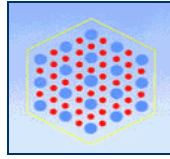


Association de Science Régionale De Langue Française



The poster is for the XLème Colloque de l'ASRDLF. It features a map of Europe with various regions highlighted. The text on the poster includes: 'XLème Colloque de l'ASRDLF', 'Convergence et disparités régionales au sein de l'espace européen', 'Les politiques régionales à l'épreuve des faits', and 'Bruxelles – 1, 2 et 3 Septembre 2004'. There are also logos for various organizations at the bottom.

COMPOTEMENT DYNAMIQUE DISCRET D'UN MODELE DE
VILLE PERIURBAINE

Geoffrey CARUSO
Assistant, Doctorant
Institut de Géographie,
Université catholique de Louvain
Louvain-la-Neuve
Caruso@geog.ucl.ac.be

Résumé :

Cette contribution vise à mettre en évidence des mécanismes de croissance résidentielle capables de générer des formes urbaines et périurbaines discontinues. Nous utilisons un modèle spatio-dynamique discret dont les fondements micro-économiques sont ceux du modèle monocentrique standard. Par analogie aux automates cellulaires élémentaires, nous étudions l'évolution des structures spatiales au cours du temps à l'aide de diagrammes espace-temps. Une analyse de sensibilité est notamment effectuée sur les préférences des ménages, leur revenu et le coût unitaire de transport. Nous simulons également l'effet d'une politique de type Green Belt qui viserait à réduire la diffusion des résidents dans l'espace rural.

Mots clés : Périurbanisation, forme urbaine, automate cellulaire, modèle monocentrique

Classification JEL : R14, R21, D62, C61

COMPORTEMENT DYNAMIQUE DISCRET D'UN MODELE DE VILLE PERIURBAINE

INTRODUCTION

Cette communication participe d'une réflexion sur l'étalement urbain et ses différentes formes. Nous visons à offrir un éclairage sur l'émergence de morphologies urbaines non compactes, c'est à dire discontinues et consommatrices d'espace à la périphérie des villes. Nous traitons le problème du mitage de l'espace par l'habitat dans un contexte périurbain. Les résidents sont donc considérés comme des navetteurs et leurs habitations se mêlent aux occupations agricoles du sol (voir Cavailhès, *et al.* 2003). Lorsque l'on considère sa dynamique, le phénomène est à relier au concept anglo-américain de 'urban sprawl' (voir par exemple Brueckner, 2000a ; Galster, 2001 ; Camagni *et al.*, 2002).

En Europe, les tendances de périurbanisation sont manifestes et concernent une part importante de la population et des territoires (Caruso, 2002). L'augmentation des revenus et la diminution du coût des navettes sont deux facteurs importants de l'extension urbaine et sont souvent mis en exergue. De grandes similitudes sont également observées à travers l'Europe en ce qui concerne les choix résidentiels des différentes catégories socio-démographiques. Les localisations en périphérie marquent la tendance globale et les raisons de ce choix résidentiel sont souvent liées à l'attrait pour des paysages faiblement bâtis mais aussi pour des voisinages offrant une large gamme de services. Nous reprendrons plus loin ces deux caractéristiques au sein de notre modélisation.

Les processus de périurbanisation s'inscrivent toutefois dans des contextes régionaux qui diffèrent par exemple en terme de potentiel de population, de croissance économique, de mode d'habitat existant, de politiques d'aménagement du territoire et du logement. Des différences non négligeables de formes périurbaines peuvent donc être observées alors que les processus à l'œuvre semblent grosso modo similaires. Des typologies à l'échelle européenne, effectuées sur base des découpages administratifs (par exemple Eurostat, 1999), existent et permettent en partie d'apprécier le degré de périurbanisation des régions. Toutefois les différences morphologiques sont mieux appréciées à une échelle plus fine, à travers des données d'occupation du sol. En utilisant la base de données CORINE, Vandermotten *et al.* (1999) montrent par exemple à quel point les parts respectives des tissus urbains continus et discontinus varient à travers les différentes villes européennes. L'opérationnalisation du concept de « urban sprawl » (voir Torrens et Alberti, 2001) et les développements de la géométrie fractale ont aussi conduit à la construction d'indices de formes spatiales appliqués à l'extension des villes (par exemple Thomas *et al.*, 2004).

