à peu près convaincus que les aires urbaines doivent désormais jouer un rôle central pour transformer l'espace géographique et les pratiques de mobilité. De par l'importance qu'elles ont prise, en surface comme en population, les villes sont en effet considérées comme un levier privilégié pour renverser les convictions jusque-là établies, et proposer une géographie renouvelée par des modèles d'aménagement fondés sur la notion de développement durable. D'un certain point de vue, cette notion s'inscrit toujours dans la continuité des convictions et des utopies précédentes. Mais, dans la mesure où la transition éco-énergétique est aujourd'hui devenue urgente et considérée comme prioritaire par une majorité de décideurs, elle apparaît également comme un moteur absolument fondamental de l'action. Avec leurs points communs et leurs différences, les solutions actuellement mises en

place pour concrétiser cette mutation confirment en effet l'idée que l'extraordinaire succès du développement durable peut être interprété de deux façons : certains considèrent qu'il correspond à une prise de conscience des responsabilités dans un monde menacé « en tant que monde »; d'autres considèrent que son succès tient justement dans son absence de conceptualisation précise et donc dans la faiblesse des engagements qu'il implique concrètement (Habbard et Guiraud, 2002). Toujours est-il qu'un tournant a bien été pris dans la mesure où la vision des territoires, jusque-là centrée sur l'homme en tant qu'être plus ou moins libre de donner du sens à son monde, est aujourd'hui doublée d'un nouveau paradigme. Dans ce contexte, la transition éco-énergétique implique naturellement d'intégrer la complexité et de ne pas vivre dans une seule unité de temps. La simple planification ne peut donc plus correspondre que partiellement et nécessite un appareillage théorique plus complexe, mettant en œuvre une démarche de prospective et d'anticipation.

En conclusion partielle, trois premiers axiomes peuvent être identifiés pour réfléchir aux implications qu'impose la transition éco-énergétique dans le cadre prospectif de l'aménagement du territoire : (i) on est certain quand on est convaincu ; (ii) on est convaincu quand on est serein ; et (iii) on est serein quand on est sûr. Mais il faut immédiatement en ajouter deux autres : (iv) tout cela représente davantage nos propres convictions que la réalité du fonctionnement du monde ; et (v) l'aménagement du territoire restant une nécessité fondamentale pour l'organisation des sociétés, il faudra toujours « faire avec ». La formule clé pour résoudre ce problème, reprise de Jean Cocteau, nous a été livrée par F. Asher (2001) : « Ces événements nous dépassent, feignons d'en être les organisateurs ». Pour feinter correctement, et surtout, pour que personne ne découvre qu'il ne s'agit peut-être que d'une feinte, il est nécessaire de s'équiper de bons outils et d'une panoplie adéquate, soit un équipement complet, qu'il faut inventer lui aussi, puisqu'il ne correspond à aucun uniforme disciplinaire, thématique ou pratique aujourd'hui reconnu en tant que tel.

Dans cette perspective, les méthodes élaborées dans le cadre de démarches connexes et complémentaires, en géographie, en économie, en sociologie urbaine ou en psychologie, appuyées sur les concepts et les outils fournis par la physique, les mathématiques et l'informatique, doivent être mises à contribution. C'est en partie ce que cet ouvrage a souhaité montrer. Contrairement à ce qu'en pensent ceux qui les connaissent mal, ces méthodes n'apportent en effet jamais de réponses froides et toutes faites. D'un point de vue thématique, elles obligent à définir et à quantifier précisément les données du problème

à traiter, au sein du système territorial qui contient ce problème (et qui, dans le même, en détermine les dynamiques). D'un point de vue technique, elles nécessitent de manipuler des notions définies dans un cadre strict, qui, paradoxalement, demandent parfois de recourir à l'abstraction pour être appréhendées concrètement. Ce double effort constitue en lui-même une première réponse au problème. Il permet d'en identifier avec précision les causes et les effets, mais surtout d'en formaliser et d'en quantifier, d'une manière ou d'une autre, les forces, les inerties et les leviers d'action, ainsi que le périmètre des enjeux. La simulation offre alors une deuxième série de réponses. En dépassant la description formelle du problème, elle propose un cadre réflexif pour évaluer *ex ante* les conséquences possibles des politiques d'aménagement, dans un exercice prospectif qui peut se prolonger dans le long terme. Chacune de ces méthodes a alors l'avantage de s'inscrire dans un cadre théorique scientifiquement balisé, que l'utilisation contribue de surcroît à renforcer.

De ce fait, la démarche modélisatrice peut également sembler lourde, longue, fastidieuse et compliquée, donc démesurée et inutile. Mais si on la compare aux investissements nécessaires pour réaliser les infrastructures indispensables à l'aménagement du territoire, de leur conception à leur réalisation, en passant par leur financement et l'étude de leur rentabilité (économique, sociale et environnementale), elle ne pèse pas beaucoup plus qu'une goutte d'eau dans l'océan : le prix de quelques dizaines de mètres d'autoroute, tout au plus. D'un point de vue opérationnel, compte tenu des enjeux qu'impose aujourd'hui la transition éco-énergétique, il serait donc dommage de s'en priver. Au même titre que les études dites d'état initial et que les Projets d'aménagement et de développement durables (PADD) dans les documents réglementaires, la modélisation et la simulation doivent désormais être considérées comme des éléments indispensables, parmi d'autres, à la démarche des acteurs et des décideurs du territoire. Elles y apportent non seulement un cadre théorique cohérent fondé sur la systémique, mais également un outil concret qui s'appuie sur l'informatique pour la prospective et l'action dans le contexte incertain et complexe qui demeure celui de l'aménagement du territoire.

Au-delà des avantages que l'on vient d'énumérer, la question qui se pose manifestement pour justifier le recours à la modélisation spatiale dans un contexte opérationnel est celle du niveau de confiance que l'on peut lui accorder. Cette question repose généralement sur la qualité du calibrage des modèles : reflètent-ils des processus conformes à la réalité ? Quelle est cette réalité ? Et comment traduire ces processus en paramètres pour s'assurer de cette conformité ? La réponse

est éminemment épineuse. En 1975, R. Minshull avait déjà identifié un des risques de la modélisation dans le fait que les utilisateurs de modèles pouvaient consacrer plus de temps aux techniques quantitatives, statistiques ou cartographiques liées à leur calibrage plutôt qu'à leur signification thématique en elle-même. L'histoire ne peut pas lui donner tort. De nombreux modèles n'ont longtemps été dévolus qu'à une série de calculs permettant de les paramétrer avec précision et d'en justifier la robustesse. Cette utilisation, exclusivement théorique, n'avait alors absolument aucune résonance sur le réel. Les modélisateurs étant désormais rodés à l'exercice, il est temps qu'ils quittent leur tour d'ivoire. La majorité d'entre eux est probablement prête à faire cet effort. Mais pour aller où ? Car encore faut-il qu'une porte leur soit ouverte quelque part, ce qui, du côté des décideurs et des acteurs du territoire, demande également d'importants efforts. Au sein de ces mondes qui fonctionnent souvent encore en parallèle, on ne trouvera probablement personne pour soutenir que le calibrage n'est qu'un détail de la modélisation. Mais un modèle ne doit pas non plus se résumer à son calibrage. Il nécessite avant tout de conceptualiser les interactions qui existent au sein des phénomènes territoriaux et, au minimum, de proposer un début d'explication fondé sur une hypothèse explicite. De ce fait, l'utilisation intelligente de la modélisation en aménagement offre beaucoup plus que le simple recours à des techniques quantitatives : elle apparaît comme une réelle possibilité pour comprendre la structure et le fonctionnement des territoires.

