

XXXII^{ème} colloque de l'ASRDLF
(Association des sciences régionales de langue française)
Berlin - Septembre 1996

Pierre Frankhauser (Maître de conférence)

Pascal Gillon (Doctorant)

Alexandre Moine (ATER)

Cécile Tannier (Doctorante)

*IRADES (Institut de Recherche et d'Analyse des Dynamiques Economiques et Spatiales)
CNRS-URA 908 Université de Franche-Comté*

**Vers une nouvelle approche
pour simuler l'influence du comportement des
agents sur l'évolution du tissu urbain**

Introduction

Notre objectif est de développer un outil de compréhension des dynamiques urbaines, grâce à l'utilisation et à la formalisation de nouvelles approches capables de comprendre la complexité qui sous-tend l'évolution des espaces urbains. Il s'agit d'un travail avant tout méthodologique, mais qui doit aboutir à la conception d'un modèle de simulation qui permette de visualiser les conséquences d'un aménagement sur le fonctionnement et la structure spatiale d'une ville. Le test de différents scénarios possibles et les réponses fournies par le modèle devraient aider les décideurs à apprécier les impacts potentiels d'un projet d'aménagement sur l'organisation spatiale de la ville observée et constituer ainsi un véritable outil d'aide à la décision en matière d'aménagement urbain.

La forme générale du modèle est basée sur l'idée que la morphologie et le fonctionnement des entités urbaines sont interdépendants et s'influencent mutuellement pour concourir au développement urbain. Celui-ci dépend du site et de la situation de la ville considérée, des processus socio-économiques en jeu et des acteurs en présence. Autrement dit, la dynamique urbaine 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, elle doit donc être interprétée comme un 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 cela (Frankhauser, 1994). Le fait d'observer dans de nombreux cas certaines régularités dans les tissus urbains peut paraître surprenant vu la diversité de leur aspect ; mais l'interprétation systémique d'un tel phénomène indique l'existence de processus, qui se traduisent dans l'espace urbain, par l'apparition de certaines structures caractéristiques, selon un principe morphogénétique qui se manifeste de façon comparable dans beaucoup de villes.

PREMIERE PARTIE :

Concepts de base et architecture générale du projet

Pour appréhender de façon correcte les transformations de l'espace urbain, notre modèle doit présenter trois caractéristiques essentielles :

1• rendre compte de la dynamique d'une ville

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 cet 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, qui suppose une stabilité des formes spatiales, alors que celle d'évolution admet des changements structurels (Lung, 1987).

Nous devons à ce propos remarquer que l'échelle temporelle joue un rôle prééminent et qu'elle est susceptible d'influencer le comportement du système : certains groupes d'agents peuvent soit réagir plus vite que d'autres soit agir en même temps. De même, le moment où l'aménageur décide d'intervenir peut déterminer en partie la réaction des agents vis-à-vis du projet.

2• rendre compte des processus de différenciation spatiale

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. Il nous faut caractériser les différentes entités spatiales (ex : qualité paysagère du site, forme du tissu bâti), les localiser, tenir compte de leurs liens spatiaux (contiguïté, plus ou moins grande proximité, liaisons entre différents lieux grâce aux réseaux de voies de communication, de transports en commun...).

3• permettre l'étude des interactions entre les différents acteurs socio-économiques, ce qui implique de choisir un type de modélisation qui prenne en compte les processus qualitatifs déterminant les décisions des acteurs

Certains phénomènes démographiques ou économiques sont assez aisément quantifiables (nombre d'habitants ou d'entreprises dans une zone, part des actifs

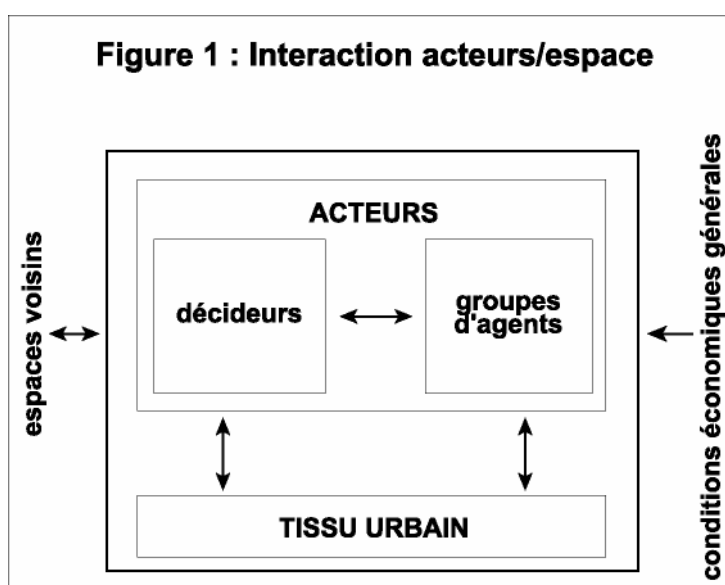
dans la population totale...). Mais lorsque l'on s'attache à l'étude de la perception de l'espace par les individus et aux mécanismes qui régissent leurs prises de décisions, une mesure précise des phénomènes devient illusoire. C'est pourquoi, pour décrire le comportement des agents, nous proposons d'utiliser des attributs qualitatifs, tels que : agréable, proche, lointain, très concerné, moins concerné, qui permettent d'évaluer la perception qu'ont les agents de certains phénomènes.

