

Pierre Frankhauser*
Marie-Noëlle Mille**
Thomas Bäck***

Octobre 1995

Un modèle pour simuler l'impact d'un projet d'aménagement sur la dynamique urbaine

Présentation sur invitation de la Commission Européenne (DG XII)
dans le cadre du congrès « Urban Utopia »
Berlin, 15-17 nov. 1995

- * IRADES, Université de Franche-Comté, 30 rue Mégevand 25 000 F-Besançon
- ** CERTU, 9 rue Récamier 69 456 F-Lyon
- *** ICD, Joseph von Fraunhofer-Str. 20 D-44227 Dortmund

INTRODUCTION

La ville est un tout organisé. La répartition des activités, des habitants, et des catégories sociales dépendent de facteurs déterminants de nature différente : géographiques, démographiques et sociaux. Ils se combinent en proportions variables et produisent l'entité urbaine.

Actuellement, certaines villes sont en crise, les manifestations en sont nombreuses : urbanisation anarchique, pollution, ségrégation, contribuent de façon complexe à ce dysfonctionnement. Pour lutter contre ces phénomènes, les pays industrialisés ont modifié leurs politiques urbaines et pris un certain nombre de mesures. D'abord confronté à une forte demande de logements et donc tourné vers une politique quantitative, l'orientation de l'aménagement est devenue, depuis les années 80, plus qualitative. Cette exigence de qualité a des conséquences sur les méthodes d'approche des problèmes urbains, et notamment, la recherche d'un développement urbain durable, d'une ville « durable » (ou *sustainable city*)¹.

Cette notion, qui tend à être de plus en plus utilisée, s'applique à une politique et à une stratégie visant à assurer la continuité dans le temps du développement économique et social, dans le respect de l'environnement, et sans compromettre les ressources naturelles indispensables à l'activité humaine. On définit en outre le développement durable comme un développement apte à « répondre aux besoins du présent sans compromettre la possibilité de répondre aux besoins des générations à venir »².

L'organisation spatiale et le fonctionnement des zones métropolitaines est le résultat d'un processus socio-économique complexe, auquel participe un grand nombre d'agents sociaux et de décideurs. La conception d'une «ville durable» doit donc intégrer la multiplicité des besoins de la population et tenir compte de la complexité des interactions entre les agents sociaux et les décideurs, et ce, à tous les niveaux d'échelle. Dans cette optique, il apparaît nécessaire de transformer les pratiques, de formaliser de nouvelles approches capables de comprendre la complexité qui sous-tend l'évolution des espaces urbains, et d'évaluer les impacts potentiels des projets d'aménagement.

Afin de contribuer à développer les options technologiques pour la réalisation d'une ville durable, l'objectif de notre projet de recherche est de développer un outil de compréhension des dynamiques urbaines. Notre but est de simuler et visualiser des scénarios d'évolutions urbaines, afin d'aider les décideurs à apprécier l'impact d'un projet d'aménagement sur l'organisation spatiale de la zone en question et le fonctionnement urbain et régional.

¹ Extrait du volume II du programme communautaire de politique et d'action pour l'environnement et le développement durable et respectueux de l'environnement, mars 1992.

² Rapport de la commission mondiale sur l'environnement et le développement durable, dit "Rapport Brundtland".

Dans un premier temps, nous mettrons en évidence la complexité de la morphogenèse des villes et le rôle primordial des espaces périurbains dans la morphologie actuelle des tissus urbains. Nous montrerons la nécessité d'identifier les différents acteurs et leurs interactions à des niveaux d'échelle différents.

Dans un second temps, nous présenterons les principes et les concepts sur lesquels se fonde notre recherche, ainsi que les outils disponibles adaptés à la résolution de notre problématique. Ceci nous permettra d'élaborer l'architecture de notre modèle. Notre troisième partie, plus technique, sera consacrée à la formalisation du modèle.

PREMIÈRE PARTIE

Les tissus urbains : une morphogenèse et un fonctionnement complexes

La morphologie et le fonctionnement des entités urbaines sont interdépendants et s'influencent mutuellement pour concourir au développement urbain. Afin de mieux comprendre ces interactions nous allons commencer par analyser le rôle des différents facteurs qui contribuent à l'évolution des entités urbaines en examinant tout d'abord l'influence du site, puis les processus socio-économiques et enfin le rôle des acteurs.

I.1 Le rôle du site et le cadre socio-économique

A l'échelle locale, le cadre naturel n'est pas sans influencer l'organisation de l'espace urbain. Le site, configuration du lieu où s'établit la ville, peut en effet imposer des contraintes, qui entraînent par exemple un surcoût de construction, ou au contraire faciliter l'implantation humaine.

A l'échelle régionale et nationale, l'insertion d'une ville dans l'espace national ou international surtout par rapport aux axes de transport revêt une importance certaine dans son évolution. De plus, la position dans le réseau des villes joue beaucoup dans la concurrence qu'elles se livrent pour attirer les entreprises et capter les innovations.

La dimension historique est également un aspect non négligeable. En effet, le tissu urbain actuel est la résultante de plusieurs siècles (même de millénaires) de développement, et conserve des traces liées aux conceptions architecturales de ces époques. La morphologie urbaine fait ainsi référence au concept de "mémoire" de l'espace.

L'augmentation considérable du taux d'urbanisation au cours des trente dernières années s'est accompagnée d'une forte consommation de l'espace. On s'aperçoit que les préférences des agents pour certains sites ont contribué à ce phénomène. En effet, pour celui qui a la possibilité de choisir sa résidence ou pour l'entreprise qui cherche un emplacement, des critères particuliers liés au site et à la situation (qualité paysagère, accessibilité...) jouent un rôle primordial. L'incohérence visible de l'urbanisation a fortement accentué l'importance sociale des problèmes urbains et a obligé les responsables des politiques urbaines s'intéresser davantage au comportement des acteurs.

I.2 Les acteurs urbains

I.2.1 Les domaines d'intervention

- *Un aménagement réfléchi des réseaux de transport*

L'accessibilité de l'espace est une condition élémentaire du fonctionnement d'un système de peuplement. L'aménagement de ces réseaux a donc joué un rôle important dans le processus d'urbanisation. Dans un premier temps, le développement des villes était conditionné par la structure des réseaux de transport en commun (métro, tramways) ce qui s'est manifesté par une croissance tentaculaire le long de ces axes. Depuis la motorisation,

les politiques d'aménagement ont longtemps favorisé le développement du réseau routier au détriment des transports en commun. Ainsi la desserte de l'espace est devenue beaucoup plus homogène et la croissance urbaine a perdu son caractère purement axial ce qui a contribué à l'éclatement de l'espace urbanisé. Suite aux impacts négatifs de la motorisation (pollution, saturation du réseau routier) on observe récemment un intérêt croissant pour la création ou la restauration de réseaux de transport en commun, organisés en fonction de la demande des utilisateurs.

- *L'importance de l'urbanisme*

Sur la base d'une vision essentiellement urbanistique de la ville, les décideurs conçoivent des plans d'aménagement urbain et des politiques de gestion des infrastructures et équipements existants. Pendant la forte poussée urbaine des années 1960-70, le fonctionnalisme était le concept dominant de l'urbanisme. Il favorisait la motorisation et la création de nouvelles entités spatiales, parfois assez éloignées des centres existants et constitués de grands immeubles locatifs. L'architecture monotone de ces quartiers, l'absence de lieux de rencontre et d'infrastructures attractives ont souvent empêché une identification de la population avec leur environnement résidentiel. Cette situation n'a pas facilité l'intégration des nouveaux-venus, d'autant plus que ceux-ci ne travaillent que rarement dans leur commune résidentielle. Ainsi le phénomène de ségrégation sociale a été renforcé et on a observé une dégradation rapide de ces quartiers.

Depuis les années quatre-vingt, les politiques urbaines ont changé d'orientation et favorisent la qualité des aménagements plutôt que le nombre de logement construits. Maintes tentatives ont également eu pour objectif de limiter l'éclatement urbain.

- *La compétition entre communes périurbaines*

Actuellement, la périurbanisation concerne un espace de plus en plus vaste et un nombre croissant de communes. On constate que les communes périurbaines ne réalisent qu'assez tard qu'elles forment un tout fonctionnel avec la ville-centre. Elles établissent dans un premier temps leur propre stratégie pour attirer des activités, soit délocalisées du centre-ville, soit accompagnant le développement urbain. Une compétition entre communes s'instaure et prive ainsi la ville-centre de ressources, bien qu'elle soit obligée d'assurer un nombre de services croissants. Souvent, ce n'est que lorsque l'étalement de la zone urbanisée dépasse la proche banlieue que les communes acceptent en général d'entrer dans une structure de concertation. Mais alors la croissance périurbaine atteint déjà la prochaine auréole de lieux centraux qui, par leur taille, sont plus autonomes que les communes de la proche banlieue. Ainsi la compétition entre communes s'amplifie.