Sans surprise, les plus grands bénéfices de la modélisation sont immédiatement contrebalancés par les plus grands risques : se tromper dans la perception et l'explication de ces phénomènes, ou pire, croire qu'un modèle apporte une solution unique et absolue, qui volerait aux édiles leur rôle de décideurs et qui les inviterait à verrouiller leur porte à double tour. La modélisation n'a pas vocation à remplacer l'homme par la machine. D'une part, plusieurs positions peuvent co-exister : si un modélisateur est convaincu de la solution qu'il propose pour formaliser le monde tel qu'il croit le comprendre, cette solution n'en exclut aucune autre. D'autre part, si elle investit un domaine encore peu connu, cette formalisation est souvent très peu claire, du moins au départ, et plusieurs trajectoires sont possibles pour la finaliser. Comme le montre l'histoire de la modélisation dans toute la diversité de ses approches disciplinaires, une opportunité consiste justement à intégrer successivement ces points de vue en les testant et en les modifiant autant de fois que nécessaire, avant de les valider ou de les abandonner.

Dans cette perspective, la validation postdictive reste un recours utile pour évaluer les résultats de la modélisation : elle consiste à

reproduire, par la simulation, des résultats mesurés pour des périodes passées connues. À partir de 1990 par exemple, le modèle est-il capable de reproduire la situation de 2010 ? Il suffit de comparer les résultats de la simulation à ceux de l'observation pour le savoir. Mais peut-on en déduire pour autant que le modèle est suffisamment robuste pour s'attaquer à une simulation prédictive ? Si l'on est à peu près sûr d'une chose, en effet, c'est que l'avenir ne sera pas la stricte reproduction du passé. Au-delà de sa dimension formelle, le calibrage postdictif est donc toujours plus au moins inutile. Concrètement, il semble que l'avenir ne puisse sérieusement s'imaginer qu'à travers la comparaison de scénarios, complémentaires et/ou contradictoires. Leurs différences apportent en effet des résultats relativement fiables. On peut l'illustrer par une image simple : celui qui pèse deux sacs de sable avec une balance mal calibrée ne connaîtra jamais la masse exacte du sable qu'il a entre les mains ; en revanche, l'erreur étant constante, il ne se trompera pas en calculant la différence de poids des deux sacs, au gramme près. Il en est de même avec les modèles, que l'on peut toujours comparer à des balances mal tarées, mais qui n'en demeurent pas moins efficaces « toute chose égale par ailleurs ». Comparer un scénario sans aménagement et un scénario avec aménagement, indépendamment du calibrage, indique assez clairement quels sont les impacts de cet aménagement.

Quoi qu'il en soit, les résultats des simulations spatiales finissent par offrir une image tangible de l'avenir des territoires. Qu'elle soit juste ou fautive, cette image n'en demeure pas moins extrêmement importante : elle permet d'ouvrir une discussion concrète sur les actions et les stratégies à mener pour un aménagement souhaitable. L'image s'inscrit alors comme un pivot pour les débats participatifs avec l'ensemble des acteurs engagés dans l'aménagement, et la modélisation qui l'accompagne (*companion modeling*) apporte une pierre constructive et réflexive au processus d'aménagement dans son ensemble. Selon C. Alvergne et P. Musso (2009), de la représentation cartographique jusqu'à l'iconographie de l'aménagement du territoire, l'image véhicule en effet à la fois (i) une certaine légitimité scientifique appuyée sur des données quantifiées, (ii) une appropriation collective qui lie la problématique aux politiques de communication pour organiser et légitimer l'action politique, (iii) un outil de concertation et de régulation publique permettant de limiter la contestation, et (iv) une justification de la planification fondée sur l'analyse dialectique « avant/ après » à travers des scénarios contrastés. Dans ce sens, par l'intermédiaire de la modélisation, les images et les scénarios produits par les modèles sont au centre d'un système d'aide à la décision.

Cependant, il n'existe actuellement aucun consensus pour définir ce qu'est précisément un système d'aide à la décision. Le champ s'étend de « tout ce qui contribue à la prise de décision » au « système informatique interactif appuyé sur des données et des modèles pour solutionner un problème complexe », soit un flou artistique qui a fait dire à R.H. Sprague et H.J. Watson (1993) que, dans ce contexte, même une machine à affranchir pouvait finalement être considérée comme un système d'aide à la décision. Au-delà de cette position un peu caricaturale, les principales caractéristiques en ont néanmoins été listées dès les années 1970 par G.A. Gorry et M.S. Scott Morton (1971) : les systèmes d'aide à la décision doivent répondre à trois questions essentielles. D'abord, c'est évidemment la question « comment ? » : quelles méthodes utiliser pour parvenir à se faire une idée claire du problème à traiter et comment prendre une décision pour le traiter correctement ? Il suffit de revenir quelques pages en arrière pour constater que ces méthodes ne manquent pas. Ensuite, c'est la question « Pourquoi ? ». La réponse est assez triviale : il s'agit d'aider ceux qui prennent des décisions à prendre de « bonnes » décisions, et donc d'appuyer et d'assister les gestionnaires et les institutions en charge des problématiques territoriales dans des situations complexes de planification stratégique, de manière à améliorer l'efficacité et la performance des propositions régulatrices de l'aménagement. Mais, dans ce contexte, un système d'aide à la décision pourrait ne pas différer fondamentalement de n'importe quelle application aujourd'hui dédiée à la gestion des entreprises. Leur spécificité pour l'aménagement du territoire repose en réalité sur la troisième question : « Quoi ? ». La littérature est assez unanime sur le fait que la réponse à cette question est complexe. Les systèmes d'aide à la décision ne sont en effet réellement utiles que s'ils s'appliquent à des problèmes dont les processus sont difficiles à structurer, et cette structuration est en partie déterminée par la disponibilité et la cohérence des données qui permettent de l'appréhender, ainsi que par la connaissance et le niveau de compétence des experts. Autrement dit, répondre à la question « Quoi ? » nécessite à la fois de déterminer la nature exacte du problème et de mettre en place une stratégie méthodologique permettant de le solutionner. Dans cette perspective, le fait que les modèles utiles à l'aménagement du territoire reposent généralement sur un formalisme abstrait ou mathématique les rend particulièrement efficaces pour résoudre un problème bien structuré et bien défini au départ. Mais ils ne suffisent pas à nourrir un questionnement qui, par définition, vise souvent explicitement à répondre à une question qui n'est pas encore structurée, et qu'il est peut-être même impossible de structurer clairement.

Pour passer le cap et franchir le gué qui sépare la théorie de l'application, il est aujourd'hui important de réfléchir autrement à l'organisation institutionnelle de l'aménagement du territoire. Les concepts, les méthodes et les modèles qui lui sont utiles émanent en effet généralement du monde de la recherche scientifique, et se destinent fondamentalement aux collectivités ou aux décideurs publics. Mais aucun de ces deux mondes n'a *a priori* pour mission de manipuler et d'interpréter les résultats que produisent ces modèles et ces méthodes. Entre les deux, il devient donc nécessaire de construire un pont. Dans certains cas, cette tâche est actuellement déjà confiée à des bureaux d'étude privés spécialisés, avec lesquels de nouveaux partenariats doivent être construits et généralisés pour mieux transférer et mieux appliquer les avancées de la recherche en aménagement. Fondamentalement, il s'agit de contribuer ensemble à la prise de décision dans le contexte toujours incertain qui pèse sur l'avenir des territoires, dans le cadre d'un partenariat constructif et décomplexé entre les laboratoires de recherche, les institutions publiques et les entreprises privées. Pour une bonne part, le cahier des charges de ce partenariat reste encore à définir et à organiser. C'est certainement en identifiant clairement les enjeux de cette collaboration, et en les intégrant en amont dans les choix méthodologiques qui s'imposent à la modélisation, que la recherche en aménagement construira ce qui lui manque aujourd'hui d'un point de vue opérationnel. Elle contribuera dans le même temps à ouvrir la route de la transition éco-énergétique, jusqu'à un point d'arrivée dont personne ne peut encore dire où il se situe.