4• être en mesure d'évoluer, d'adapter ses règles de fonctionnement, relativement aux changements qui affectent le système urbain étudié

Les agents possèdent en effet des stratégies qui évoluent dans le temps. Ils ne poursuivent pas forcément toujours le (ou les) même(s) but(s) et il arrive souvent qu'une fois leur but atteint, ils tendent vers autre chose et donc modifient leur stratégie d'action. Précisons ici que l'évolution des règles de comportement des agents suppose une "mémoire" du système.

Comme nous l'avons expliqué précédemment, la formation d'un tissu urbain résulte d'un processus d'interaction complexe entre différents groupes d'agents socio-économiques (ex : population résidentielle d'un quartier, entreprises implantées dans une zone industrielle...) et de décideurs sur un espace donné.

Pour notre travail, l'espace n'est pas appréhendé comme un simple support. Il constitue au contraire un type d'acteurs particulier qui agit sur le comportement des agents sociaux et qui, en retour, est modifié par eux. Autrement dit, la dynamique spatiale est la conséquence des décisions prises par les agents et rétroagit sur leurs stratégies (cf. figure 1).



Cette interaction se manifeste différemment selon le niveau d'analyse (les échelles temporelles et spatiales) considéré. Nous avons choisi d'articuler le modèle autour de trois niveaux de fonctionnement :

- l'échelle macroscopique correspond au fonctionnement de l'espace régional, national voir international auquel appartient la ville étudiée. Elle apparaît dans le modèle essentiellement par le biais des conditions économiques générales (par exemple, l'état de la conjoncture économique nationale).
- l'échelle mésoscopique est celle du fonctionnement global de la ville, pour lequel l'influence du cadre naturel n'est pas à négliger. En effet, le site peut imposer des contraintes, qui entraînent par exemple des surcoûts de construction, ou bien au contraire facilitent l'implantation humaine. C'est à cette échelle que les acteurs publics locaux interviennent, et que sont conçus les projets d'aménagement urbain et les documents d'urbanisme (POS, SDAU...) qui dirigent en partie l'évolution de la trame urbaine.
- l'échelle microscopique est celle du fonctionnement des différentes entités spatiales de comportement homogène en interaction, qui constituent la ville. C'est à cette échelle que sont appliqués les projets d'aménagement et que nous modélisons le comportement des différents groupes d'agents socio-économiques.

Ainsi chaque niveau d'analyse a un fonctionnement, une organisation, des acteurs qui lui sont propres (cf. figure 2).

L'interaction entre les acteurs et leur territoire se manifeste comme il est décrit sur la figure 3.

Nous pouvons citer comme exemple le changement de comportement qui s'opère dans la population résidentielle d'un quartier qui a vu la construction d'une zone industrielle à proximité : le quartier voit décroître son attrait sur les groupes d'individus les plus aisés, tandis que viennent s'installer des familles d'ouvriers embauchés dans les usines nouvellement installées.

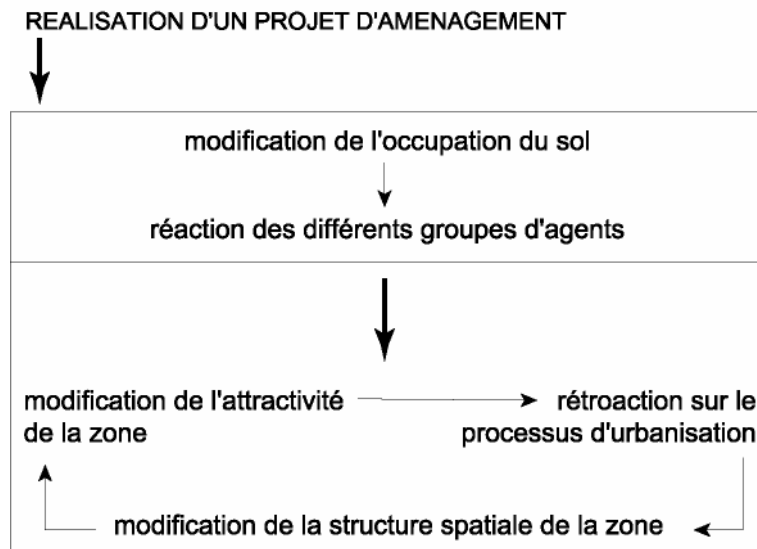
Autre exemple, imaginons la construction d'une route à proximité d'une zone pavillonnaire. Dans un premier temps, on observe une réaction directe de certains acteurs en rapport avec cette nouvelle situation :

- les nuisances sonores dues à la nouvelle route peuvent affecter la qualité de vie dans le quartier et provoquer une baisse de la demande en logements ;
- du côté de l'offre, une telle baisse peut être la cause d'une chute des prix de terrain.