I.2.2. Les stratégies des agents sociaux et économiques

- *Les stratégies résidentielles*

Depuis les analyses de l'École de Chicago de nombreuses études, notamment sociologiques, ont mis en évidence l'importance des stratégies résidentielles dans le phénomène d'éclatement des villes et de ségrégation sociale des quartiers. La population cherche à habiter dans des quartiers qui réunissent le maximum d'avantages en regard de

ses revenus et de ses propres aspirations, qui sont multiples et parfois contradictoires. Plusieurs analyses (Friedrichs 1983, Prognos 1977) ont montré que ce sont notamment les jeunes couples avec enfants qui considèrent les zones périurbaines comme avantageuses : plus d'espaces verts, moins de nuisances dues au bruit et à la pollution, prix avantageux du terrain qui permet l'accès à la propriété immobilière. Ce comportement crée une forte demande de terrains à bâtir dans les communes périurbaines. Comme ces nouveaux quartiers sont surtout des lotissements pavillonnaires, la consommation d'espace est d'autant plus forte. Ces observations ont conduit certains auteurs à supposer que les noyaux urbains allaient disparaître complètement (Berry 1976, Vining 1977). Cependant, comme l'a fait remarquer Hoyt (1964), le même groupe d'agents réclame une bonne accessibilité des centres villes. En effet, les centres restent attrayants par leur ambiance urbaine (Hall 1991), par leur services culturels et commerciaux et concentrent ainsi un certain nombre d'emplois. En outre, d'autres classes sociales préfèrent loger au centre-ville, par exemple les couples sans enfants ou les personnes âgées. Il s'agit donc d'une migration sélective vers les zones périurbaines qui renforce la ségrégation sociale. Celle-ci n'est d'ailleurs pas nécessairement perçue comme un phénomène négatif : dès qu'une classe sociale est majoritaire dans un quartier, elle tente de préserver cette homogénéité.

- *Les stratégies économiques*

L'importance croissante de la desserte routière au détriment du chemin de fer et des voies navigables permet aux entreprises de choisir assez librement leur emplacement. De ce fait, certains critères avantageux tels que la disponibilité et le prix du terrain, une meilleure accessibilité et les avantages fiscaux accordées par les communes incitent les entreprises et les commerces (grandes surfaces) à s'implanter en périphérie des villes.

I.3 L'échec des politiques urbaines d'aménagement

L'analyse du comportement des différents acteurs montre une diversité considérable de leurs objectifs. Chaque groupe d'acteurs évalue une mesure d'aménagement en fonction de ses propres besoins, dans le but d'obtenir ou de conserver une situation favorable. Par exemple, les propriétaires de maisons situées en bordure d'une zone bâtie, à proximité d'un espace vert, essaieront d'empêcher la réalisation d'un lotissement ou la construction d'une route dans leur voisinage. Cet exemple montre qu'il existe des forces centrifuges qui tendent à empêcher une densification de l'espace urbain et donc à repousser l'urbanisation vers les zones rurales. Les politiques d'aménagement n'ont pas réussi à maîtriser l'étalement des zones périurbaines. Ce dysfonctionnement a contribué à la perte d'identité considérable de beaucoup de communes périurbaines, dont la fonction se borne trop souvent à celle de villes-dortoirs.

Cette évolution aurait nécessité l'élaboration précoce de schémas directeurs au niveau régional, qui définissent les fonctions de certains espaces selon leur vocation naturelle, voire leur importance pour un fonctionnement de l'ensemble de la zone en question. Cependant la relance démographique et économique espérée par les communes périphériques a freiné la réalisation de ces plans ou du moins entraîné leur modification.

Ceci se manifeste notamment par le manque de coordination des opérations d'aménagement entre des communes voisines, par exemple lors de l'implantation de zones commerciales, industrielles ou même résidentielles, dont l'étendue paraît souvent démesurée par rapport à la taille de l'ancien bourg. Ceci provoque une délocalisation des activités commerciales des anciens centres, dont souffrent encore plus les communes périurbaines que les centres villes.

Si la marge de manœuvre de l'aménageur paraît réduite, le succès qu'a connu récemment la mise en place de systèmes pertinents de transport en commun montre que la politique de transport semble être un des rares moyens efficaces pour canaliser l'urbanisation.

I.4 La dynamique urbaine, un processus d'auto-organisation

Les projets d'aménagement ne dépendent pas uniquement de la seule volonté des décideurs, mais peuvent être contestés par certains groupes d'agents. Il arrive parfois que les agents revendiquent une opération d'aménagement non conforme à l'orientation du schéma directeur : la population résidentielle d'un lotissement peut, par exemple, exiger la construction du contournement routier ou l'amélioration de l'infrastructure de services de leur quartier .

En outre, la compétition entre communes se manifeste éventuellement par des projets contradictoires avec les intérêts d'autres communes ou de l'ensemble de la zone métropolitaine : un village en marge de la zone urbanisée peut élaborer un plan d'occupation du sol qui sacrifie une zone de loisir importante sur le plan régional. Ceci peut provoquer la contestation de la population des communes voisines, qui se retrouvent dans ce cas en concordance avec la vision de l'aménagement régional.

Il existe ainsi une rétroaction sur le processus d'urbanisation qui tend à influencer le développement futur de certaines zones. L'influence directe de la politique d'aménagement est alors amoindrie. L'évolution des espaces urbains apparaît comme le résultat de l'interaction entre les stratégies des groupes d'agents et les directives des responsables de l'aménagement. Dans une perspective systémique, ceci doit être interprété comme processus d'auto-organisation.

Des études récentes des tissus urbains, réalisées à partir d'une nouvelle méthode d'analyse basée sur la géométrie fractale, ont confirmé que la dynamique urbaine doit être considérée comme un processus d'auto-organisation (Frankhauser 1994) L'analyse fractale permet de mesurer, à partir de la représentation cartographique d'un tissu urbain, la variation de la part de la surface bâtie en fonction de la distance à un endroit choisi, par exemple le centre du noyau urbain. La représentation graphique des résultats met en évidence une diminution régulière de la densité du bâti ou la présence de ruptures dans l'organisation spatiale du tissu. Dans beaucoup de cas, les résultats obtenus montrent que la variation de la densité est la même dans les petites villes que dans les grandes agglomérations. On trouve ainsi, à différentes échelles, le même principe d'organisation spatiale.

En comparant les tissus d'une même agglomération à plusieurs dates, on constate que le noyau urbain tend à conserver son organisation spatiale. En revanche, les courbes

d'analyse de la périphérie deviennent régulières ce qui montre une structuration croissante des villes périurbaines. Par ailleurs, on constate une augmentation de la prégnance de l'agglomération principale sur les zones périurbaines qui ont tendance à former un agrégat commun avec le centre (François, Frankhauser, Pumain 1995). Cependant l'organisation spatiale de cet agrégat est loin d'être homogène. Au contraire, les résultats traduisent un allongement surproportionnel des bordures des agglomérations caractérisées par une fragmentation croissante du bâti. On n'observe en réalité pas de densification au centre de la zone urbanisée : la ville croît uniquement dans sa périphérie. Ainsi de nombreux espaces vides persistent à l'intérieur des agglomérations et l'étendu de ces espaces vides augmente de façon régulière vers la périphérie.

Le fait d'observer dans de nombreux cas certaines régularités dans les tissus urbains, aussi bien dans leur organisation spatiale que dans leur évolution, paraît surprenant vu la diversité de leur aspect. L'interprétation systémique d'un tel phénomène indique l'existence de certains processus qui font qui mettent en évidence des structures sous-jacentes selon un principe morphogénétique qui se manifeste de façon comparable dans beaucoup de villes. Ce processus ne peut résulter que des interactions socio-économiques que nous avons précédemment définies.

DEUXIÈME PARTIE

Architecture conceptuelle et outils choisis pour traiter une problématique pour la ville durable

L'analyse morphologique des tissus bâtis, ainsi que l'identification du processus d'urbanisation ont montré que, sous un angle d'approche systémique, la croissance urbaine doit être interprétée comme un processus d'auto-organisation résultant de l'interaction socio-économique de différents groupes d'acteurs. Nous proposons donc de modéliser le comportement des agents sociaux et de simuler les transformations d'un espace urbain, en faisant varier l'impact des interactions socio-économiques existant entre les groupes d'agents.