## BIBLIOGRAPHIE

- Abler R.F., Adams J.S., Gould P., 1971, *Spatial Organization: The Geographer's View of the World*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Ackerman E.A., 1958, *Geography as a Fundamental Research Discipline*, The University of Chicago Press.
- Alonso W., 1964, *Location and Land Use: Toward a General Theory of Land Rent*, Harvard University Press.
- Alvergne C., Musso P., 2009, *L'aménagement du territoire en images*, La Documentation française.
- Amblard F., Phan D., 2006, *Modélisation et simulation multi-agents. Applications pour les sciences de l'homme et de la société*, Hermes.
- Amphoux P., 2001, « L'observation récurrente », in Grosjean M., Thibaud J.P. (éd.), *L'espace urbain en méthodes*, Parenthèses, p 153-169.
- Anas A., 1982, *Residential Location Markets and Urban Transportation*, Academic Press.
- Anselin L., 1992, *SpaceStat, a Software Program for the Analysis of Spatial Data*, National Center for Geographic Information and Analysis, University of California.
- Anselin L., 1995, « Local Indicators of Spatial Association », *Geographical Analysis* 27, p. 93-115.
- Antoni J.-P., 2006, « Calibrer un modèle d'évolution de l'occupation du sol urbain. L'exemple de Belfort », *Cybergeo: European Journal of Geography*. <http://cybergeo.revues.org/2436>.
- Antoni J.-P., 2009, « Un territoire de projet à co-construire », in Grossouvre (de) H., Maulin E. (éd.), *Euro-District Strasbourg-Ortenau : la construction de l'Europe réelle*, Xénia, p 25-31.
- Antoni J.-P., 2014, *Modélisation et anticipations urbaines. Éléments théoriques pour une approche géo-ergonomique*, Habilitation à diriger des recherches, Université de Franche-Comté.
- Antoni J.-P. (éd.), 2010, *Modéliser la ville – Formes urbaines et politiques de transport*, Economica.
- Antoni J.-P., Bonin O., Frankhauser P. et al., 2015, *Ville et mobilités durables : évaluation par la simulation. Trois scénarios d'aménagement pour Lyon et Besançon à l'horizon 2030*, Rapport de recherche PREDIT.
- Antoni J.-P., Frankhauser P., Tannier C. et al., 2011, *MobiSim, Rapport scientifique final*, Rapport de recherche PREDIT.
- Antoni J.-P., Judge V., Klein O., 2016, « Constraint Cellular Automata for Urban Development Simulation: An application to Strasbourg-Kehl cross-border Area », in Camacho Olmedo M.T., Paegelow M., Mas J.-F., Escobar F. (eds), *Geomatic Simulations and Scenarios for Modelling LUCC - A Review and Comparison of Modelling Techniques*, Springer (under press).
- Antoni J.-P., Klein O., 2003, « L'animation d'anamorphoses. Un atout pour la communication en cartographie », *Revue Internationale de Géomatique* 13, p. 81-92.
- Antoni J.-P., Klein O., Moisy S., 2004, « Cartographie interactive et multimédia : vers une aide à la réflexion géographique », *Cybergeo: European Journal of Geography*. <http://cybergeo.revues.org/2621>.

- Antoni J.-P., Vuidel G., 2010, « MobiSim : un modèle multi-agents et multi-scalaire pour simuler les mobilités urbaines », in Antoni J.-P. (éd.), *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, p. 50-77.
- Arentze T.A., Borgers A.W.J., Timmermans H.J.P., 1996, « An Efficient Search Strategy for Site-Selection Decisions in an Expert System », *Geographical Analysis* 28, p. 126-146.
- Armstrong M.P., De S., Densham P.J. et al., 1990, « A Knowledge-Based Approach for Supporting Locational Decisionmaking », *Environment and Planning B* 17, p. 341-364.
- Ascher F., 2001, *Ces événements nous dépassent, feignons d'en être les organisateurs*, Éditions de l'Aube, La Tour d'Aigues.
- Audard F., Carpentier S., Oliveau S., 2014, « Les "big data" sont-elles l'avenir de la géographie [théorique et quantitative] ? », *20<sup>e</sup> Biennale de géographie d'Avignon, Géopoint 2014*, « *Controverses et géographies* », p. 1-4.
- Bambrough R., 1964, « Principia metaphysica », *Philosophy* 39, p. 97-109.
- Banos A., 2001, « À propos de l'analyse spatiale exploratoire des données », *Cybergeo: European Journal of Geography*. <http://cybergeo.revues.org/4056>.
- Banos A., 2010, « Miro : des trajectoires individuelles à la ville en mouvement », in Antoni J.-P. (éd.), *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, p. 225-253.
- Barles S., 1999, *La ville délétère. Médecins et ingénieurs dans l'espace urbain, 18<sup>e</sup>-19<sup>e</sup> siècles*, Champ Vallon.
- Barral F., Thumerel B., Simoulin V., 2010, « Ingénierie de projet et excellence territoriale », *Territoires 2040*, p. 137-148.
- Barreteau O., 2003, « Systèmes multi-agents et jeux de rôles comme outils supports de discussion pour la gestion des ressources renouvelables », in Billé R., Mermet L. (éd.), *Concertation, décision et environnement. Regards croisés*, La Documentation française, p. 97-121.
- Batty M., 2013, « Big Data, Smart Cities and City Planning », *Dialogues in Human Geography* 3, p. 274-279.
- Batty M., Longley P.A., 1994, *Fractal Cities: A Geometry of Form and Function*, Academic Press Inc.
- Batty M., Xie Y., 1994, « From Cells to Cities », *Environment and Planning B* 21, p. 531-538.
- Bauer G., 1993, « La suburbia : sommes nous concernés ? », *Urbanisme Hors-série* 1, p. 67-70.
- Beckman R.J., Baggerly K.A., McKay M.D., 1996, « Creating synthetic baseline populations », *Transportation Research* 30, p. 415-429.
- Beckmann M., 1958, « City Hierarchies and the Distribution of City Size », *Economic Development and Cultural Change* 6, p. 243-248.
- Bell R., Bell C., 1972, *City Fathers: Early History of Town Planning in Britain*, Penguin Books Ltd.
- Ben-Akiva M., Lerman S.R., 1979, « Disaggregated Travel and Mobility-Choice and Measures of Accessibility », in Hensher D.A., Stopher P.R. (eds), *Behavioral travel modeling*, Croom Helm, p. 654-679.
- Ben-Akiva M., Lerman S.R., 1985, *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*, The MIT Press.
- Benenson I., Omer I., Hatna E., 2002, « Entity-based Modeling of Urban Residential Dynamics: the Case of Yaffo, Tel Aviv », *Environment and Planning B* 29, p. 491-512.
- Benenson I., Torrens P.M., 2004, *Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena*, Wiley.
- Bennett J., 2010, *OpenStreetMap*, Packt Publishing Ltd.
- Berque A., 1995, « Espace, milieu, paysage, environnement », in Bailly A., Ferras R., Pumain D. (éd.), *Encyclopédie de géographie*. Economica, p. 349-367.
- Berry B.J.L., 1971, « The Logic and Limitations of Factorial Ecology », *Comparative Factorial Ecology* 47, p. 209-219.
- Bertalanffy (von) L., 1968, *Théorie générale des systèmes*, Dunod.
- Berthier N., 2016, *Les techniques d'enquête en sciences sociales*, Armand Colin.