L'objectif consiste ici à explorer les mécanismes de la croissance résidentielle au sein d'un espace initialement rural. Nous visons à mieux comprendre l'émergence de formes discontinues du développement urbain sans toutefois en effectuer la mesure. Nous ne mettrons pas davantage l'accent sur les impacts socio-économiques ou environnementaux d'une croissance résidentielle diffuse bien que ces impacts et la manière de les gérer soient une motivation ultime de cette recherche. Plus précisément, nous utilisons un modèle spatio-

dynamique discret qui simule la conversion des espaces ruraux entourant une ville par un développement résidentiel dont le taux de croissance est donné. Par analogie aux automates cellulaires unidimensionnels, des diagrammes espace-temps sont utilisés afin de décrire et visualiser la vitesse de déplacement vers la périphérie de configurations spatiales mixtes où agriculteurs et ménages coexistent. L'analyse porte également sur l'évolution au cours du temps des rentes foncières et de la taille des lots fonciers.

Dans un premier temps nous présentons les méthodes de modélisation que nous essayons d'intégrer dans notre démarche. Notamment, nous présentons les résultats principaux d'un modèle de simulation bidimensionnel qui associe automate cellulaire et économie urbaine dynamique. Dans un second temps nous présentons les caractéristiques micro-économiques et le fonctionnement dynamique du modèle. La troisième partie consiste en une analyse de sensibilité de l'output spatial et dynamique du modèle suite au changement des préférences individuelles et autres paramètres.

I. CONTEXTE DE LA MODELISATION

La méthode consiste à intégrer un modèle économique urbain (voir une synthèse dans Fujita, 1989) au sein d'un canevas spatio-dynamique discret inspiré des automates cellulaires (AC) élémentaires récemment popularisés par Wolfram (2002). L'originalité méthodologique du papier réside dans l'utilisation d'AC unidimensionnels, ceux-ci n'ayant (à notre connaissance) jamais été utilisés pour l'analyse urbaine. Les AC bidimensionnels, par contre, ont souvent été utilisés pour simuler la croissance urbaine ou la dynamique d'une ville en tant que système complexe (Batty *et al.*, 1997, White et Engelen, 1997, Webster et Wu, 2001, Wu 2003). Les AC bidimensionnels sont aussi apparentés aux modèles de préférences (dont les premiers développement remontent à Schelling, 1978) et, plus récemment, aux modèles spatiaux de théorie des jeux et du chaos (voir par exemple Nowak et May, 1992).

Par nature les AC bidimensionnels sont plus proches des formes géographiques observées, d'où leur utilisation en géographie, notamment depuis les travaux de Tobler (1979) et par la suite de Couclelis (1985) sur la « géographie cellulaire ». Cependant les AC unidimensionnels présentent deux avantages : ils offrent une plus grande lisibilité de la dynamique¹ et ont une structure plus proche du modèle économique urbain standard puisqu'ils considèrent l'espace à travers la distance uniquement.

1. Automates cellulaires élémentaires

C'est Von Neumann qui est à l'origine des premiers développement des automates cellulaires alors qu'il cherchait à construire une machine qui soit capable d'autoreproduction. Les automates cellulaires sont des systèmes constitués d'un large nombre de composants simples et identiques en interaction locale. Chaque élément prend une valeur dans un ensemble fini et cette valeur évolue de manière synchrone par pas de temps discrets et est fonction de la valeur des éléments voisins au temps précédents.

¹ "An important feature of cellular automata is that their behaviour can readily be presented in a visual way" (Wolfram, 2002, p.24)

Les AC ont été utilisés pour modéliser des systèmes naturels complexes et comme une alternative à la modélisation dynamique par équations différentielles. En géographie, de nombreux modèles ont été développés pour modéliser les changements d'affectations du sol. Pour la plupart il s'agit d'AC étendus car des contraintes sont ajoutées de manière à ce que l'état d'une cellule ne dépende pas que de l'état de ses voisins mais aussi d'autres caractéristiques locales (accessibilité, type de sols, pentes, ... la condition de 'localité' n'est donc pas strictement respectée) et la définition des voisinages varie énormément. Les caractéristiques de parallélisme (ou synchronie) et d'homogénéité des règles sur tout l'espace restent par contre souvent d'application.

Wolfram (1984) a décrit de manière détaillée le comportement des AC unidimensionnels élémentaires. Un AC unidimensionnel élémentaire « *consiste en une ligne de cellules, chacune colorée de noir ou de blanc. A chaque période de temps, une règle définie détermine la couleur d'une cellule donnée sur base de la couleur de cette cellule et de ses voisines immédiates de gauche et de droite à l'étape précédente* » (traduit de Wolfram, 2002, p.24). La superposition des états de chaque cellule au fur et à mesure du temps sur un même diagramme permet l'observation des trajectoires de configurations spatiales. La figure 1 en présente trois exemples². L'exemple de droite est le plus simple puisque la règle utilisée conduit à une structure complètement homogène où chaque cellule possède le même état. A gauche une structure émerge. Elle est stable et une périodicité peut être identifiée. Au milieu le pattern est chaotique. Des structures y émergent mais sans aucune périodicité.