II.1 Concepts fondamentaux du modèle

Pour analyser de façon correcte les transformations de l'espace urbain, notre modèle doit présenter certaines caractéristiques essentielles. La première réside dans la faculté d'appréhender la dynamique urbaine, de permettre l'étude des processus de différenciation spatiale et d'être pertinent par rapport aux échelles d'action des phénomènes étudiés. La deuxième est l'interaction des différents acteurs socio-économiques et, liée à cela, le choix d'un type de modélisation qui prenne en compte les processus qualitatifs déterminant les décisions des acteurs. Enfin, troisième condition, le modèle doit être en mesure d'évoluer, d'adapter ses règles de fonctionnement, relativement aux changements qui affectent le système urbain étudié.

II.1.1 Dynamique, différenciation spatiale et pertinence des niveaux d'analyse

L'analyse dynamique d'un espace correspond à l'étude du fonctionnement de celui-ci à travers le temps. Ce fonctionnement évolue en général de façon bien déterminée, mais certains événements imprévisibles peuvent survenir, qui entraînent des conséquences disproportionnées sur le développement futur de l'espace. L'étude de la morphogenèse d'une ville doit donc inclure la modélisation de ces discontinuités irréversibles qui marquent son évolution. A ce propos, il importe de noter que la notion d'évolution dépasse celle de développement. Alors que l'idée de développement, et donc de croissance, suppose une stabilité des formes spatiales, celle d'évolution admet des changements structurels.

Un espace urbain est le siège d'un ensemble d'actions, de relations extrêmement nombreuses et variées. Celles-ci jouent sur des échelles spatio-temporelles multiples et interdépendantes. De ce fait, une ville peut être assimilée à un système complexe, c'est-à-dire présentant plusieurs niveaux d'organisation qui interagissent entre eux. La différenciation spatiale naît alors de l'impact du fonctionnement global d'un territoire sur un espace local présentant certaines spécificités. Autrement dit, il s'agit pour nous d'étudier un territoire infra-régional (une ville et son agglomération) sur lequel s'exercent aussi des influences extérieures régionales, nationales, voire internationales.

A l'échelle locale, il semble plus efficace de modéliser le comportement de groupes d'agents, plutôt que celui de chaque agent pris individuellement : riverains de la route, entrepreneurs intéressés par une meilleure desserte, etc. Ceci implique de considérer les phénomènes collectifs propres à cette échelle d'agrégation, à savoir les rapports entre groupes sociaux. A un niveau plus global, il apparaît intéressant de prendre en compte les effets de compétition entre différentes localités voisines. En effet, un tel phénomène compétitif peut largement influencer la structuration de l'espace. Ainsi un aménagement quelconque dans une commune peut affecter également l'attractivité d'une zone commerciale ou résidentielle dans une commune proche. Rappelons ici le rôle prépondérant de l'agglomération principale dans le processus d'urbanisation et le phénomène de concurrence des lieux centraux de la périphérie.

Afin de mettre en évidence les phénomènes de différenciation spatiale d'un espace urbain, nous devons intégrer la réalité morphologique de l'espace, ce que nous permet notamment la prise en compte des distances et des contiguïtés entre les lieux considérés.

II.1.2 Processus de décision et communication.

Supposons qu'un projet d'aménagement ait été proposé, par exemple la construction d'une route. Chaque acteur (ou groupe d'acteurs) de l'espace concerné dispose d'une certaine masse d'informations, souvent incomplète, sur le projet. Il va alors se forger une opinion à son sujet, sur la base :

- 1– des informations obtenues par le décideur, par exemple sur le tracé de la route, sa fonction (desserte, transit) et sa fréquentation ;
- 2– d'informations complémentaires diffusées par la presse ou certains groupes d'acteurs, par exemple des groupes de pression écologiques ou industriels ;
- 3– de l'opinion d'autres agents ou groupes d'acteurs exprimée en public ;
- 4– de ses propres aspirations : dans quelle mesure le projet répond-il à ses désirs. Une route de desserte peut ainsi lui paraître bien plus souhaitable qu'une voie de transit ;
- 5– de ses expériences préalables tirées principalement de la connaissance d'autres projets comparables. Il peut par exemple avoir une idée de la fiabilité des informations délivrées à propos de l'impact éventuel de la route (fréquentation, bruit).

Les trois premiers facteurs de décision correspondent à un traitement de l'information obtenue par des sources extérieures, tandis que les autres sont issus des réflexions propres à l'agent. A partir de ces éléments, il va évaluer le projet en pondérant les facteurs 1, 2 et 3 au moyen des facteurs 4 et 5, puis définir ensuite son attitude par rapport au projet. Il s'agit en fait d'un processus de formation d'une opinion.

L'opinion ainsi forgée par l'agent constitue une base de réflexion en vue du choix d'une stratégie d'action qui soit la plus efficace possible, en fonction de ses propres aspirations. Il va dès lors imaginer différents comportements possibles, par exemple :

- s'engager dans un groupe de pression (pour ou contre le projet ou vers sa modification),
- se résigner à la situation et réagir en changeant de lieu de résidence.

La manifestation des différentes opinions individuelles va alimenter une discussion publique sur le projet. A partir de là, le décideur peut entrer en lice et décide d'agir sur les facteurs 1, 2 ou 3. L'évaluation du poids de chacun d'eux va inspirer à l'aménageur sa future stratégie, soit par exemple :

- faire parvenir aux agents des informations complémentaires,
- proposer des mesures d'accompagnement (parois anti-bruit),
- modifier son projet (proposition d'un nouveau tracé de la route).

Suite à cela, une nouvelle boucle de formation d'opinion s'ouvre et l'agent modifie ou pas son avis sur la question. Plusieurs boucles de formation d'opinion peuvent se succéder avant que la décision définitive ne soit prise.

II.1.3 Mémoire et apprentissage du modèle

Imaginons que le projet de construction d'une route présenté ci-avant soit effectivement réalisé. Dans un premier temps, on observe une réaction directe de certains acteurs en rapport avec cette nouvelle situation. Ainsi il est possible que l'amélioration de la desserte d'une zone industrielle devienne un argument décisif pour l'implantation d'une nouvelle entreprise.

Dans un deuxième temps, le résultat de ces actions peut provoquer une transformation de l'espace et ainsi influencer le processus d'urbanisation. Par exemple, la densification progressive du tissu bâti peut provoquer une attitude hostile de la population résidentielle envers la création d'une nouvelle zone d'activité. La perception de l'espace vécu par la population a donc changé et influence différemment son comportement. Ceci peut également se traduire par un changement des indicateurs économiques : la gestion rigoureuse de l'espace peut entraîner un manque de terrains à bâtir et provoquer une augmentation des prix du foncier non bâti ; la dégradation d'un quartier peut faire baisser les prix des terrains et encourager la spéculation foncière.

Ceci montre qu'une décision d'aménagement peut être à l'origine d'une bifurcation dans la trajectoire (le comportement) d'un système spatial : ce n'est pas seulement l'impact direct de la décision qui transforme le paysage urbain ; la réponse à moyen terme des acteurs influence aussi le développement futur de l'espace.

Notre projet de modélisation prévoit de prendre en compte ces effets de transformation du système urbain suite à des opérations d'aménagement, aussi bien au niveau des stratégies des groupes d'agents, qu'au niveau de l'espace en lui-même. Ceci est possible par l'introduction de la notion d'apprentissage du système : les règles qui président au fonctionnement du modèle évoluent en fonction des changements qui affectent le système urbain. Précisons ici que la faculté l'apprentissage suppose une mémoire du système.

II.2 Architecture générale du modèle

Notre objectif étant de réaliser un modèle opérationnel, son architecture générale doit être conçue de façon à ce qu'un décideur puisse l'utiliser pour étudier l'impact d'un projet d'aménagement.

Pour cela, l'utilisateur peut proposer un projet d'aménagement soit sous la forme d'une représentation cartographique soit d'indications chiffrées. Deux options sont prévues :

– *la simulation du débat avant la prise de décision.* Elle tiendra compte des réactions des différents groupes d'agents socio-économiques et leurs opinions seront portées à la connaissance du décideur. Celui-ci pourra intervenir, modifier sa proposition et observer à nouveau les réactions des agents. En fonction des résultats, il pourra ensuite prendre sa décision définitive.

– *la simulation à moyen terme.* Le décideur pourra observer l'évolution du système urbain en fonction de la décision précédente. La simulation prend en compte les transformations de l'espace et les réactions des acteurs.

Afin d'observer l'impact d'une décision, l'aménageur aura à sa disposition :

- une représentation cartographique de l'espace affichée à l'écran, qui se transforme en fonction des décisions prises par les acteurs, et contient :

- des informations sur l'occupation du sol,
- des informations sur les réseaux de transport (par exemple leur saturation),
- des informations sur les contraintes naturelles (relief, hydrographie...),
- d'autres indications diverses (pollution).