Figure 2 : Niveaux de fonctionnement

NIVEAU MACROSCOPIQUE		
phénomènes observés	sociaux	décideurs économiques ou politiques sur le plan régional, national ou international
	spatiaux	tout ce qui existe en dehors de la ville, notamment les infrastructures de liaison interurbaines
règles de comportement (fonctionnement)	des groupes sociaux	choix des grandes décisions d'aménagement du territoire, établissement des schémas directeurs nationaux (autoroutiers par ex) liens sociaux, économiques, politiques, etc. entre les villes
	de l'espace	contraintes de l'environnement matériel, c'est-à-dire influences physiques extérieures (climat, montagnes...), position de la ville dans un système de villes
résultat du fonctionnement (configurations spatiales)		évolution des structures spatiales locales, régionales, nationales, voire internationales (ex : modification de la hiérarchie urbaine)
NIVEAU MESOSCOPIQUE		
phénomènes observés	sociaux	acteurs décidant de la politique de la ville (élu local, chef d'une grande entreprise locale...)
	spatiaux	limites et positions relatives des différentes zones
règles de comportement (fonctionnement)	des groupes sociaux	choix politiques de gestion et conception des projets d'aménagement urbains (établissement du POS notamment) fonctionnement en terme de centre et périphérie (polarisation due aux migrations alternantes par exemple)
	de l'espace	accessibilité, pôles attractifs ou répulsifs influence du cadre naturel (du site) sur l'organisation de l'espace urbain
résultat du fonctionnement (configurations spatiales)		morphogenèse et évolution du tissu urbain
NIVEAU MICROSCOPIQUE		
phénomènes observés	sociaux	groupes d'agents socio-économiques (population résidentielle d'un quartier, groupe de pression, entreprises d'une zone industrielle...)
	spatiaux	zones homogènes de par leur occupation du sol
règles de comportement (fonctionnement)	des groupes sociaux	stratégies de survie, d'extension, d'approvisionnement, choix de localisation... conflit d'intérêt entre les groupes sociaux concurrence spatiale pour l'occupation du sol
	de l'espace	inertie des formes spatiales, contraintes liées à la distance (distance euclidienne, distance-temps), à la forme de l'espace
résultat du fonctionnement (configurations spatiales)		changement ou maintien de l'occupation du sol

Figure 3 : Réaction et rétroaction des agents par rapport à un projet d'aménagement



Dans un deuxième temps, la modification de l'image de marque du quartier, c'est-à-dire de la perception qu'en ont les agents, peut influencer le processus d'urbanisation. Ainsi, la baisse des prix des terrains peut relancer une demande, dont le caractère sera cependant différent : par exemple on pourrait observer l'apparition de logements locatifs bas de gamme.

Ceci montre qu'une décision d'aménagement peut être à l'origine d'une bifurcation dans la trajectoire (le comportement) d'un système spatial, mais 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.

Ceci se traduit dans notre modèle par l'introduction de deux phases dans la réponse du système à la réalisation d'un aménagement :

1• réaction des différents groupes d'agents en réponse à une modification quelconque de l'espace

Les entités sont caractérisées par leur *attractivité* vis-à-vis des différents groupes d'acteurs. Ainsi, pour un individu qui cherche un terrain à bâtir, l'attractivité d'une zone résidentielle est le résultat d'une comparaison entre ses avantages et ses inconvénients, eux-mêmes pondérés par l'importance que l'agent leur attribue. Une forte activité de construction ou la nuisance sonore provoquées par un nouvel axe

routier peuvent dévaloriser l'image de marque d'un quartier et, par conséquent, diminuer son attractivité.

La dynamique urbaine peut donc être vue comme une compétition pour l'occupation du sol entre les différentes entités, dont le moteur est les stratégies des différents groupes d'agents présents sur chaque entité.

2• rétroaction de ces comportements, de ces pratiques, sur la structure spatiale urbaine

Il existe des seuils limites d'acceptation de certaines variables, liés à la perception de l'espace par les agents et au fonctionnement du système urbain. Leur franchissement, au cours du temps, induit une modification du comportement des agents.

Ces seuils peuvent concerner soit l'intensité d'un phénomène, soit sa durée dans le temps :