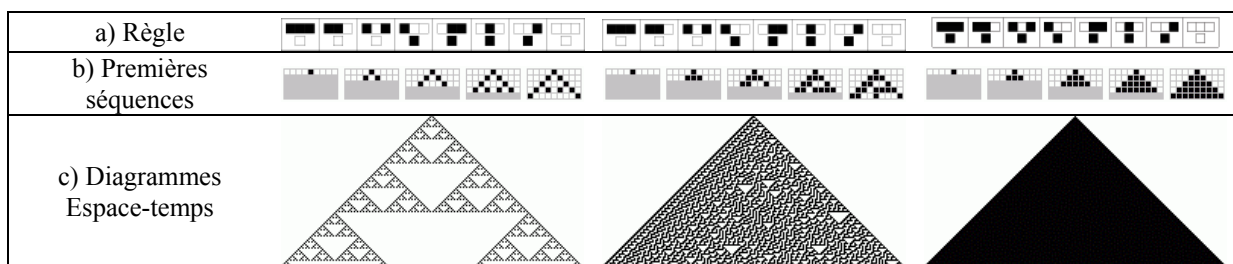


Figure n° 1 : Exemples d'automates cellulaires élémentaires (règles 90, 30 et 254)

Source : Wolfram, 2002.

2. Un exemple d'intégration des dynamiques microéconomiques et cellulaires

Caruso et al., 2004 ont développés un modèles de simulation de la croissance résidentielle dans un espace bidimensionnel. L'objectif de ce modèle est de pallier au manque de fondements théoriques des modèles urbains de type automate cellulaire qui souvent ne considèrent pas les changements d'affectation comme le résultat d'actions économiques individuelles.

Pour cela le modèle couple un AC bidimensionnel et un modèle monocentrique dynamique avec externalités de voisinage. Par rapport à l'analyse économique urbaine standard, le modèle présente l'avantage de générer des formes spatiales mesurables en 2D et comparables aux structures que l'on peut observer à l'aide de données d'utilisation du sol détaillées (télédétection, SIG). Surtout, les structures urbaines générées ne dépendent pas uniquement de la distance au centre mais aussi d'un voisinage explicitement spatial. Ainsi, alors que

² Wolfram (1984) propose une typologie en quatre classes de tous les AC unidimensionnels et des mesures d'entropie. Une description plus générale a été apportée par Langton (1991) par la mesure d'un indice (λ).

l'analyse urbaine standard peut générer des espaces mixtes agriculteurs-résidents, ce modèle peut aller plus loin en caractérisant cette mixité des usages du sol. Des mesures de forme, telles que la taille des noyaux d'habitat, la fragmentation de l'espace rural, la fractalité des structures, ... peuvent alors y être appliquées.

Le modèle est également dynamique et permet donc de comprendre l'émergence à travers le temps de ruptures de la continuité du bâti (phénomènes de « leapfrogging »). Le modèle s'apparente donc aux modèles monocentriques dynamiques qui postulent l'irréversibilité des développements urbains. Ces modèles dynamiques (notamment revus par Brueckner, 2000b ou Miyao, 1987) montrent comment des structures mixtes ou non-contiguës ainsi que des développements allant de la périphérie vers le centre sont produits du fait de l'existence au préalable d'un espace bâti. Contrairement au canevas statique Alonso-Muth-Mills où la structure spatiale est ajustée de manière instantanée, les modèles dynamiques mettent en évidence l'historique de remplissage de la ville. L'équilibre se construit de manière séquentielle et la structure urbaine est « path-dependent ». Yacovissi et Kern (1995) ont montré que ces modèles dynamiques sont mieux à même de rendre compte des profils de densité observés que les modèles statiques.

Le fonctionnement du modèle présenté ici est similaire à Caruso, *et al.* (2004) bien qu'il soit ici réduit à une dimension. Nous présentons plus en détail le comportement des ménages dans la section suivante du papier. La figure 2 montre d'abord quelques résultats du modèle en deux dimensions.