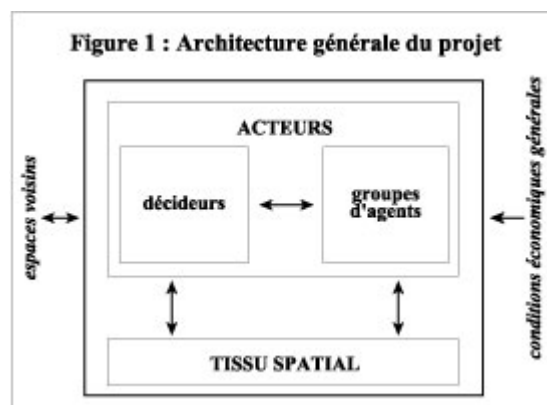
- un environnement informatique convivial, qui comporte :

- un menu permettant de choisir les options prévues,
- une fenêtre dans laquelle sont affichées les informations non spatialisées soit sur le système urbain, soit sur le comportement des acteurs, soit sur des indicateurs économiques, environnementaux, etc.

- la possibilité d'introduire des variables externes.

La représentation cartographique de l'espace sera limitée à la zone dans laquelle on désire étudier l'impact d'une mesure d'aménagement. Cependant la simulation tiendra également compte :– de l'influence des espaces avoisinants, en particulier de l'intérêt que représente pour eux l'aménagement de la zone en question (implantation d'une plate-forme logistique, d'un supermarché...),

– de la situation démographique et socio-économique générale (l'implantation d'entreprises dans une zone industrielle sera moins probable en période de crise économique).



Le modèle s'articulera autour de deux pôles, d'une part une représentation cartographique de l'espace qui se transforme en fonction des décisions prises par les acteurs, et d'autre part une modélisation de la stratégie des acteurs qui évolue aussi en liaison avec les modifications de leur espace vécu (cf. figure 1).

II.3 Les différents outils de modélisation disponibles, adaptés à notre objectif

Nous avons évalué l'apport de différents outils de modélisation par rapport à notre projet (cf. figure 2).

Figure 2 : Caractéristiques de différents outils de modélisation

CARACTERISTIQUES		Type d'outils							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Prise en compte de l'espace	prise en compte de la morphologie de l'espace	×	×	×			×		×
	appréhension du fonctionnement de l'espace dans le temps	×	×			×	×		
	notion d'auto-organisation, d'ordre loin de l'équilibre et modélisation des bifurcations ("pattern formation")	×	×	×					
Modélisation du comportement des agents	modélisation des comportements d'agents qui ont une mémoire, agissent et communiquent entre eux	×		×		×		○	
	modélisation des stratégies d'optimisation		1					×	
	modélisation du processus de formation d'opinion	2		○				○	
Articulation entre échelles	articulation entre différentes échelles spatiales	×	○				×		×
	articulation entre différentes échelles temporelles	×		×		×			
formalisation	approche déterministe (règles)	×	×	×	×	×	×	×	
	approche probabiliste	×	×	×			×	×	
	logique floue		○		×			○	
convivialité, souplesse d'utilisation	mélange d'informations de nature différente (qualitatives et quantitatives)				×	×		×	×
	organisation de la connaissance sur un domaine précis et mise à disposition de celle-ci pour un utilisateur non-initié				×				×
	représentation graphique de l'espace étudié et de ses transformations		×	×					×
	performance des traitements statistiques et graphiques								×

Source : Mémoire de DEA de C. Taminier, Ecole doctorale Structures et dynamiques spatiales, Avignon, juin 1995.

- | | |
|--|--|
| A : modèles de structures dissipatives, synergétique | E : modèles issus de la dynamique de systèmes |
| B : automates cellulaires | F : analyses fractales |
| C : systèmes multi-agents | G : algorithmes d'évolution |
| D : systèmes à base de connaissances, systèmes experts | H : systèmes d'information géographique |
| × | 1 : uniquement dans l'optique de la théorie des jeux |
| ○ | 2 : seulement dans le cas de modèles particuliers |

La figure 2 indique, pour chaque type de modèles, les propriétés et les fonctionnalités principales qu'ils sont susceptibles de présenter. Les utilisations envisageables des différents outils correspondent en réalité aux potentialités qu'il serait intéressant de développer dans le cadre de notre problématique.

TROISIÈME PARTIE

Formalisation du modèle

La présentation des différents outils de modélisation disponibles, adaptés à notre problématique, nous a permis de choisir quels outils de formalisation seront utilisés et de concevoir le modèle. Nous prévoyons de modéliser le tissu spatial grâce à un automate cellulaire, cependant, contrairement aux concepts classiques, nous concevons la dynamique du modèle de la façon suivante :

- les règles dynamiques ne sont pas uniquement basées sur l'interaction entre les cellules ;
- on introduit des modules qui prennent en compte l'interaction entre l'espace et les stratégies des acteurs socio-économiques (cf. figure 3) ;
- toutes ces interactions se manifestent à des échelles spatiales et temporelles différentes et créent ainsi des phénomènes d'auto-organisation qui changent les règles au cours du fonctionnement du modèle ;
- les règles dynamiques sont basées en partie sur la logique floue et en partie sur les stratégies d'optimisation.

Sur une base commune de modélisation de la dynamique spatiale, nous comptons asseoir le modélisation de deux processus socio-économiques :

- la modélisation du comportement des agents dans la phase d'élaboration du projet,
- la modélisation des comportements et des évolutions qui en résultent dans la phase postérieure à la réalisation du projet.

Nous les présentons ici dans cet ordre, qui est chronologique. Cependant, compte-tenu de la difficulté de chaque approche, et de son intérêt pratique, nous commencerons le travail de recherche par le second aspect, celui des évolutions postérieures au projet. Ce n'est qu'après avoir dominé cette question que nous aborderons celle plus délicate de la modélisation de la phase d'élaboration.

III.1 Modélisation de la dynamique spatiale

Dans les modèles traditionnels, l'espace n'apparaît que de façon indirecte sous forme de fonctions d'interaction décroissantes au fur et à mesure que la distance s'accroît.

Contrairement à ces approches, nous proposons de choisir une méthode de formalisation basée sur une représentation cartographique numérisée (raster) de l'espace modélisé qui permet de visualiser les transformations progressives de l'espace considéré. Un tel objectif s'inscrit, au niveau conceptuel, dans la logique de *formation d'un tissu spatial* ("pattern formation"). En outre il paraît important de tenir compte des résultats obtenus par les analyses fractales qui ont mis en évidence certains caractéristiques particulières de la morphogenèse urbaine.

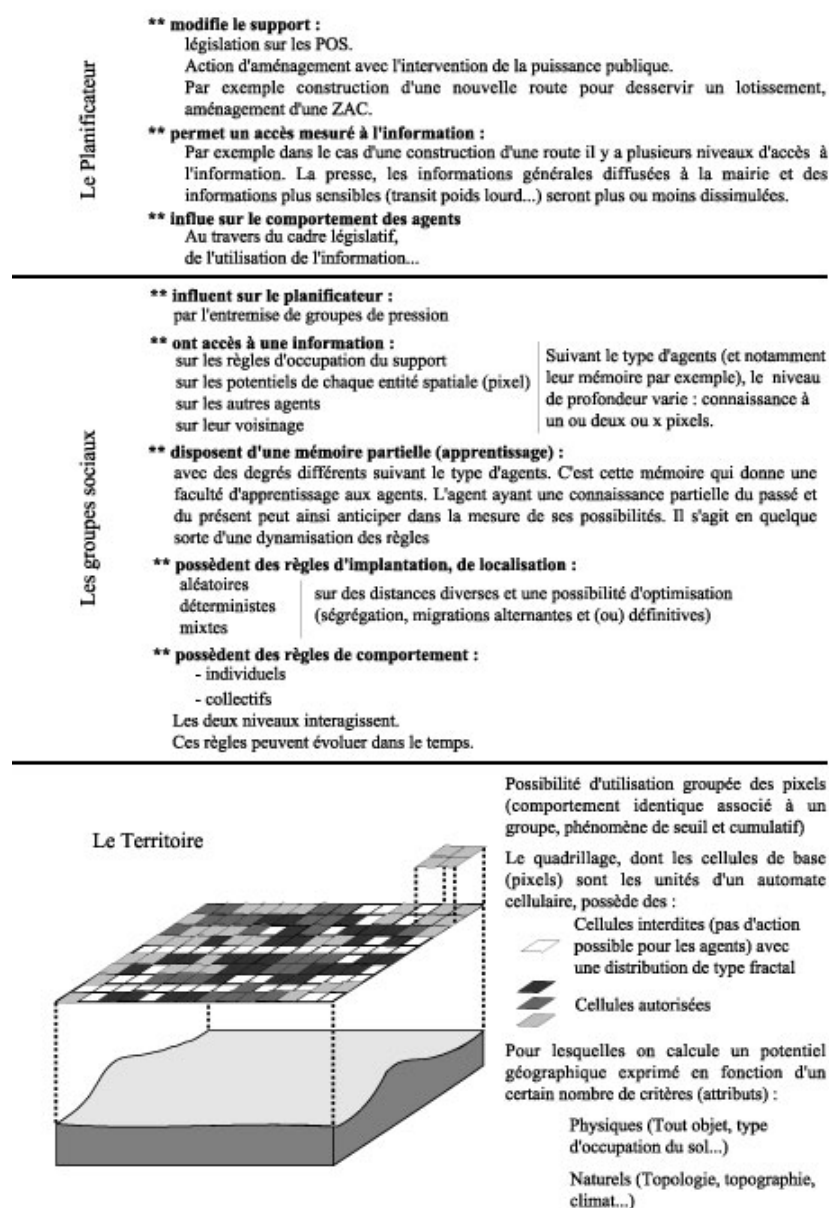
L'outil qui paraît le mieux adapté à une telle description de la dynamique spatiale est *l'automate cellulaire*, déjà utilisé dans plusieurs disciplines avec succès. M. Phipps (1989) a proposé une application des automates cellulaires en géographie notamment, Récemment