– Intensité d'un phénomène

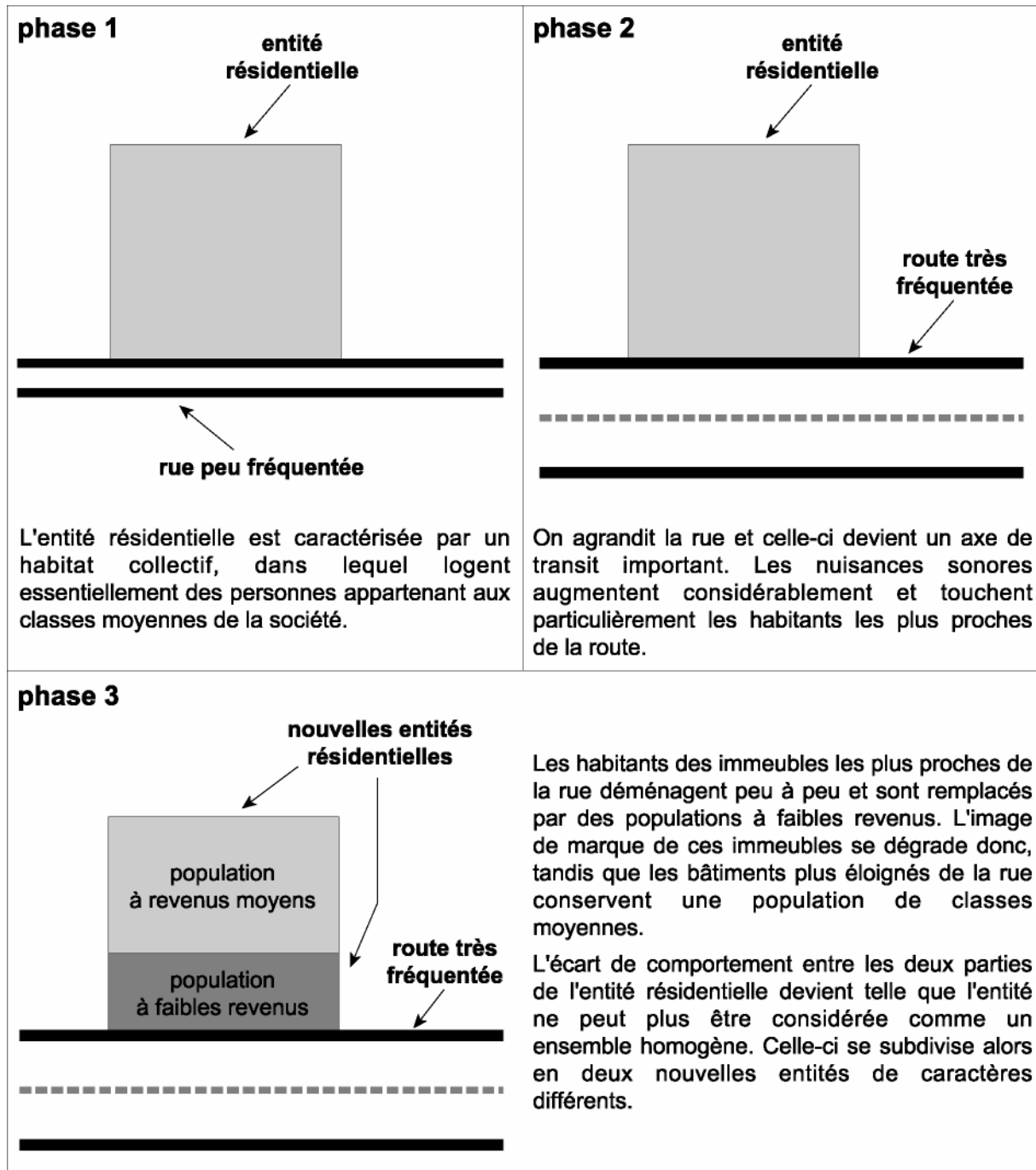
Une entité peut être subdivisée en fonction de nouveaux critères, qui apparaissent par exemple à l'occasion d'un projet d'aménagement. Ainsi dans un même quartier, les riverains immédiats d'une route nouvellement construite percevront ce projet différemment des agents, dont la résidence est plus éloignée.

Les différences de comportement entre les agents proches de la route et ceux qui en sont plus éloignés peut être telle que l'entité ne puisse plus être considéré comme un tout homogène (cf. figure 4).

– Durée d'un phénomène

Observons la construction d'un lotissement pavillonnaire. Le promoteur conçoit son projet en réponse aux aspirations d'un certain nombre de personnes qui souhaitent quitter leur immeuble pour un cadre de vie plus tranquille. Le critère de choix prépondérant est alors le prix du terrain et les personnes qui s'installent dans le lotissement satisfont leur demande du moment. Mais avec le temps, de nouvelles demandes sociales peuvent apparaître, telles que la création d'équipements publics (écoles, terrains de sport...) ou une meilleure desserte par les réseaux de transports collectifs, alors que ces critères n'étaient que peu ou pas pris en compte lors du choix de localisation résidentielle.

Figure 4 : Subdivision d'une entité suite à un aménagement



Finalement, nous remarquons que la prise en compte de seuils critiques et l'articulation entre différentes échelles de fonctionnement, qui possèdent leur propre dynamique, s'inscrit dans une logique synergétique¹. Nous modélisons l'évolution du tissu urbain au niveau d'une ville (vision mésoscopique), en considérant que la

¹ Un modèle synergétique portant sur la dynamique urbaine a été proposé récemment par T. Sigg, N. Koch et W. Weidlich (1995)

morphologie urbaine a des qualités, des propriétés, qui lui sont propres et que son évolution est le résultat des interactions au niveau microscopique : les changements au niveau mésoscopique sont expliqués par les comportements au niveau microscopique et la dynamique spatiale apparaît comme la conséquence des décisions prises par les acteurs.

Ces décisions ne sont pas le résultat d'une confrontation d'idées, mais sont basées sur la perception par les agents des attributs spatiaux et des facteurs économiques. C'est donc la demande sociale qui insuffle au système sa dynamique.

En outre, la prise en compte des influences macroscopiques (impact des conditions économiques générales et interactions avec les espaces voisins) permet de considérer la ville comme un système ouvert, située dans un environnement avec lequel elle interagit. Selon un point de vue synergétique, le rôle des conditions économiques générales peut être assimilé à celui d'un paramètre de contrôle.

DEUXIEME PARTIE :

Formalisation du modèle

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. Plusieurs auteurs ont proposés l'utilisation d'automates cellulaires en géographie (M. Phipps, 1989) qui permet d'appréhender directement l'espace sous la forme d'une représentation cartographique. 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.

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 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 limite². En outre ces règles restent constantes au cours de la simulation.

Contrairement à cette approche, notre objectif est de développer un modèle explicatif dans lequel la dynamique spatiale apparaît comme le résultat des décisions prises par les agents. La perception des agents entre alors directement en jeu et influence les règles dynamiques d'interaction spatiale de l'automate cellulaire. Les décisions des agents transforment progressivement l'espace et ces changements les influencent dans leurs décisions futures.

La modélisation du comportement des agents est réalisée en recourant à la logique floue (Zadeh, 1975). Différents travaux, notamment réalisés à l'Institut de Mathématiques Economiques de Dijon, ont mis en évidence l'utilité de cette approche pour caractériser le comportement des agents (Cf. par exemple : Rouget 1975, Ponsard 1976). Cependant, nous devons souligner que, dans notre cas, l'utilisation de cet approche sert directement à contrôler la dynamique du système spatial par l'intermédiaire d'un automate cellulaire.