- Bertin J., 1967, *Sémiologie graphique : Les diagrammes, les réseaux, les cartes*, Gauthier-Villars.
- Bethea R.M., Rhinehart R.R., 1991, *Applied Engineering Statistics*, CRC Press.
- Beuret J.-E., 2003, « La gestion concertée de l'espace rural : médiations locales et politiques d'appui », in Billé R., Mermet L. (éd.), *Concertation, décision et environnement. Regards croisés*, La Documentation française, p. 21-38.
- Blanchet A., Ghiglione R., Massonnat J., Trognon A., 2013, *Les techniques d'enquête en sciences sociales*, Dunod.
- Bonnel P., 2002, *Prévision de la demande de transport*, Habilitation à diriger des recherches, Université Lyon 2.
- Bonneuil C., Fressoz J.-B., 2013, *L'Événement Anthropocène : La Terre, l'histoire et nous*, Seuil.
- Boyer J.-C., 1989, « L'aménagement du territoire aux Pays-Bas. Centre et périphérie », *L'espace géographique* 4, p. 302-304.
- Bozzani-Franc S., Leysens T., L'Hostis A. et al., 2010, « Un urbanisme orienté vers le rail illustré par le projet Bahn.Ville », in Soulas C., Wahl M. (éd.), *Innovations dans les transports guidés urbains et régionaux*, Hermes Science Publications, p. 253-302.
- Bretagnolle A., Pumain D., 2010, « Comparer deux types de systèmes de villes par la modélisation multi-agents (Europe, États-Unis) », in Weisbuch G., Zwirn H. (éd.), *Qu'appelle-t-on aujourd'hui les sciences de la complexité ?*, Vuibert, p. 271-299.
- Brundtland G.H. (ed.), 1987, *Our Common Future: The World Commission on Environment and Development*, Oxford City University Press.
- Brunet R., Ferras R., Théry H., 1992, *Les mots de la géographie : Dictionnaire critique*, La Documentation française.
- Buhler T., 2015, *Déplacements urbains : sortir de l'orthodoxie : Plaidoyer pour une prise en compte des habitudes*, PPUR Presses polytechniques.
- Callon M., Lascoumes P., Barthe Y., 2001, *Agir dans un monde incertain – Essai sur la démocratie technique*, Seuil.
- Calthorpe P., 1993, *The Next American Metropolis: Ecology, Community and the American Dream*, Princeton Architectural Press.
- Camagni R., 1996, *Principes et modèles de l'économie urbaine*, Economica.
- Capozza D., 1973, « Subways and Land Use », *Environment and Planning A* 5, p. 555-576.
- Casanova P., Koltchanov V., Legout M. et al., 2005, *Plateforme de simulation pour l'étude prospective de la mobilité urbaine des agglomérations françaises et européennes - MobiSim SMA - Structure et algorithmes du modèle*, Rapport de recherche PREDIT.
- Cauvin C., 1997, « Au sujet des transformations cartographiques de position », *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://cybergeo.revues.org/5385>.
- Cauvin C., 1998, « Analyse spatiale des semis urbains : diversité et complémentarité des techniques », in Reymond H., Cauvin C., Kleinschmager R. (éd.), *L'espace géographique des villes*, Economica, Anthropos, p. 231-253.
- Cauvin C., Escobar F., Serradj A., 2008, *Cartographie thématique*, 5 volumes, Hermes.
- Cauvin C., Reymond H., 1989, « Une approche de la représentation cartographique des flux », *Journée du GDR – CNRS Réseau, IGN* 18.
- Cauvin C., Reymond H., 1991, « Interaction spatiale et cartographie : les solutions de W. Tobler » *Espace, Populations, Sociétés* 3, p. 467-485.
- Cauvin C., Reymond H., 1998, « Activités et coalescence : quelques images de leur répartition », in Reymond H., Cauvin C., Kleinschmager R. (éd.), *L'espace géographique des villes*, Economica, Anthropos, p. 255-280.
- CERTU, 2013, *Les enquêtes déplacements « standard CERTU »*, Note de présentation.
- Cervero R., Ferrell C., Murphy S., 2002, *Oriented-Development and Joint Development in the United States*, Research Results Digest.
- Chalas Y., Gilbert C., Vinck D., 2009, *Comment les acteurs s'arrangent avec l'incertitude*, Éditions des Archives contemporaines.

- Chalas Y., Soubeyran O., 2009, « Incertitude, environnement et aménagement », in Chalas Y., Gilbert C., Vinck D. (éd.), *Comment les acteurs s'arrangent avec l'incertitude*, Éditions des Archives contemporaines, p. 135-159.
- Chanel O., Faburel G., 2010, *L'environnement dans la décision publique : Refonder l'évaluation socio-économique pour des politiques de transport plus durables*, Economica.
- Chignier-Riboulon F., 1997, « Le découpage législatif de 1986, une logique partisane. L'exemple de Lyon », *Revue de géographie de Lyon* 72, p. 173-176.
- Christaller W., 1933, *Central places in Southern Germany*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Clarke K.C., 2008, « Mapping and Modelling Land Use Change: an Application of the SLEUTH Model », in Pettit C., Cartwright W., Bishop I. et al. (eds), *Landscape Analysis and Visualisation*. Springer, p. 353-366.
- Clarke K.C., Riggan P., Brass J.A., 1995, « A Cellular Automaton Model of Wildfire Propagation and Extinction », *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 60, p. 1355-1367.
- Clément-Werny C., Schneider Y., 2012, « Le transport par câble aérien va-t-il investir les villes ? », *TechniCités* 231, p. 29-34.
- Clerc P., Garel J., 1998, « La réception du modèle graphique de Burgess dans la géographie française des années cinquante aux années soixante-dix », *Cybergeo: European Journal of Geography*. <http://cybergeo.revues.org/5332>.
- Cleveland W.S., 2001, « Data Science: an Action Plan for Expanding the Technical Areas of the Field of Statistics », *International Statistical Review* 69, p. 21-26.
- Cliff A.D., Ord J.K., 1969, « The Problem of Spatial Autocorrelation », in Scott A.J. (ed.), *London Papers in Regional Science*, Pion Ltd, p. 25-55.
- Cliff A.D., Ord J.K., 1973, *Spatial Autocorrelation*, Pion Ltd.
- Couclelis H., 1985, « Cellular Worlds: a Framework for Modeling micro-macro Dynamics », *Environment and Planning A* 20, p. 99-109.
- Couclelis H., 1988, « Of Mice and Men: What rodent Population can teach us about Complex Spatial Dynamics », *Environment and Planning A* 20, p. 99-109.
- Couclelis H., 2005, « "Where has the Future Gone?" Rethinking the Role of Integrated Land-Use Models in Spatial Planning », *Environment and Planning A* 37, p. 1353-1371.
- Courson (de) J., 1999, *La prospective des territoires. Concepts, méthodes résultats*, CERTU.
- Crozet Y., 2005, « Les temps et les transports de voyageurs », *Table Ronde ECMT*, p. 27-69.
- Czerkauer-Yuma C., Voigt A., Frankhauser P., 2015, « Spatial Simulation and the Real World », in Silva E., Healey P., Harris N., Van den Broek H. (eds), *The Routledge Handbook of Planning Research Methods*, Taylor and Francis, p. 343-368.
- Dauphiné A., 1987, *Les modèles de simulation en géographie*, Economica.
- De Carlo L., Choulet J.-P., 2003, « Quelle place pour le multimédia dans la formation à la concertation ? », in Billé R., Mermet L. (éd.), *Concertation, décision et environnement. Regards croisés*, La Documentation française, p. 77-96.
- De la Barra T., 1998, « Improved Logit Formulations For Integrated Land Use, Transport and Environmental Models », in Lundqvist L., Mattsson L.-G., Ki T.J. (eds.), *Network Infrastructure and the Urban Environment: Advances in Spatial Systems Modelling*, p. 288-307.
- Deheuvels P., 1996, *La Probabilité, le Hasard et la Certitude*, Presses Universitaires de France.
- Delage M., Le Néchet F., Louail T. et al., 2009, « Simulation d'accessibilité dans la ville et expérience pédagogique : le modèle AccesSim », in *Neuvièmes Rencontres de Théo Quant*, Besançon, France, p. 1-11.
- Denant-Boemont L., Hammiche S., 2013, « L'économie expérimentale et la ville », in Brun G. (éd.), *Ville et mobilité. Nouveaux regards*, Economica, p. 303-318.
- Destatte P., Durance P., 2009, *Les mots-clés de la prospective territoriale*, La Documentation française.
- Deymier G., Nicolas J.-P., 2005, *Modèles d'interaction entre transport et urbanisme : état de l'art et choix du modèle pour le projet SIMBAD*, Rapport de recherche PREDIT.