R. White et G. Engelen (1993 et 1994), ainsi que M. Batty et Y. Xie (1994), s'en sont servis pour modéliser la dynamique urbaine.

• *La représentation de l'espace*

Il est prévu d'implanter directement une représentation cartographique numérisée de l'espace. Les unités spatiales sont perçues comme des unités fonctionnelles (zone résidentielle, zone industrielle, route, etc.). *Chacune de ces unités est perçue comme un objet propre.* Cet objet est formé d'un ensemble de cellules (pixels) de taille fixe, définie par la résolution cartographique, présentant le même état à un instant donné, à savoir celui de l'objet¹. (cf. figure 3).

Figure 3 : Le modèle Pökelmann : ses principaux acteurs et leurs attributs



¹Par exemple en utilisant une représentation au 1:50~000 et une résolution de 75 dpi, un pixel représenterait un carré dont la longueur serait environ 17 m.

En outre, une unité fonctionnelle peut être subdivisée en fonction de nouveaux critères, qui apparaissent par exemple à l'occasion d'un projet d'aménagement. En effet, dans un même quartier, les riverains potentiels du trajet prévu pour une route percevront ce projet différemment des agents, dont la résidence est plus éloignée. Or la notion de proximité est parfois difficile à délimiter précisément.

Nous proposons donc de modéliser la notion de proximité en utilisant un gradient spatial défini en fonction d'attributs qualitatifs tels que : très concerné, moins concerné, etc. Ils seront formalisés au moyen de la logique floue (Zadeh 1992).

• *Les vecteurs d'attributs*

Afin de caractériser les différentes unités fonctionnelles, il est prévu d'introduire des *vecteurs d'attributs* formés de composants, qui incluent chacun une information sur l'espace en question. Un vecteur est propre à l'ensemble des pixels qui constituent un objet¹.

Certains composants seront caractérisés par des *attributs flous*, notamment ceux qui décrivent la *perception de l'espace par les agents*, par exemple la qualité du site (site agréable) ou l'accessibilité (bonne ou mauvaise). L'accessibilité pourrait par exemple être mesurée par le temps nécessaire pour effectuer certains déplacements. D'autres attributs seront chiffrés (prix du terrain).

Le type d'information donné par les attributs peut varier selon le type d'utilisation de sol : pour une zone industrielle la qualité paysagère est moins importante que pour une zone résidentielle.

• *La notion de distance*

Dans les automates cellulaires traditionnels l'interaction spatiale, qui gouverne la dynamique du système, se borne au voisinage immédiat. Les approches récentes comme celles de R. White et G. Engelen (1993, 1994) introduisent des fonctions d'interaction entre cellules éloignées. Une approche semblable, basée sur la logique *multi-agent* a également permis de modéliser des interactions de portées et de formes différentes.

Mais ces règles sont parfois trop précises par rapport à la réalité des agents², qui perçoivent les distances plutôt *de façon floue* et estiment une route être "trop proche" ou "trop loin" ou "dans un mauvais état"³.

Nous proposons donc de formaliser la notion de distance en utilisant aussi des attributs flous.

• *Les transformations de la morphologie spatiale*

Dans les automates cellulaires, les fonctions d'interaction spatiale servent à définir des règles de transformation des attributs de certaines cellules. Le modèle cellulaire se borne alors à une *vision descriptive* de la dynamique spatiale ; les règles d'interaction ne

¹ Ceci montre l'avantage de cette formalisation : il n'est pas nécessaire de doter chaque pixel de toutes les informations, il suffit d'établir un lien entre l'objet spatial et le vecteur d'attribut ce qui allège considérablement la gestion des données.

² Ceci rend une calibration des fonctions d'interaction spatiales difficile

³ L'introduction d'un bruit, proposé par certains auteurs ne paraît pas adapté, puisqu'il ne s'agit pas d'un phénomène statistique, ou d'une information incomplète, mais d'un phénomène de perception.

considèrent que *de façon globale* le comportement des agents sociaux, par exemple en supposant un effet répulsif entre une zone industrielle et une zone résidentielle si celles-ci sont proches, ou bien un impact positif si la distance entre les zones dépasse une certaine limite.

Contrairement à cette vision, nous projetons d'utiliser l'automate cellulaire uniquement comme un support spatial et de modéliser l'évolution de l'espace en simulant le comportement de différents types d'acteurs. La dynamique spatiale apparaîtra alors comme la conséquence des décisions prises par les acteurs.

Le comportement des agents est susceptible de varier au cours du temps. Ceci peut être une conséquence directe des transformations de l'espace en question, ou le résultat d'expériences acquises au cours du processus de formation d'opinion (voir plus loin). Nous supposons donc que les règles dynamiques du système peuvent changer au cours du temps, contrairement à la logique traditionnelle des automates cellulaires.

Il est prévu de visualiser sur écran les impacts spatiaux de ces décisions et donc de visualiser la transformation graduelle de l'espace.

Il est admis que certains types de règles d'interaction spatiale génèrent, dans les automates cellulaires, des tissus de morphologie fractale¹. Comme nous l'avons montré, la morphologie des tissus urbains et leur évolution peuvent être caractérisées par leur comportement fractal. Afin d'obtenir des résultats qui sont en concordance avec ces observations il est prévu :

- d'analyser les tissus simulés selon ces critères ;
- d'étudier quels types d'interactions entre acteurs se traduisent par des règles dynamiques qui génèrent des tissus dont la morphologie correspond à celle des villes réelles.

III.2 Modélisation du comportement des agents

Afin d'expliquer les principes que nous avons adoptés pour formaliser le comportement des acteurs (cf. figure 4), nous allons reprendre à titre d'exemple certaines étapes du processus d'urbanisation tel que nous l'avons décrit plus haut. Nous commençons par la première phase du modèle qui simule la réaction des acteurs par rapport à la proposition d'un projet d'aménagement.

III.2.1 Modélisation du comportement des agents dans la phase d'élaboration du projet

• Critères de regroupement des agents

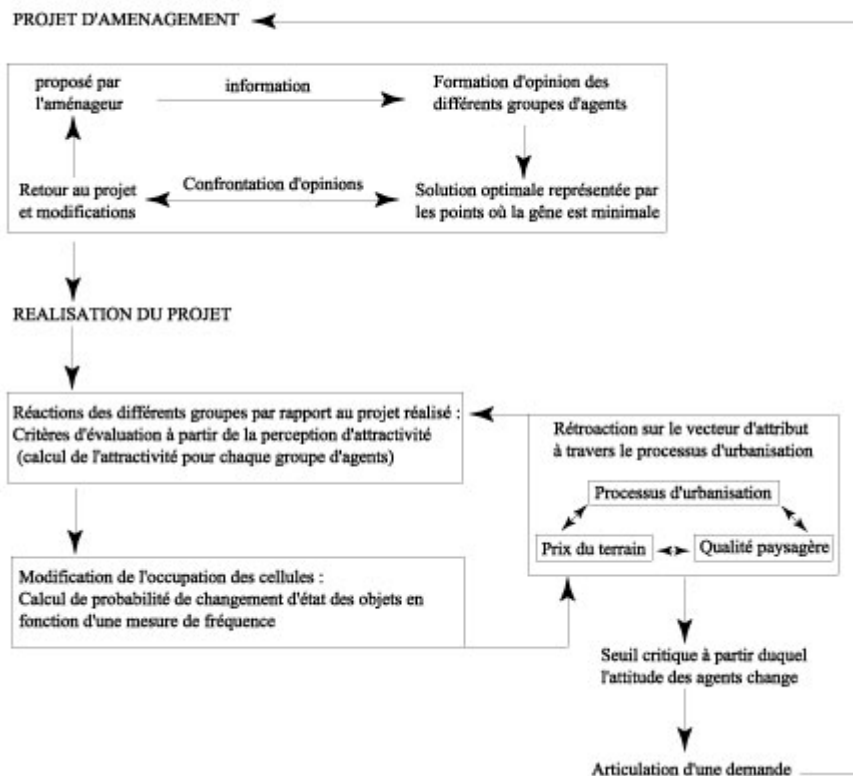
Les agents seront regroupés en fonction de critères spatiaux et socio-économiques.