Ainsi la dynamique du système se manifeste par la formation du tissu urbain à travers un processus d'auto-organisation socio-économique.

² White a récemment ajouté certains modèles économiques sous la forme de modules externes

II.1 Modélisation de la dynamique spatiale

• *La représentation de l'espace*

Il est prévu d'implanter directement une représentation cartographique numérisée de l'espace. Chaque pixel correspond à une partie de l'espace considéré qui est définie par la résolution utilisée lors de la numérisation. Cette information peut être très détaillée : en se basant sur une carte topographique au 1 : 25 000, la position des bâtiments est encore connue.

Cependant, notre objectif est de considérer l'évolution du système à un degré d'information beaucoup moins précis, puisqu'il paraît impossible de vouloir simuler la dynamique urbaine à une échelle aussi fine. C'est pourquoi nous travaillons à l'échelle des entités spatiales, qui sont constituées par un ensemble de pixels présentant un même état à un instant donné. Toute information initiale qui se réfère à une échelle plus fine sera donc initialement transformée en information globale sur l'entité. Ainsi, par exemple pour une entité, on considérera la totalité de la masse bâtie et cela servira à calculer un taux d'occupation du sol moyen. La même logique sera appliquée aux autres attributs qui caractérisent les entités.

Les entités sont définies par leur homogénéité par rapport à certains attributs qui les caractérisent et qui sont déterminants pour leur comportement. On distinguera différents types d'entités selon le type d'utilisation du sol (résidentielle, industrielle, logistique, etc.). *Les entités spatiales forment ainsi des objets propres.*

• *Les vecteurs d'attributs*

Chaque entité spatiale est caractérisée par un *vecteur d'attributs* qui est propre à l'ensemble des pixels qui la constituent³. Il est formé de composants, qui correspondent chacun à un attribut de l'entité en question. La position du vecteur d'attribut caractérise l'état de l'entité à un instant donné.

Certains attributs sont décrits par des variables cardinales, telles que le prix moyen du terrain ou l'accessibilité moyenne par rapport à une route. D'autres attributs se réfèrent à la *perception de l'espace* par les agents, et sont caractérisés par des *variables nominales*, par exemple la *qualité paysagère du site* ou la *proximité d'un équipement quelconque*. Ces variables sont décrites par des valeurs *floues* (beau, agréable, proche, lointain). *Nous proposons donc de formaliser la notion de distance en utilisant des attributs flous*⁴.

³ 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.

⁴ 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 (S.Bura, F. Guérin-Pace, H. Mathian, D. Pumain, L. Sanders). Mais ces règles sont parfois trop précises par rapport à la réalité perçue par les agents. Ceci sera évité en utilisant la logique floue.

Un composant important à prendre en compte pour chaque entité spatiale est la disponibilité de terrains, de locaux ou de logements.

II.2 Modélisation du comportement des agents

A la suite de la réalisation d'un projet d'aménagement, la dynamique spatiale se manifeste par une compétition pour l'occupation du sol entre les différentes entités spatiales. Un agent peut choisir soit de rester dans son entité, soit d'aller s'installer ailleurs. La décision de migrer ou non est influencée par :

- l'information disponible sur chaque entité telle qu'elle est codée dans les vecteurs d'attribut ;
- la perception de ces attributs par les agents, pondérée par l'importance qui leur est accordée; cette évaluation définit l'attractivité des entités ;
- la situation du marché foncier.

Afin de connaître les règles de comportement des agents nous nous basons sur des résultats d'enquêtes ou sur d'autres études concernant la perception de l'espace par les individus, les stratégies de localisation des entreprises, les stratégies résidentielles, etc. Une approche statistique permettra le passage de l'échelle individuelle à celle de groupes d'agents.

Dans le modèle, nous distinguons la formalisation du comportement des agents :

- vis-à-vis de l'entité dans laquelle ils sont localisés (évaluation interne de l'attractivité de l'entité),
- vis-à-vis des autres entités (évaluation externe de l'attractivité de l'entité).

Ceci est justifié par le fait qu'un agent qualifie différemment l'endroit dans lequel il est implanté des autres lieux d'implantation potentielle car son expérience au quotidien entre en jeu.

II.2.1 Comportement des agents vis-à-vis des entités externes

• **Vecteurs de perception et d'importance externes**

Pour chaque entité, on introduit un vecteur qui contient l'interprétation par l'agent des informations codées dans le vecteur d'attributs, c'est-à-dire l'évaluation floue des différents attributs. Nous donnons ci-dessous quelques exemples :

<i>vecteur d'attribut</i>	<i>vecteur de perception</i>	<i>valeur floue</i>
prix du terrain = x FFR	acceptable	=0,6
qualité paysagère: moyen	acceptable	=0,6
accessibilité centre ville :	pas trop bonne	=0,25
équipement scolaire:	satisfaisant	=0,8

Les valeurs peuvent évidemment être différentes pour chaque individu. Pour la perception du prix notamment, nous devons nous attendre à des différences considérables.