- Diamond J., 2009, *Effondrement: Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*, Folio.
- Donzelot J., Epstein R., 2006, « Démocratie et participation : l'exemple de la rénovation urbaine », *Esprit* Forces et faiblesses de la participation, p. 5-34.
- Downs A., 1992, *Stuck in Traffic: Coping with Peak-Hour Traffic Congestion*, The Brookings Institution.
- Ducruet C., 2010, *Les mesures globales d'un réseau*, Groupe f.m.r
- Dupuy G., 1992, *L'Informatisation des villes*, Presses Universitaires de France.
- Eckert D., 1996, *Évaluation et prospective des territoires*, La Documentation française.
- Emshoff J.R., Sisson R.L., 1970, *Design and Use of Computer Simulation Models*, Macmillan.
- Faivre d'Arcier B., 2013, « Maîtriser le financement du transport collectif », in Brun G. (éd.), *Ville et mobilité. Nouveaux regards*, Economica, p. 291-302.
- Ferber J., 1995, *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*, InterEditions.
- Fischer M.M., Leung Y. (eds), 2001, *GeoComputational Modelling: Techniques and Applications*, Springer.
- Fondi R., 1986, *La Révolution organiciste : entretien sur les nouveaux courants scientifiques*, Labyrinthe.
- Forrester J.W., 1968, *Principles of Systems*, Pegasus Communications.
- Fortin M.-J., Dale M.R.T., 2005, *Spatial Analysis: A Guide for Ecologists*, Cambridge University Press.
- Frankhauser P., 1994, *La fractalité des structures urbaines*, Economica - Anthropos.
- Frankhauser P., Chapuis K., Mariani-Rousset S. et al., 2012, « Observer les processus de décision », in Frankhauser P., Ansel D. (éd.), *La décision d'habiter ici ou ailleurs*, Economica - Anthropos, p. 229-269.
- Frankhauser P., Hélène H., Tannier C., Vuidel G., 2007, *Vers des déplacements périurbains plus durables : propositions de modèles fractals opérationnels d'urbanisation*, Rapport de recherche PREDIT.
- Frémond M., 2015, *Une approche normative de l'aménagement au Luxembourg. Évaluation par la simulation*, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- Gacogne V., 2010, « Dynacité : simulation des jeux d'acteurs par la dynamique des systèmes », in Antoni J.-P. (éd.), *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*. Economica, p. 393-421.
- Gärling T., Friman M., 2002, « A psychological Approach to the Study of Residential Choice and Satisfaction », in Francescato G., Gärling T. (eds), *Residential environments: Choice, Satisfaction and Behavior*, Bergin and Garvey, p. 55-80.
- George P., 1970, *Dictionnaire de la géographie*, Presses Universitaires de France.
- Getis A., 2008, « A History of the Concept of Spatial Autocorrelation: A Geographer's Perspective », *Geographical Analysis* 40, p. 297-309.
- Gibrat R., 1931, *Les inégalités économiques : applications aux inégalités des richesses, à la concentration des entreprises*, Librairie du Recueil Sirey.
- Girres J.-F., Touya G., 2010, « Quality Assessment of the French OpenStreetMap Dataset », *Transactions in GIS* 14, p. 435-459.
- Goeldner-Gianella L., Humain-Lamoure A.-L., 2010, « Les enquêtes par questionnaire en géographie de l'environnement », *L'Espace géographique* 39, p. 325-344.
- Goodchild M.F., 2007, « Citizens as Sensors: the World of Volunteered Geography », *GeoJournal* 69, p. 211-221.
- Gorry G.A., Scott Morton M., 1971, « A Framework for Management Information Systems », *Sloan Management Review* 13, p. 55-70.
- Grafmeyer Y., Joseph I., 1990, *L'École de Chicago*, Aubier.
- Grais B., 2000, *Statistique descriptive, tome 1 : Techniques statistiques*, Dunod.
- Gravier J.-F., 1947, *Paris et le désert français*, Flammarion.
- Habbar A.-C., Guiraud. M., 2002, « À la recherche des droits perdus », in *Les nouveaux utopistes du développement durable*, Autrement, p. 178-196.