Un critère spatial possible pourrait être le degré avec lequel les agents sont concernés par le projet d'aménagement en question, autrement dit d'après une notion de proximité éventuellement floue comme définie ci-avant.

¹ R.White et G.Engelen ainsi que Batty ont recouru à cette observation lors de la conception de leur modèle.

Un critère socio-économique pourrait être l'appartenance à une classe sociale, à un groupe d'acteurs économiques (entrepreneurs...) ou à un groupe de pression politique.

Figure 4 : Réaction et rétroaction des agents par rapport à un projet d'aménagement



• La formation d'opinion

Un projet d'aménagement est jugé par les acteurs selon :

- leurs propres aspirations,
- leurs expériences antérieures (mémoire),
- les informations disponibles sur le projet.

Sur la base de ces trois facteurs, l'acteur va concrétiser ses besoins par rapport au projet en question. Nous donnons quelques exemples d'arguments qu'un résident pourrait évoquer lors d'un projet d'aménagement d'une nouvelle route :

- je ne voudrais pas être dérangé par le bruit d'une route proche de mon appartement ; en revanche, je désire une amélioration de la desserte routière de mon quartier puisque la voie actuelle est mal tracée, étroite et en mauvais état.
- la nouvelle route va améliorer l'accessibilité de la zone d'activité plus loin, ce qui risque d'augmenter la circulation ; cependant j'aimerais bien profiter de l'installation d'un supermarché dans cette zone.

Nous constatons d'abord que les attributs utilisés ("proche", "améliorer", etc.) ne sont en général pas *des critères quantitatifs précis*.

Afin d'introduire les attributs qualitatifs nous proposons une formalisation au moyen de la logique floue.

En outre, les raisonnements de l'acteur montrent des "ambiguïtés", ce qui l'oblige à réfléchir sur l'importance attribuée aux différents arguments afin de trouver une attitude qui lui semble la plus avantageuse et donc la mieux acceptable.

Une telle procédure d'évaluation peut être considérée comme un problème d'optimisation multicritère : pour chaque objectif (accessibilité, nuisance, etc.), on introduit une fonction d'objectifs (ou fonction économique) basée sur des attributs éventuellement flous (bonne accessibilité si la route est proche).

Il existe une multitude de méthodes qui permettent de résoudre des problèmes d'optimisation. Nous présentons une approche particulière, *les algorithmes d'évolution*, dont certains aspects paraissent également intéressants au niveau conceptuel.

Ces algorithmes explorent l'espace multidimensionnel de la fonction d'objectifs par étapes et s'approchent graduellement des solutions optimales. A chacune de ces étapes, on obtient une information sur les valeurs de la fonction économique multidimensionnelle à un certain nombre d'endroits de l'espace. Parmi ces solutions, seules quelques unes sont sélectionnées pour constituer le point de départ de la prochaine étape, les autres sont rejetées.

Cette méthode a été utilisée avec beaucoup de succès lors de problèmes d'optimisation de paramètres. Cependant, certains auteurs ont récemment proposé d'interpréter cet algorithme comme *séquence de processus de décision*. Dans ce cas, on interprète l'ensemble des points considérés à chaque étape comme les scénarios retenus par l'agent qui, au cours de sa réflexion, s'approche graduellement des solutions optimales (Fonseca, Fleming 1995).

Afin de modéliser les processus de formation d'opinion, les algorithmes d'évolution semblent donc une approche intéressante, non seulement comme technique d'optimisation, mais aussi également comme réflexion conceptuelle sur les processus de décision.

La construction de la fonction multicritère des objectifs a aussi retenu notre attention. Il existe plusieurs façons de concevoir une telle fonction :

- soit en définissant *a priori* les poids de chacun des différents objectifs. Dans ce cas, il s'agit de trouver les solutions qui répondent au mieux aux différents besoins : une route paraît désirable, à condition qu'elle se situe à une certaine distance d'un lieu d'habitation. En fait, cette méthode permet de retenir les solutions qui correspondent aux valeurs minimales (ou maximales) de la fonction d'objectif multicritère.
- soit d'introduire la notion d'*optimum de Pareto*. Ce principe sous-tend que le choix d'une situation plus avantageuse par rapport à des objectifs se fait toujours au détriment d'autres objectifs (si le dessert est bonne, la circulation augmentera). L'utilisation d'algorithmes évolutionnistes permet de trouver dans ce cas l'ensemble des solutions possibles qui répondent au critère de l'optimum de Pareto *sans qu'il soit nécessaire* de définir *a priori* les poids préférentiels.

Les solutions optimales déterminent le *degré d'acceptation* du projet : plus ces solutions sont éloignées des attributs du projet d'aménagement, plus l'opposition sera forte. *Il paraît donc important de définir une mesure qui intègre à la fois le désir représenté par la solution optimale et les conséquences du projet, telles qu'elles sont perçues par l'acteur.*¹ Ce *degré d'acceptation* pourrait être caractérisé par une *valeur floue* se situant entre l'acceptation totale et le refus total.

• *L'interaction entre les acteurs*

Nous supposons qu'à un certain moment les groupes d'acteurs rendent publique leur opinion. Ainsi, pour chaque groupe d'acteurs, les résultats du processus d'évaluation devrait être mis à disposition du décideur, c'est-à-dire de l'utilisateur du logiciel de simulation.

Il peut arriver que la proclamation d'une opinion par un groupe d'acteurs soit accompagnée de *revendications* si la solution optimale qu'il préconise est plus ou moins incompatible avec le projet proposé (par exemple demande d'un projet alternatif, demande de mesures d'accompagnement). Ceci montre l'intérêt d'introduire une *mesure* pour décrire le degré d'acceptation qui définisse la disposition d'un groupe d'agents de passer à l'action. On peut imaginer d'implanter selon des *règles floues* certains types de revendications en fonction du projet et du degré d'acceptation de celui-ci.

Dans cette optique, la construction d'une fonction multicritère, basée sur un optimum parétien, paraît intéressante. Elle pourrait servir à déterminer au moment où les opinions des acteurs sont rendues publiques l'ensemble des solutions parétiennes, c'est-à-dire des solutions qui répondent au mieux aux besoins de l'ensemble des acteurs. A cet égard, on constituerait une fonction des objectifs qui regroupe l'attitude des différents types d'acteurs. Ainsi le décideur disposerait d'une information globale sur le degré d'acceptation du projet.

En fonction de ces informations nous rappelons que l'utilisateur pourrait intervenir dans le processus de formation d'opinion en :

- 1– proposant des mesures d'accompagnement,
- 2– modifiant le projet ou proposant d'autres alternatives,
- 3– décidant la réalisation immédiate du projet,
- 4– renonçant au projet.

Cependant il serait aussi possible que le décideur attende de voir la façon dont évolue la formation d'opinion suite à l'échange d'informations entre les différents groupes d'acteurs. Une telle possibilité sera également prévue.

*Les options 1 et 2 relancent un processus de formation d'opinion.*² Cependant chaque échange d'informations peut influencer les jugements des agents puisqu'ils parviennent,

¹ Cette perception dépend de l'information actuelle et éventuellement d'expériences préalables.

² On peut prévoir dès début de proposer plusieurs alternatives. Ceci nécessite de distinguer les opinions selon la variante.

d'une part à recueillir de nouvelles informations sur le projet même, et d'autre part à accumuler des connaissances sur les opinions des autres groupes. Ceci peut provoquer :

- une modification des opinions dans un groupe (par exemple une meilleure acceptation du projet),
- un changement de l'effectif des groupes. On peut imaginer une plus grande solidarité d'intérêts des habitants de la zone concernée.

Suite aux informations obtenues, le *jugement* des groupes d'acteurs sur certains aspect du projet d'aménagement changera éventuellement : la proximité de la route paraît peut-être moins nuisible ou, au contraire, plus contraignante qu'avant.

Il ne s'agit donc pas d'un changement des aspirations des acteurs, mais du poids qu'ils attribuent à différents arguments. Il s'agit ainsi d'un *phénomène d'apprentissage* qui est susceptible de modifier le processus d'évaluation lors d'une nouvelle boucle de formation d'opinion. En effet, cette rétroaction signifie pour la modélisation une modification des fonctions d'objectifs : une solution peut apparaître plus ou moins optimale qu'avant. L'interaction entre les acteurs influence donc le comportement dynamique du système, ce qui doit être considéré comme un *processus d'auto-organisation*.