Mais l'évaluation des attributs n'est pas suffisante pour décrire l'attractivité d'une entité. En effet, la qualité paysagère d'une entité peut par exemple être perçue comme très satisfaisante, mais le prix du terrain empêche l'agent de s'y installer. Autre exemple, pour une personne âgée, la proximité d'un établissement scolaire est sans importance, alors qu'elle compte énormément pour une famille avec deux jeunes enfants. L'offre de terrains, de locaux ou de logements est également un facteur non négligeable car chaque agent est soumis à la logique du marché : une zone peut être perçue comme très attractive, mais la décision de s'installer dépend de la disponibilité de terrains ou de logements. Celle-ci revêt donc un poids considérable dans la prise de décision. C'est pourquoi nous introduisons un vecteur d'importance, dont les composants sont des poids flous qui pondèrent les valeurs du vecteur de perception : très important, important.

- ***Une mesure d'attractivité externe et un concept probabiliste du choix individuel***

La connaissance du vecteur de perception et du vecteur d'importance permet d'introduire une mesure d'attractivité qui synthétise les informations représentées par les composants de ces deux vecteurs. Cette mesure est calculée selon les algorithmes valables pour les variables floues. Ainsi on calcule pour chaque individu de l'échantillon considéré une attractivité a_j relative à l'entité j ⁵.

L'objectif de la détermination des valeurs d'attractivité est d'évaluer le processus d'occupation du sol dans les différentes entités. Il apparaît donc nécessaire d'établir un lien entre ces mesures et la dynamique urbaine.

Les attractivités nous donnent pour chaque agent un classement de zones par lesquelles il est potentiellement attiré. On pourrait donc supposer que l'agent choisisse certainement la zone avec la plus grande attractivité. Cependant, ce point de vue nous paraît trop restrictif car nous ne connaissons pas tous les facteurs qui influencent les choix de localisation des agents. Par exemple, la proximité d'un parent ou d'un ami peut être décisive dans un choix de localisation résidentielle. Ceci nous incite donc à introduire le concept probabiliste suivant : une entité dont la valeur d'attractivité est la plus élevée a la plus grande probabilité d'être choisie par l'agent, mais une entité dont l'attractivité est plus faible a néanmoins une certaine probabilité d'être favorisée par l'agent suite à des préférences non-connues⁶.

⁵ Nous précisons que l'attractivité d'une zone est considérée comme égale à zéro, si l'offre de terrains ou de logements est nulle.

⁶ Toutefois nous faisons l'hypothèse que la probabilité de s'installer dans une zone j dépend uniquement de l'attractivité de cette zone et indépendamment de celle des autres zones. Ceci implique que le choix est fait selon les avantages perçus et que la notion d'aléatoire traduit bien le manque d'information concernant les qualités supplémentaires de la zone.

Nous introduisons donc une probabilité conditionnelle $p(j|a_j)$ qu'un individu qui habite dans une entité quelconque choisisse la zone j sous condition qu'il l'ait qualifiée par la valeur a_j . Dans le cas le plus simple on pourrait faire l'hypothèse qu'elle soit proportionnelle à l'attractivité de la zone. Suivant ce point de vue, cette probabilité ne dépendrait plus explicitement de la zone, celle-ci étant qualifiée par une mesure globale, l'attractivité. Or elle dépend en réalité non seulement de l'attractivité telle qu'elle est perçue par l'agent, mais aussi de facteurs externes.

Notons que les probabilités conditionnelles doivent être normalisées de la façon suivante :

$$\sum_j p(j|a_j) = 1$$

- **De l'échelle individuelle aux groupes d'agents**

Jusqu'ici nous nous sommes placés à l'échelle des individus. Cependant pour la modélisation il n'est pas utile de prendre en compte chaque décision individuelle, de la même façon qu'il n'est pas utile de considérer chaque bâtiment pour la modélisation de la dynamique spatiale. Comme la modélisation est basée sur une série d'enquêtes et d'études, il est possible de recourir aux informations fournies par celles-ci pour réaliser ce passage vers une échelle plus agrégée.

On peut s'attendre à trouver une assez grande concordance chez les agents pour l'évaluation de certains attributs tels que la qualité paysagère. On obtient alors une distribution unimodale des valeurs des attractivités. Dans d'autre cas, comme pour le prix du terrain, l'évaluation des agents peut différer de façon nette et suivre par exemple une répartition bimodale. Ceci permet de distinguer alors plusieurs catégories d'agents pour lesquels les valeurs d'attractivités attribuées aux différentes entités sont suffisamment semblables. Cette distinction pourrait être mise en relation avec les catégories socio-professionnelles en utilisant des tests statistiques.

Afin de réaliser le passage à l'échelle de ces catégories d'agents, nous déterminons les fréquences $p_K(a_j)$ dans la catégorie K de personnes qui ont caractérisé la zone j par une valeur a_j . Nous interprétons cette fréquence comme la probabilité de trouver cet événement dans notre échantillon K . Ainsi nous obtenons la *probabilité conjointe* $p'_K(j \cap a_j)$ qu'un agent appartenant à cette catégorie choisissent la zone j , comme produit de la probabilité conditionnelle $p(j|a_j)$ et la probabilité simple $p_K(a_j)$:

$$p'_K(j \cap a_j) = p(j|a_j) \cdot p_K(a_j)$$

Ainsi nous obtenons la probabilité totale d'immigration de la catégorie K dans la zone j par la somme sur toutes les valeurs d'attractivité attribuées à cette zone :

$$p'_K(j) = \sum_{a_i} p'_K(j \cap a_i)$$

En réalité la probabilité d'immigration dans l'entité j dépend non seulement de son attractivité et la disponibilité de terrains ou de logements, mais également de la demande. Ce phénomène sera pris en compte en recourant aux données des

recensements, qui répertorient le nombre de migrants interurbains, et à des enquêtes ponctuelles qui précisent la nature de la demande. Nous supposons donc que la probabilité de s'installer dans la zone j dépend aussi du nombre n_K de demandeurs de logement ou de terrain et de la nature de la demande, qui dépend elle-même de la catégorie des agents.