- Hägerstrand T., 1952, *The Propagation of Innovation Waves*, Royal University of Lund, Dept. of Geography.
- Hägerstrand T., 1967, *Innovation Diffusion As a Spatial Process*, University of Chicago Press.
- Hägerstrand T., 1970, « What about People in Regional Science ? », *Papers of the Regional Science Association* 24, p. 7-21.
- Haggett P., 1965, *Locational Analysis in Human Geography*, Arnold.
- Haggett P., Chorley R.J., 1967, « Models, Paradigms and the New Geography », in Haggett P., Chorley R.J. (eds), *Models in geography*, The Trinity Press, p. 19-41.
- Haggett P., Chorley R.J., 1974, *Network Analysis in Geography*, Hodder & Stoughton Educational.
- Haklay M., 2010, « How Good is Volunteered Geographical Information? A Comparative Study of OpenStreetMap and Ordnance Survey Datasets », *Environment and Planning B: Planning and Design* 37, p. 682-703.
- Hall E.-T., 1966, *La dimension cachée*, Points.
- Hangouet J.-F., 1999, « Analyse spatiale des phénomènes géographiques », *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://cybergeo.revues.org/5145>.
- Hansen W.G., 1959, « How Accessibility Shapes Land Use », *Journal of the American Institute of Planners* 25, p. 73-76.
- Harris C.D., Ullman E.L., 1945, « The Nature of Cities », *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, p. 7-17.
- Haslett J., Bradley R., Craig P.S. *et al.*, 1991, « Dynamic Graphics for Exploring Spatial Data, with Application to Locating Global and Local Anomalies », *American Statistician* 45, p. 234-242.
- Haton J.-P., Haton M.-C., 1993, *L'intelligence artificielle*, Presses Universitaires de France.
- Haugeland J., 1989, *L'Esprit dans la machine*, Odile Jacob.
- Hély V., 2012, *Les modèles LUTI : historique, typologie et perspective*, Mémoire de Master, Université de Franche-Comté.
- Hénard E., 1911, « The Cities of the Future », *Transaction*, p. 345-367.
- Hollands R.G., 2008, « Will the Real Smart City please Stand up? », *City* 12, p. 303-320.
- Holt-Jensen A., 2009, *Geography: History And Concepts. A Student's Guide*, Sage Publications Ltd.
- Huff D.L., 1964, « Defining and Estimating a Trading Area », *Journal of Marketing* 28, p. 34-38.
- Huriot J.-M., 1998, *La ville ou la proximité organisée*, Economica.
- Isard W., 1956, *Location and Space-Economy: A General Theory Relating to Industrial Location, Market Areas, Land Use, and Urban Structure*, MIT Press.
- Isard W., 1975, *An Introduction to Regional Science*, Englewood Cliffs, Prentice Hall.
- Isard W., 2003, *History of Regional Science and the Regional Science Association International*, Springer.
- Isnard H., 1981, « Une problématique empiriste de la géographie », in Isnard H., Racine J.-B., Reymond H. (éd.), *Problématique de la géographie*, Presses Universitaires de France, p. 15-83.
- James P.E., 1972, *All Possible Worlds: A History of Geographical Ideas*, Odyssey Press.
- Jang M., Suh S.-T., 2010, « U-City: New Trends of Urban Planning in Korea Based on Pervasive and Ubiquitous Geotechnology and Geoinformation », in *Computational Science and Its Applications ICCSA 2010*, Springer, p. 262-270.
- Jayet H., 1993, *Analyse spatiale quantitative: une introduction*, Economica.
- Jean G., 1994, *Voyages en utopie*, Gallimard.
- Johnston R.J., 1979, *Geography and Geographers: Anglo-American Human Geography Since 1945*, Arnold.
- Jouvenel (de) B., 1964, *L'Art de la conjecture*, Hachette.
- Jungk R., 1974, *Pari sur l'homme*, Robert Laffont.
- Kansky K.J., 1963, *Structure of Transportation Networks*, University of Chicago Press.

- Kaufmann V., Jemelin C., Guidez J.-M., 2001, *Automobile et modes de vie urbains : quel degré de liberté ?*, La Documentation française.
- Kitchin R., 2013, « The Real-Time City? Big data and Smart Urbanism », *GeoJournal* 79, p. 1-14.
- Kitchin R., 2014, *The Data Revolution: Big Data, Open Data, Data Infrastructures and Their Consequences*, SAGE Publications Ltd.
- Klein O., 2000, *Temps et Espace-Temps (Essais de représentation)*, Mémoire de DEA, Université Louis Pasteur, Strasbourg I.
- Klein O., 2007, *Modélisation et représentations spatio-temporelles des déplacements quotidiens urbains*, Thèse de doctorat, Université Strasbourg I.
- Koenig G., 1974, « Théorie économique de l'accessibilité urbaine », *Revue économique* 25, p. 275-297.
- Koestler A., 1967, *The Ghost in the Machine*, Arkana.
- Koomen E., Hilferink M., Borsboom-Van Beurden J., 2011, « Introducing Land Use Scanner », in Koomen E., Borsboom-Van Beurden J. (eds), *Land- Use Modelling in Planning Practice*. Springer, p. 3-21.
- Kristensson P.O., Dahlback N., Anundi D. et al., 2009, « An Evaluation of Space Time Cube Representation of Spatiotemporal Patterns » *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 15, p. 696-702.
- Kurzweil R., 1990, *The Age of Intelligent Machines*, MIT Press.
- Kwan M.-P., 2000, « Interactive Geovisualization of Activity-travel Patterns using Three-dimensional Geographical Information Systems: a Methodological Exploration with a Large Data Set », *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 8, p. 185-203.
- Lacoste Y., 2014, *La géographie, ça sert, d'abord, à faire la guerre*, La Découverte.
- Langlois A., Phipps M., 1997, *Automates cellulaires: Application à la simulation urbaine*, Hermes.
- Le Corbusier, 1925, *L'art décoratif d'aujourd'hui*, Flammarion.
- Le Corbusier, 1957, *La charte d'Athènes*, Seuil.
- Le Goff J.-P., 2009, « Au nom du développement durable » *Le Débat* 156, p. 80-97.
- Lefevre B., 2007, *La soutenabilité environnementale des transports urbains dans les villes du sud : Le couple « transport – usage des sols » au cœur des dynamiques urbaines*, Thèse de doctorat, ENMP.
- Legendre J.-P., Olivier L., Schnitzler B., 2007, *L'archéologie nationale-socialiste dans les pays occupés à l'ouest du Reich*, Infolio, Gollion.
- Lévy J., Lussault M., 2003, *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*, Belin.
- Lévy N., Martens K., Benenson I., 2012, « Exploring Cruising using Agent-based and analytical Models of Parking », *Transportmetrica A: Transport Science* 9, p. 773-797.
- L'Hostis A., Soulas C., Wulfhorst G., 2013, « La ville orientée vers le rail et l'intermodalité », in Brun G. (éd.), *Ville et mobilité. Nouveaux regards*, Economica, p. 115-126.
- Lowry I.S., 1964, *A Model of Metropolis*, Rand Corporation.
- Luger G.F., 2008, *Artificial Intelligence: Structures and Strategies for Complex Problem Solving*, Pearson.
- Lussault M., 2007, *L'homme spatial : La construction sociale de l'espace humain*, Seuil.
- Lussault M., 2014, *L'avènement du monde: Essai sur l'habitation humaine de la Terre*, Seuil.
- MacEachren A.M., 1994, « Time as a cartographic variable », in Hearnshaw H.M., Unwin D.J. (eds), *Visualization in Geographical Information System*, John Wiley & Sons, p. 115-130.
- Mandelbrot B., 1957, « Étude de la loi d'Estoup et de Zipf : fréquences des mots dans le discours », in Apostel L., Mandelbrot B., Morf A. (éd.), *Logique, langage et théorie de l'information*, Presses Universitaires de France, p. 22-53.
- Marchetti C., 1991, « Voyager dans le temps. Considérations pour une meilleure exploitation de la liaison fixe », *Futuribles* 156, p. 19-29.
- Marshall A., 1890, *Principles of Economics*, Springer.
- Martinez F.J., 1995, « Access: the Transport-Land Use Economic Link », *Transportation Research* 29, p. 457-470.