Nous rappelons que les objectifs sont définis selon des attributs flous. *Le processus d'auto-organisation peut se manifester par un rapprochement des opinions voisines, ou bien un éloignement d'opinions proches au départ en fonction des informations obtenues par les différents acteurs¹. Les propositions de l'aménageur peuvent ainsi provoquer des bifurcations dans le système.*

Si les fonctions d'objectifs peuvent être influencées par l'échange d'informations, il est également envisageable que le processus de la formation d'opinion, c'est-à-dire la façon dont l'acteur s'approche, par sa réflexion, des solutions optimales, change. *L'analogie entre les algorithmes d'évolution et les processus de décision discutés plus haut incite à étudier dans quelle mesure cette approche permet d'intégrer les aspects stratégiques de la formation d'opinion dans le processus d'optimisation.*

Pour les processus d'auto-organisation, l'échelle temporelle joue un rôle prééminent : quand certains groupes réagissent plus vite que d'autres, le comportement du système peut être différent que lorsque tous les groupes agissent en même temps. De même, le moment où l'aménageur décide d'intervenir peut s'avérer crucial dans la formation d'opinion.

Il est donc important d'introduire une échelle temporelle.

Jusqu'ici nous avons considéré les groupes d'acteurs comme homogènes dans leur comportement. Or ceci n'est pas nécessairement le cas. En particulier, quand il existe plusieurs solutions pratiquement équivalentes au niveau de leur optimum, il semble utile d'introduire des probabilités qui caractérisent le poids statistique de ces solutions. Cette approche paraît d'autant plus importante qu'il est éventuellement possible de mesurer la fréquence de certaines opinions par des sondages. *Ceci peut représenter une base de données qui servira à calibrer le modèle.*

¹Ceci peut être introduit par des possibilités conditionnelles

Cette approche implique d'introduire également des probabilités pour évaluer les niveaux d'acceptation de chaque groupe d'acteurs¹.

III.2.2 Modélisation du comportement des agents et des évolutions qui en résultent dans la phase postérieure à la réalisation du projet

Dès qu'une décision est prise, l'utilisateur a la possibilité de simuler l'évolution à moyen terme. Le comportement des acteurs est d'abord *réactif*, basé sur un fait accompli. Il ne s'agit donc pas d'un processus de formation d'opinion et sa formalisation en est de ce fait différente. Puis la transformation progressive de l'espace provoque un comportement *rétroactif* des agents.

- *Une mesure d'attractivité*

Pendant la période succédant à la réalisation du projet, la dynamique spatiale se manifeste surtout par une compétition entre plusieurs unités spatiales. L'information disponible sur ces unités est codée dans les *vecteurs d'attributs* de chaque zone que nous avons introduit plus haut. Dans leur ensemble, ces attributs peuvent servir à caractériser l'*attractivité* des unités pour les différents groupes d'acteurs. Ainsi, pour un individu qui cherche un terrain à bâtir, l'attractivité d'une zone est le résultat d'une comparaison entre les attributs, qui sont eux-mêmes pondérés par l'importance que l'acteur leur attribue. *Cette pondération peut être floue*. Ainsi un acteur pourrait dire : « le fait que le paysage soit *beau* (attribut flou), me paraît *important* (évaluation floue) », ou : « le prix du terrain me paraît très élevé ».

Nous proposons de définir à partir de ces attributs pondérés une *mesure d'attractivité* en utilisant la formalisation de la logique floue².

- *Le processus d'urbanisation à moyen terme*

L'attractivité des zones pour les différents types de demandeurs servira de base pour définir *une probabilité d'occupation du sol*. L'occupation du sol est donc appréhendée comme une séquence stochastique d'événements³.

Les processus de décision apparaissent dans cette phase d'évolution moins nets que pendant la formation d'opinion. Ceci reflète le fait que la dynamique du système n'est pas le résultat d'une confrontation d'idées, mais basée sur la perception d'attributs spatiaux et de facteurs économiques.

- *La rétroaction du processus d'urbanisation sur le vecteur d'attributs*

Le processus d'urbanisation peut modifier les composantes du vecteur d'attributs des diverses unités fonctionnelles :

¹Nous précisons qu'il s'agit donc d'une description probabiliste d'états flous. Ces deux logiques ne doivent pas être confondues.

² Cette attractivité peut être interprétée comme un *potentiel*

³ Nous rappelons que la description de l'espace est réalisée à l'échelle des quartiers qui sont perçus comme objets homogènes. L'impact spatial de ces décisions est donc considérée à cette échelle. Ainsi on indiquera pour une zone plutôt le degré d'occupation du sol. Il ne semble en effet pas réaliste de les décisions au niveau parcellaires.

- soit par les décisions d'aménagement,
- soit par le comportement des différents groupes d'agents.

Ainsi une forte activité de construction ou la nuisance sonore provoquées par le nouvel axe routier, dont la construction était le résultat de la décision prise lors de la phase précédente de la simulation, peuvent dévaloriser l'image de marque d'un quartier.

Cette rétroaction du processus d'occupation du sol sur les attributs spatiaux représente un phénomène important dans la conception du modèle. En effet, grâce à cette méthode, le système peut contrôler lui-même au cours du processus d'urbanisation le degré d'occupation du sol, le changement du paysage, etc., et modifier, en fonction de ces transformations de l'espace, les attributs spatiaux des unités fonctionnelles concernées.

• *La rétroaction des modifications du vecteur d'attributs sur le comportement des agents*

Il est possible que ces modifications affectent la qualité de vie dans le quartier telle qu'elle est perçue par les différents groupes d'acteurs :

- une dégradation de l'image de marque peut provoquer une baisse de la demande ;
- du côté de l'offre, une telle baisse peut être la cause d'une chute des prix de terrain ;
- la baisse des prix peut relancer une demande, dont le caractère est cependant différent : par exemple on pourrait observer l'apparition de logements locatifs bas de gamme.

Ces exemples mettent en lumière le rôle que jouent d'autres groupes d'acteurs dans la boucle rétroactive. Ceci concerne en particulier la population résidentielle : celle-ci dispose d'une partie de l'information contenue dans le vecteur d'attributs. Cette information évolue et la population en subit les conséquences, qui affectent éventuellement la qualité de vie dans le quartier. D'autres groupes d'agents vont également réagir, par exemple le groupe des propriétaires de terrain : leur comportement sera considéré en fonction de la demande¹.

Leur comportement de terrain peut être modélisé selon une approche économique traditionnelle, basée sur la notion d'offre et de demande. En revanche, le comportement de la population résidentielle est différent. Il s'agit ici non plus d'une décision investigatrice, comme dans le cas des demandeurs de terrain, mais d'un *processus de formation d'opinion*. Une telle situation rappelle celle observée lors de la proposition du projet d'aménagement.

Il semble donc exister des seuils limites d'acceptation de certains attributs, liés à la perception de l'espace et au fonctionnement du système urbain. Ces seuils seront introduits dans le modèle. Le franchissement, au cours de la simulation, induira une modification du comportement des résidents. Celui-ci sera formalisé de façon comparable au processus de formation d'opinion à l'exception des conditions initiales (espace considéré et comportement des agents) qui seront modifiées.

¹ Il ne sera pas supposé qu'il existe un équilibre entre offre et demande.

L'impact des décisions d'aménagement peut se manifester sous différentes formes. Par exemple, s'il y a une dégradation de l'image de marque du quartier, la population résidentielle se considère comme victime d'une évolution qu'elle n'a pas désirée et qui lui a été imposée par des forces extérieures. Il peut également apparaître de nouvelles demandes sociales : création d'équipements publics (écoles, terrains de sport...), solutionnement des problèmes de saturation des réseaux de transport, etc.

L'utilisateur du logiciel sera informé d'une telle demande et aura la possibilité de réagir en proposant de nouvelles mesures. Ceci aboutira à une nouvelle boucle de simulation.

III.3 La réalisation du projet

La complexité du modèle exige une *réalisation par étapes*. C'est pourquoi son implantation sera effectuée selon une logique modulaire, ce qui permettra d'ajouter progressivement les différentes parties qui le composent, afin d'en étudier avec précision le comportement. Pour valider le modèle, nous l'appliquerons à un exemple réel.

III.3.1 Premières réalisations et test sur un cas pertinent

Les travaux effectués jusqu'ici portent sur la conception même du modèle, telle qu'il a été présenté ci-avant. Un automate cellulaire a été implanté de façon assez ouverte, ce qui offre la possibilité d'étudier différents types d'interaction spatiales et d'implanter des modules simulant le comportement des agents.