Le nombre de non-migrants est l'ensemble complémentaire aux migrants. Il existe donc une probabilité complémentaire pour l'agent de rester dans sa propre entité, ce qui permet de normaliser les probabilités correctement.

II.2.2 Le processus d'urbanisation

• **Le processus d'occupation du sol**

L'occupation du sol est donc appréhendée comme une séquence stochastique d'événements qui est décrite par la probabilité de migration dans chacune des entités⁷. Nous rappelons que celle-ci dépend :

- de l'attractivité de l'entité telle quelle est perçue par les agents,
- de la demande actuelle de logements, de locaux ou de terrains,
- de l'offre de logements, de locaux ou de terrains.

Nous soulignons que chaque nouvel arrivant dans une entité peut donc devenir désormais de nouveau un demandeur de logement ou de terrain dans une autre entité (cf. plus loin).

Le processus d'occupation de sol est, de ce point de vue, modélisé comme une *chaîne markovienne* d'événements. Le fait que la séquence de décisions individuelles des agents disparaisse n'implique pas que le système ne puisse pas évoluer et influencer le comportement des agents, comme nous allons ci-après le montrer.

Pour chaque zone le résultat de ce processus apparaît sous la forme d'un *taux de remplissage de l'entité* r_j .

• **L'impact direct d'un aménagement**

La réalisation d'un aménagement peut modifier les valeurs des composants du vecteur d'attributs. Ainsi la nuisance sonore provoquée par un nouvel axe routier peut dévaloriser l'image de marque d'un quartier et le vecteur d'attributs peut changer (par exemple baisse des prix des terrains ou des loyers). Ainsi la baisse de l'attractivité de la zone j , provoqué par exemple par la baisse de l'image de marque du quartier, peut provoquer une chute du prix du terrain et celle-ci peut réduire la

⁷ 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 considéré à cette échelle. Ainsi on indiquera pour une zone plutôt le degré d'occupation du sol. Il ne semble en effet pas réaliste de considérer les décisions au niveau parcellaire.

probabilité de migration de la catégorie d'agents K vers cette zone. En revanche la baisse des prix peut relancer une demande pour un autre genre d'agent.

Ainsi une transformation du tissu urbain peut entraîner une modification de certains composants du vecteur de perception et, par voie de conséquence, une modification de l'attractivité de l'entité. Ainsi la probabilité de migration et donc le processus d'occupation du sol peuvent être directement influencés au cours de la simulation.

II.2.3 Comportement des agents vis-à-vis de leur propre entité

- **Vecteurs de perception, d'importance et d'attractivité internes**

L'attractivité de l'entité dans laquelle sont localisés les agents est perçue de façon différente de celle des autres entités. L'agent porte un certain jugement sur son entité suite à son expérience quotidienne :

- il n'évalue pas l'attractivité globale de son entité, mais s'intéresse à divers éléments concrets de son environnement (ex : qualité de la desserte par les réseaux de transport publics) ;
- si l'agent veut que ses doléances soient prises en compte, il ne doit pas émettre sa demande isolément, mais passer par exemple par l'intermédiaire d'un groupe de pression.

L'expérience de l'agent vis-à-vis de sa propre entité est décrite par un vecteur de perception et un vecteur d'importance internes qui sont formalisés de la même façon que les vecteurs de perception et d'importance externes.

Comme nous l'avons déjà dit, il ne semble pas pertinent d'introduire une mesure globale d'attractivité. Nous proposons donc de calculer, à partir des composants des vecteurs de perception et d'importance internes, pour chaque élément constitutif de l'entité (ex : équipement sportif, évolution de la taxe foncière, etc.) une mesure floue d'attractivité.

- **Le phénomène de ségrégation spatiale**

Certains phénomènes n'affectent pas la totalité d'une zone de façon égale. Ainsi la partie d'un quartier proche d'un axe de transport est plus affectée par les nuisances sonores que les parties plus éloignées. Nous introduisons donc *des facteurs de portées spatiales fixes* codés sous la formes de valeurs floues (proche, éloigné...) qui influencent l'attractivité interne des agents les plus directement concernés. De nouvelles entités peuvent alors émerger (cf. figure 4), auxquelles on affecte un effectif de population relatif à la part de surface concernée.

- **Les seuils critiques et la probabilité d'action**

Pour chaque agent il existe un seuil critique au-delà duquel une situation devient insupportable (par exemple nuisance de bruit). Nous introduisons pour les attributs perçus comme cruciaux une valeur critique d'attractivité a_c . On pourrait supposer

que, une fois ce seuil dépassé, l'agent passe à l'action. Deux options sont envisageables :

- 1• soit il envisage de déménager (tendance à l'émigration) ; ceci est possible uniquement si son budget le lui permet ;
- 2• soit il défend ses intérêts. Dans ce cas, une démarche individuelle ne paraît pas une stratégie pertinente. Nous supposons donc que ce choix n'est valable que s'il existe un nombre suffisant de personnes qui partagent son opinion. Il existe donc un nombre critique de participants pour aboutir à une telle action. On assiste alors à l'émergence d'une demande sociale qui se manifeste à travers un groupe de pression.