- Martinez F.J., Donoso P., 2010, « The MUSSA II Land Use Auction Equilibrium Model », in Simmonds D., Pagliara F. (eds), *Residential Location Choice: Models and Applications*, Ed. J. Preston, p. 99-114.
- Masson S., 1998, « Interrelations entre système de transport et système de localisation : De l'héritage des modèles traditionnels à l'apport des modèles interactifs de transport et d'occupation des sols », *Les Cahiers Scientifiques du Transport* 33, p. 79-108.
- Massot M.-H., Orfeuill J.-P., 2005, « La mobilité au quotidien, entre choix individuel et production sociale », *Cahiers Internationaux de Sociologie* CXVIII, p. 81-100.
- Mathis P., 2006, *Cohérence entre politique des transports et politique d'aménagement*, Rapport PREDIT/ADEME.
- McFadden D., 1973, « Conditional logit Analysis of qualitative Choice Behavior », in Zarembka P. (eds), *Frontiers of Econometrics*. Academic Press, p. 105-142.
- Meadows P., 1957, Models, Systems and Science. *American Sociological Review* 22, p. 3-9.
- Menzel H., 1961, « Comment on Robinson's Ecological Correlations and the Behaviour of Individuals », in Theodorson G.A. (ed), *Studies in human ecology*, p. 121-122.
- Merlin P., 1995, *Les Techniques de l'urbanisme*, Presses Universitaires de France.
- Merlin P., 2002, *L'Aménagement du territoire*, Presses Universitaires de France.
- Merlin P., Choay F., 2015, *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*, Presses Universitaires de France.
- Mills E., 1967, « An aggregative model of resource allocation in metroplitan areas », *American Economic Review* 57, p. 197-210.
- Minshull R., 1975, *Introduction to Models in Geography*, Prentice Hall Press.
- Minvielle E., Souiah S.-A., 2003, *L'analyse statistique et spatiale : Statistiques, cartographie, télédétection, SIG*, Éditions du Temps.
- Miyamoto K., Kitazume K., 1989, « A Land Use Model based on Random Utility/Rent Bidding Analysis (RURBAN) », *Transport Policy, Management and Technology* 4, p. 107-121.
- Moigne J.-L., 1999, *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod.
- Moine A., 2006, « Le territoire comme un système complexe : un concept opératoire pour l'aménagement et la géographie », *L'Espace géographique* 35, p. 115-132.
- Monmonier M., 1993, *Comment faire mentir les cartes ou du mauvais usage de la géographie*, Flammarion.
- Moran P.A.P., 1950, « A Test for Serial Dependence of Residuals », *Biometrika* 37, p. 178-181.
- Morill R.L., 1965, « Migration and the growth of urban settlement » *Lund Studies in Geography* B, 26.
- Morin E., 1990, *Introduction à la pensée complexe*, Seuil.
- Münnich R., Schürle J., 2003, « On the Simulation of Complex Universes in the Case of Applying the German Microcensus », *DACSEIS Research Paper Series*.
- Musso P., 1997, *Télécommunications et philosophie des réseaux, la postérité paradoxale de Saint-Simon*, Presses Universitaires de France.
- Musso P., 1999, *Saint Simon et le Saint-Simonisme*, Presses Universitaires de France.
- Muth R.F., 1969, *Cities and Housing. The spatial Pattern of urban residential Land Use*, University of Chicago Press.
- Nguyen-Luong D., 2011, « SIMAURIF, un modèle dynamique de simulation de l'interaction transport-urbanisation en région Île-de-France », in Antoni J.-P. (éd.), *Modéliser la ville. Forme urbaine et politiques de transport*, Economica, p. 78-118.
- Nitsch V., 2005, « Zipf zipped », *Journal of Urban Economics* 57, p. 86-100.
- Oakley A.C., 1956, *Men at Work*, University of London Press.
- Orcutt G et al., 1961, *Microanalysis of Socioeconomic Systems: A Simulation Study*, Harper and Row.
- Ortúzar J. de D., Willumsen L.G., 1994, *Modelling Transport*, Wiley.
- Palsky G., 2003, « Éléments pour une histoire de la sémiologie graphique avant Jacques Bertin », *Bulletin de l'Association de géographes français* 80, p. 183-194.
- Park R.E., Burgess E.W., McKenzie R.D., 1925, *The City*, University of Chicago Press.

- Popper K.R., 1937, *La logique de la découverte scientifique*, Payot.
- Portnoff A.-Y., 2011, « Les entreprises au défi de l'ubiquité », *Futuribles* 372, p. 43-52.
- Pumain D., 2012, « Une théorie géographique pour la loi de Zipf », *Région et développement* 36, p. 31-54.
- Pumain D., 2014, « Observation, observation, observation », *Cybergeo: European Journal of Geography*. <http://cybergeo.revues.org/26248>.
- Pumain D., Racine J.-B., 1999, « L'homo geographicus : de l'emprunt à l'empreinte », *Revue européenne des sciences sociales* 37, p. 77-86.
- Pumain D., Saint-Julien T., 2001, *Les interactions spatiales*, Armand Colin.
- Pumain D., Sanders L., Saint-Julien T., 1989, *Villes et auto-organisation*, Economica.
- Putman S.H., 1983, *Integrated urban Models. Policy Analysis of Transportation and Land-Use*, Pion Limited.
- Ragon M., 1986, *Histoire mondiale de l'architecture. Tome 3 : Prospective et futurologie*, Casterman.
- Ramade F., (2002, *Écologie appliquée*, Dunod.
- Ramadier T., Bronner A.-C., 2006, « Knowledge of the Environment and Spatial Cognition: JRS as a Technique for improving Comparisons between social Groups », *Environment and Planning B: Planning and Design* 33, p. 285-299.
- Raux C., 2007, *Le péage urbain*, La Documentation française.
- Ravenstein E.G., 1885, « The Laws of Migration », *Journal of the Statistical Society of London* 48, p. 167-235.
- Reilly W.J., 1931, *The Law of Retail Gravitation*, Knickerbocker Press.
- Reymond H., 1998, « Approches nouvelles de la coalescence », in Reymond H., Cauvin C., Kleinschmager R. (éd.) *L'espace géographique des villes*, Economica - Anthropos, p. 21-48.
- Rimbert S., 1964, *Cartes et graphiques : Initiation à la cartographie*, Centre de Documentation Universitaire.
- Robinson W.S., 1950, « Ecological Correlations and the Behavior of Individuals », *American Sociological Review* 15, p. 351-357.
- Rolland-May C., 2000, *Évaluation des territoires: concepts, modèle, méthodes*, Hermes.
- Rosnay (de) J., 1975, *Le macroscope : vers une vision globale*, Seuil.
- Sanders L., Favaro J.-M., Mathian H. et al., 2007, « Intelligence artificielle et agents collectifs : le modèle EUROSIM », *Cybergeo: European Journal of Geography*. <http://cybergeo.revues.org/8962>.
- Sanders L., Pumain D., Mathian H. et al., 1997, « SIMPOP: A Multi-agents System for the Study of Urbanism », *Environment and Planning B: Planning and Design* 24, p. 287-305.
- Schaffar A., 2009, « La loi de Zipf dans la science régionale : entre anciennes controverses et nouvelles perspectives », *Cybergeo: European Journal of Geography*. <http://cybergeo.revues.org/22200>.
- Seber G.A.F., Wild C.J., 2003, *Nonlinear Regression*, John Wiley & Sons.
- Shannon C.E., 1948, « A Mathematical Theory of Communication », *Bell System Technical Journal* 27, p. 379-423.
- Shin D.-H., 2009, « Ubiquitous City: Urban Technologies, Urban Infrastructure and Urban Informatics », *Journal of Information Science* 35, p. 515-526.
- Simmonds D., 1999, « The Design of the DELTA Land-Use Modelling Package », *Environment and Planning B: Planning and Design* 26, p. 665-684.
- Simon H., 1955, « On a Class of Skew Distribution Functions », *Biometrika* 42, p. 425-440.
- Skilling H., 1964, « An Operational View », *American Scientist* 52, p. 388-396.
- Smith W., 1949, *An Economic Geography of Great Britain*, Methuen.
- Solow R., 1972, Land Use in a long narrow City. *Journal of Economic Theory* 3, p. 430-447.
- Spagnou P., 2012, *Raisonnez probabilités*, Ellipses.
- Sprague R.H., Watson H.J., 1993, *Decision Support Systems: putting Theory into Practice*, Prentice-Hall.
- Stewart J.Q., 1947, « Suggested Principles of "Social Physics" », *Science* 106, p. 179-180.