Pour réaliser et tester le modèle, nous avons choisi d'étudier dans un premier temps un espace assez limité. Il s'agit d'analyser l'impact, en terme de dynamique urbaine, de la construction de l'autoroute A 39, actuellement en construction entre Dole et Bourg-en-Bresse. Nous nous attacherons plus particulièrement à l'agglomération de Lons-le-Saunier, chef-lieu du département du Jura.

L'intérêt principal de ce secteur réside dans le fait que l'agglomération n'est actuellement située à proximité d'aucune infrastructure autoroutière. Ceci constitue un avantage indéniable pour étudier les effets qui en découleront, d'autant plus que nous devons distinguer l'évolution qui résulte de la tendance générale des villes moyennes françaises de celle qui est spécifiquement due à la nouvelle autoroute.

Pour effectuer les simulations, nous avons retenu un nombre restreint de types d'occupation du sol :

- les espaces à vocation logistique (diffuseurs, entrepôts...),
- les zones résidentielles,
- les espaces voués aux entreprises (ZAE, zones industrielles, zones artisanales...),
- les espaces libres,
- les espaces non disponibles en raison de contraintes naturelles (relief, hydrographie), d'une vocation particulière (réserve naturelle) ou d'un type d'exploitation agricole (viticulture).

Les réflexions sur le comportement des acteurs ont surtout porté sur l'impact à moyen terme du diffuseur le plus proche de Lons-le-Saunier, Beaurepaire-en-Bresse. En effet, une autoroute a un impact sur le milieu socio-économique essentiellement par l'intermédiaire des diffuseurs. Dans cette optique, une étude comparative est en cours sur les motifs d'implantation d'entreprises dans plusieurs zones d'activité de Besançon. Elle est basée sur des enquêtes auprès de différents acteurs concernés (chambres de commerce, mairies, entreprises concernées).

III.3.2 Deuxième étape : étude approfondie des facteurs socio-économiques

L'élaboration de notre modèle nécessite une connaissance approfondie des facteurs qui influent sur la morphogenèse et le fonctionnement urbains. Pour cela, nous envisageons d'analyser :

- les phénomènes déjà existants, mais non encore décrits et expliqués suffisamment (interaction urbanisme-infrastructure-population) : développer des études de simulation puis des modèles en intégrant des dimensions spatiales ;
- les phénomènes connexes (environnement) : intégrer des modèles de simulation développés dans le cadre d'autres études CEE, à savoir notamment les modèles traitant de la pollution atmosphérique, du bruit...

Nous nous appuyerons sur des études déjà réalisées en ce domaine, ainsi que sur des enquêtes complémentaires à mener.

Les informations démo-économiques recueillies seront ensuite analysées selon des méthodes statistiques. Elles serviront de base à l'interprétation des processus socio-économiques en jeu, et en particulier à l'étude du comportement des différents types d'agents sociaux. Nous nous attacherons à :

- obtenir une meilleure compréhension de nos observations,
- identifier les impacts directs et indirects d'une opération d'aménagement et rechercher les différents paramètres intervenants,
- évaluer l'interpénétration des phénomènes.

Ceci permettra d'aboutir à une formalisation des interactions sociales, économiques et spatiales qui entrent directement dans la conception de notre modèle de simulation.

En outre, des analyses sur la morphogenèse urbaine seront réalisées, en intégrant de nouveaux outils d'analyse spatiale ce qui permettra de mieux comprendre la morphogenèse urbaine et de calibrer certains paramètres du modèle. Des mesures fractales pourront par exemple servir à comparer la morphologie des tissus simulés à celle des tissus réels.

III.3.3 Application du modèle à un espace opérationnel, l'Est de l'agglomération lyonnaise

Dès que le Rhône a pu être franchi par un ouvrage, Lyon s'est développée vers l'Est où s'étend une vaste plaine. Ces dernières décennies, ce secteur a connu une consommation de l'espace conséquente avec notamment l'implantation ou la délocalisation de grands

équipements (aéroport, Eurexpo, gare TGV...), la construction de plusieurs infrastructures (autoroutes, nouvelle gare TGV), l'installation des grands ensembles d'habitat, d'une ville nouvelle et de grandes zones d'activités.

Dans les prochaines années, ce territoire sera concerné par deux nouveaux barreaux autoroutiers nationaux Nord-Sud, par la nouvelle ligne TGV Lyon-Turin (Est-Ouest). Une étude est également en cours sur l'installation d'une nouvelle ligne ferrée de marchandises Nord-Sud avec création de plates-formes logistiques.

Ces nouvelles infrastructures, essentiellement routières, vont entraîner de fortes pressions de la part des acteurs, notamment économiques et politiques, pour offrir des terrains à l'urbanisation, au-delà certainement des besoins réels. Un mitage excessif et un gaspillage de l'espace sont à craindre, ainsi que des pertes financières pour les différents acteurs, dont la Collectivité.

Dans ce contexte géographique, institutionnel et économique, il apparaît souhaitable de réaliser des scénarios d'évolution des secteurs concernés, afin d'aider les élus dans leurs décisions. Ces scénarios prendraient en compte les aspirations et contraintes des différents acteurs, et tenteraient d'apporter une meilleure réponse quant à la consommation de l'espace et sa gestion, en particulier grâce au réinvestissement des espaces urbanisés délaissés et par un meilleur choix de localisation des terrains à urbaniser.

Notre projet s'inscrit parfaitement dans une telle problématique. En effet, l'application du modèle de simulation de l'impact d'un projet d'aménagement sur la dynamique urbaine, présenté précédemment, serait très intéressante pour deux raisons principales. La première est que ces travaux permettront de clarifier le concept de la "ville vivable de demain". La deuxième est que nous pourrions ainsi modéliser les problèmes spécifiques d'une grande métropole et modéliser des projets d'aménagement "grandeur nature".

En outre, sur le plan national, l'agglomération lyonnaise est à la pointe de la réflexion sur l'aménagement du territoire. La présence du CERTU à Lyon, ainsi que ses relations avec les collectivités locales et les organismes de planification, nous renforce dans le choix de l'Est de l'agglomération lyonnaise comme champ d'application de notre modèle.

Remerciements

Les auteurs remercient André Larceneux, Maryvonne Le Berre et Daniel Mathieu pour maintes discussions fertiles, ainsi que Ulrich Hammel, Pascal Gillon, Alexandre Moine et Cécile Tannier pour la participation à ce projet et pour leur engagement lors de l'élaboration du présent texte.

Les déplacements nécessaires pour la coordination des travaux réalisés à Dortmund et à Besançon ont été financés par le programme PROCOPE.

Bibliographie

- J. FRIEDRICHS. *Stadtanalyse*, 3^e éd.. Westdeutscher Verlag, 1983.
- PROGNOS Qualitativer und quantitativer Wohnungsbedarf in der Freien und Hansestadt Hamburg. *Rapport*, 1975/1976.
- B.J.L. BERRY. The counter-urbanization process: Urban america since 1970. In B.J.L. Berry, editor, *Urbanization and Counter-Urbanization*. Sage Urban Affairs Annual Reviews 11, 1976.
- H. HOYT. Recent distortions of the classical models of urban structure. *Land Economics*, 40, 1964.
- P. HALL. Gibt es sie noch, die Stadt? In T. Schabert, ed., *Die Welt der Stadt*. Piper, 1991.
- P. FRANKHAUSER. *La fractalité des structures urbaines*. Anthropos, 1994.
- N. FRANÇOIS, P. FRANKHAUSER, D. PUMAIN. Villes, densité et fractalité. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, 67(6), 1995.
- M. PHIPPS, *Dynamical behaviour of cellular automata under the constraint of neighborhood coherence*, in "Geographical Analysis", vol. 21, n°3 (july 1989), ed. Ohio State University Press.
- R. WHITE, G. ENGELEN. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land use patterns. *Environment and Planning A*, 25, 1993.
- R. WHITE, G. ENGELEN. Cellular dynamics and GIS modelling spatial complexity. *Geographical Systems*, 1, 1994.
- M. BATTY et Y. XIE, *From cells to cities*, a paper written for the Special Issue of "Environnement and Planning B" in honor of the Founding Editor, Lionel March, september, 1994.
- S. BURA, F. GUERIN-PACE, H. MATHIAN, D. PUMAIN, L. SANDERS, Multi-agents systems and the simulation of a settlement system, *Geographical Analysis* (à paraître).
- C.M. FONSECA, P.J. FLEMING .An overview of evolutionary algorithms in multi-objective optimization *Evolutionary Computation*, 3(1), 1995.
- L.A. ZADEH. *The Calculus of Fuzzy IF-THEN Rules*. Number 3. 1992.