Le passage à l'action dépend de plusieurs facteurs. Il peut être influencé par des expériences antérieures sur la réussite ou l'échec d'initiatives communes. Ceci nous incite à recourir, comme précédemment, à un concept probabiliste qui traduit mieux la différence d'action des individus. Nous introduisons donc une probabilité conditionnelle d'action $p_K(b_l | a_i \geq a_c)$. Cette probabilité est normalisée sur la base des deux actions énumérées $l = 1, 2$, en y ajoutant la probabilité de l'événement complémentaire, qui est d'accepter une situation défavorable. Nous supposons que cette probabilité dépend du type d'agent considéré et de certaines conditions économique générales.

Afin de modéliser l'option "émigration" ($l=1$) on utilise les mesures d'attractivité externe (cf. chapitre II.2.1) pour les autres entités en y ajoutant une mesure globale d'attractivité de l'entité propre à l'agent. Celle-ci est calculée sur la base des vecteurs de perception et d'importance internes.

Afin de modéliser l'option "émergence d'une demande sociale" ($l=2$), nous définissons une mesure de *demande sociale* d_S qui est déterminée à partir des attractivités individuelles et le nombre de personnes qui partagent cette opinion dans notre échantillon. Suivant nos remarques, le comportement individuel peut néanmoins empêcher que cette demande s'articule réellement. Nous supposons donc que la probabilité individuelle de défendre ses intérêts dans le cadre d'un groupe de pression augmente dès que d_S dépasse un seuil critique d_C

$$p_K(b_2 | a_i \geq a_c) = f(d_S) \quad \text{avec un phénomène de seuil pour} \quad d_S = d_C$$

La probabilité de trouver une action commune peut donc être décrite par la probabilité conjointe :

$$p_K(b_2 \cap a_i \geq a_c) = p_K(b_2 | a_i \geq a_c) \cdot p_K(a_i \geq a_c)$$

où $p_K(a_i \geq a_c)$ est la probabilité de trouver dans la catégorie K une valeur $a_i \geq a_c$. Celle-ci correspond à la fréquence de ce comportement dans notre échantillon. La somme sur toute les valeurs $a_i \geq a_c$ nous donne la probabilité que la demande sociale s'articule. La normalisation est assurée en tenant compte des autres valeurs d'attractivité et des autres comportements (émigration, inertie).

II.3 La réalisation du projet

Afin d'observer l'impact d'un aménagement, l'utilisateur 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 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 base de données est gérée par un système d'information géographique (SIG).

Pour tester la faisabilité et la pertinence du modèle, nous avons choisi de l'appliquer à l'agglomération de Lons-le-Saunier (préfecture du Jura), sur laquelle nous analysons l'impact de la construction de la nouvelle autoroute A39.

Bibliographie

M. BATTY, Y. XIE, *From cells to cities*, a paper written for the Special Issue of "Environment and Planning B" in honour 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.

Groupe DUPONT, *Géopoint 92, Modèles et modélisation en géographie*, Université d'Avignon.

P. FRANKHAUSER, *La fractalité des structures urbaines*, collection « Villes », ed. Anthropos, Paris, 1994.

P. FRANKHAUSER, M.-N. MILLE, T. BÄCK, *Un modèle pour simuler l'impact d'un projet d'aménagement sur la dynamique urbaine*, article présenté lors du congrès Urban Utopia de la Commission Européenne, novembre 1995.

IRADES - CETE de Lyon-CODRA, *Observatoire de l'autoroute A 39 Dole - Bourg-en-Bresse, recherche socio-économique, état initial*, décembre 1994.

Y. LUNG, *Auto-organisation, bifurcation, catastrophe... les ruptures de la dynamique spatiale*, travaux de l'IERSO (Institut d'économie régionale du Sud-Ouest), ed. Presses Universitaires de Bordeaux, 1987.

- J. C. PEREZ, *De nouvelles voies vers l'intelligence artificielle : pluri-disciplinarité, auto-organisation, réseaux neuronaux*, 2^e édition, Masson, Paris, 1989.
- 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.
- D. PUMAIN, L. SANDERS, T. SAINT-JULIEN, *Villes et auto-organisation*, Economica, Paris, 1989.
- C. PONSARD, *Esquisse de simulation d'une économie régionale : l'apport de la théorie des systèmes flous*, Institut de Mathématique Economiques, Dijon 1976.
- C. ROLAND-MAY, *La théorie des ensembles flous et son intérêt en géographie*, in "L'espace géographique", VOL 16, n°1, 1987.
- B. ROUGET, *L'analyse spatiale en économie urbaine - Essai méthodologique*, Thèse de doctorat es-Sciences Economiques, Université de Dijon, 1975.
- L. SANDERS, *Système de villes et synergétique*, coll. VILLES, ed. Anthropos-Economica, Paris, 1992.
- T. SIGG, N. KOCH AND W. WEIDLICH, *Urban evolution in Interaction with Population Dynamics*, Séminaire "L'analyse spatiale des données biodémographiques", Paris 1995.
- R. WHITE, G. ENGELEN and I. ULJEE, *Cellular automata modelling or fractal urban land use patterns: forecasting change for planning applications*, 8th European colloquium on theoretical and quantitative geography, Budapest, 12-16 september, 1993.
- R. WHITE and G. ENGELEN, *Cellular dynamics and GIS modelling spatial complexity*, Geographical Systems 1, 1994.
- L. A. ZADEH, *The concept of a linguistic variable and its applications to approximate reasoning*, Information Sciences, 1975.