- Stoklosa K., Besier G. (eds), 2014, *European Border Regions in Comparison: Overcoming Nationalistic Aspects or Re-Nationalization?*, Routledge.
- Stouffer S.A., 1940, « Intervening Opportunities: A Theory Relating to Mobility and Distance », *American Sociological Review* 5, p. 845-867.
- Strano E., Nicosia V., Latora V. *et al.*, 2012, *Elementary Processes Governing the Evolution of Road Networks*, Scientific Reports.
- Symanzik D.J., 2014, « Exploratory Spatial Data Analysis », in Fischer M.M., Nijkamp P. (eds), *Handbook of Regional Science*, Springer, p. 1295-1310.
- Tannier C., Hirtzel J., Stephenson R. *et al.*, 2016, « Conception and use of an individual-based model of residential choice in a planning decision process. Feedback from an experimental trial in the city of Besançon, France », *Progress in Planning In Press*.
- Thierry C., 2015, *Ville et fortifications : de l'héritage à la production du territoire urbain*, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- Thomson J.M., 1972, Methods of traffic limitation in urban areas, *Working Paper OECD*.
- Thünen (von) J.H., 1851, *Recherches sur l'influence que le prix des grains, la richesse du sol et les impôts exercent sur les systèmes de culture*, Guillaumet et Cie.
- Timmermans H.J.P., 2003, « The Saga of Integrated Land Use-Transport Modeling: How Many More Dreams Before We Wake Up? », in *10th International Conference on Travel Behaviour Research*, Lucerne, Switzerland, p. 35.
- Tobler W., 1975, « Commodity fields », *Papers for IIASA* 15.
- Tobler W., 1976, « Spatial Interaction Patterns », *Journal of Environmental Systems* 6, p. 271-301.
- Tobler W., 1978, « Data Structures for Cartographic Analysis and Display », in *Proceedings of Computer Science and Statistics: Eleventh Annual Symposium on the Interface*, Raleigh, North Carolina State University, Institute of Statistics, p. 134-140.
- Tobler W., 1979, « Cellular Geography », in Gale S., Olsson G. (eds), *Philosophy in Geography*, Reidel, p. 379-386.
- Tobler W., 1981, « A Model of Geographical Movement », *Geographical Analysis* 13, p. 1-20.
- Townsend A.M., 2014, *Smart Cities - Big Data, Civic Hackers, and the Quest for a New Utopia*, Norton & Company.
- Tukey J.W., 1977, *Exploratory Data Analysis*, Pearson.
- Ullman E.L., 1941, « A Theory of Location for Cities », *American Journal of Sociology* 46, p. 853-864.
- Utudjian E., 1952, *L'urbanisme souterrain*, Presses Universitaires de France.
- Waddell P., 2002, « UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation, and Environmental Planning », *Journal of the American Planning Association* 68, p. 297-314.
- Wegener M., 2004, « Overview of Land-Use Transport Models », in Hensher D.A., Button K. (eds), *Transport Geography and Spatial Systems*, Elsevier, p. 127-146.
- Wegener M., 1982, « Modeling urban Decline: a multilevel economic-demographic Model of the Dortmund Region » *International Regional Science Review* 7, p. 21-41.
- Wegener M., 1985, « The Dortmund Housing Market Model: A Monte Carlo Simulation of a regional Housing Market », in Stahl K. (ed), *Microeconomic Models of Housing Markets*, Springer, p. 144-191.
- Wegener M., 2011, « From Macro to Micro – How Much Micro is too Much? », *Transport Reviews* 31, p. 161-177.
- Wegener M., Fürst F., 1999, *Land Use Transport Interaction: State of the Art*, Transland, Irpud.
- Wellington A.M., 1887, *The Economic Theory of the Location of Railways: an Analysis of the Conditions controlling the Laying out of Railways to Effect the most judicious Expenditure of Capital*, John Wiley & Sons.
- 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, p. 1175-1199.

- Wiener N., 1948, *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, MIT Press.
- Wilson A.G., 1969, « The Use of Entropy maximising Models in the Theory of Trip Distribution, Mode Split and Route Split », *Journal of Transport Economics and Policy* 3, p. 107-126.
- Wilson A.G., 1970, *Entropy in Urban and Regional Modelling*, Routledge.
- Witlox F., 2005, « Expert Systems in Land-use Planning: An Overview », *Expert Systems with Applications* 29, p. 437-445.
- Wolfram S., 1983, « Statistical Mechanics of Cellular Automata », *Review of Modern Physics* 55, p. 601-644.
- Wonnacott T.-H., Wonnacott R.-J., 1999, *Statistique : Économie - Gestion - Sciences - Médecine*, Economica.
- Zahavi Y., 1981, « A new urban travel model », in Krčevina S. (ed), *Global Modelling*, Springer, p. 130-138
- Zajec O., 2009, *Les secrets de la géopolitique*, Artège.
- Zaninetti J.-M., 2005, *Statistique spatiale : méthodes et applications géomatiques*, Hermes.
- Zipf K., 1949, *Human Behavior and the Principle of least Effort*, Addison Wesley.



## TABLE DES MATIÈRES

<b>Préface</b> .....	3
<b>Introduction – Les acquis</b> .....	9

### **Première partie** **Approches conceptuelles : les convictions**

<b>Chapitre 1 : Aménagement et planification</b> .....	17
1. Fondements théoriques .....	17
2. Fondements pratiques.....	22
3. Fondements conflictuels.....	32
<b>Chapitre 2 : Utopies et idéologies</b> .....	38
1. Le temps du beau .....	38
2. Le temps de la technique .....	43
3. Le temps du développement durable.....	51
<b>Chapitre 3 : Anticipation et évaluation</b> .....	60
1. La boule de cristal.....	60
2. L'ordinateur de bureau .....	67
3. Les jumelles de vision nocturne.....	74

### **Deuxième partie** **Approches thématiques : les points de vue**

<b>Chapitre 4 : Économie et localisation</b> .....	85
1. Les modèles de l'École allemande.....	86
2. Les théories de l'École américaine.....	93
3. Les théories socio-économiques .....	102
<b>Chapitre 5 : Sociologie et géographie urbaines</b> .....	107
1. L'interaction spatiale.....	107
2. La sociologie urbaine.....	112
3. Temps et accessibilité.....	122

<b>Chapitre 6 : Réseaux et ingénierie des transports</b> .....	132
1. Graphes et réseaux.....	132
2. Les quatre étapes du trafic.....	140

## **Troisième partie**

### **Approches méthodologiques : les réductions**

<b>Chapitre 7 : L'approche par les chiffres</b> .....	153
1. L'acquisition des données.....	153
2. L'analyse des données.....	168
3. L'erreur des données.....	181
<b>Chapitre 8 : L'approche par l'image</b> .....	188
1. Systèmes d'information géographique .....	188
2. Visualisation et exploration.....	198
<b>Chapitre 9 : L'approche par la complexité</b> .....	205
1. Les systèmes « intelligents » .....	206
2. Les systèmes intégrés.....	215
<b>Conclusion – Les enjeux</b> .....	229
<b>Bibliographie</b> .....	237
<b>Table des matières</b> .....	249