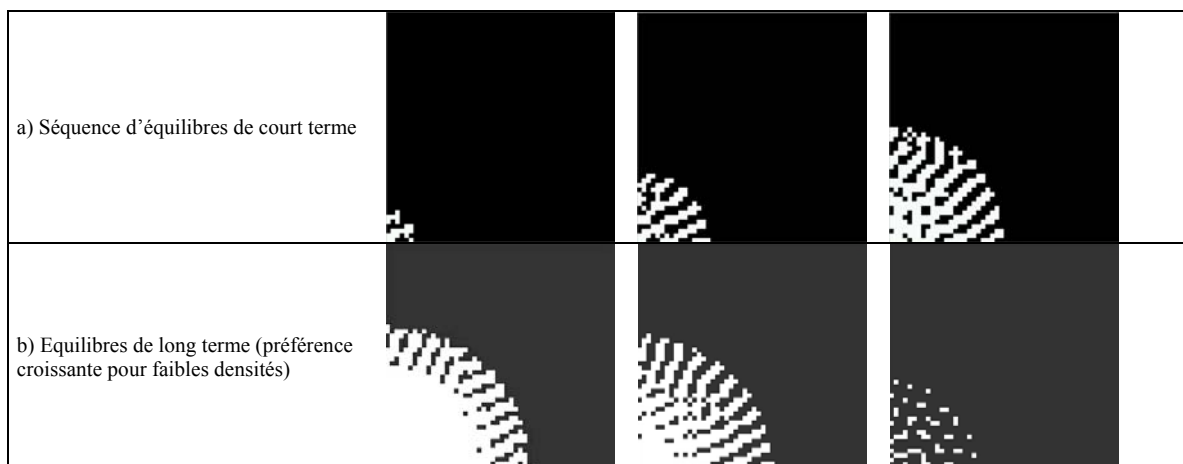


Figure n° 2 : Exemples d'équilibre de court et long terme dans un espace 2D

Source : Caruso, *et al.*, 2004.

A la figure 2a, une séquence de 3 temps est présentée. Chaque période correspond à un équilibre de court terme au cours duquel l'utilité des ménages (en blanc) qui ont migré dans la ville est supérieure à l'utilité externe (ville ouverte). Les ménages se localisent de manière à obtenir un compromis entre la distance au CBD (coin inférieur gauche) et des externalités de voisinages liées au nombre de résidents présents dans leur voisinage (28 cellules). Par hypothèse, les ménages apprécient à la fois des voisinages peu densément peuplés (beaucoup de cellules agricoles (noires)) et des voisinages plus densément peuplés (cellules blanches, susceptibles d'offrir plus de contacts et de biens publics). Dans le cas de la figure 2a, la préférence pour les faibles densités d'urbanisation sont telles que la structure spatiale qui se crée aménage des espaces vides entre les résidents au fur et à mesure de la croissance urbaine.

Ce type de structures non contiguës peuvent persister à l'équilibre de long terme (figure 2b). La morphologie des structures finales dépend notamment des préférences. Comme le montre la figure 2b, plus la préférence pour les faibles densités est forte, plus la structure urbaine est fragmentée. De plus, la population d'équilibre est réduite et l'espace urbain compact (continu) tend à disparaître au profit d'un espace uniquement mixte.

II. LE MODELE

Le modèle considère une ville ouverte, monocentrique, dans laquelle le logement est un bien durable (irréversible) (voir Brueckner, 2000b). Un différentiel d'utilité favorable à la ville incite à la migration vers la ville. Celle-ci est donc sujette à une croissance de population et le niveau d'utilité est ajusté au cours du temps. Le taux d'immigration et ainsi la vitesse de l'ajustement sont donnés de façon exogène. L'utilité des ménages résidentiels dans la ville est fonction de deux externalités de voisinage. Comme dans le modèle cellulaire de Schelling (1971), ces externalités génèrent la dynamique du modèle par le fait qu'elles présentent à la fois une dépendance spatiale et temporelle.

Le modèle considère des externalités de voisinages dites 'périurbaines' (Cavailhès et al., 2003). Ainsi, l'accent y est mis sur les interactions ménages-agriculteurs, génératrices de mixité et de non-contiguïté du bâti comme on l'a vu dans les exemples précédents. Par hypothèses, les migrants périurbains choisissent une localisation en sachant d'une part le coût des navettes quotidiennes en chaque lieu, et d'autre part la qualité du voisinage de chaque lieu. Le choix résidentiel dans ce modèle est un compromis entre quatre éléments : le coût de transport, la surface du logement, la quantité d'interactions sociales locales (ou de biens publics de voisinage) et la 'verdurisation' du paysage local³. Les deux premiers éléments sont fonctions de la distance au centre d'emploi, tandis que les deux derniers sont fonctions de la densité de résidents (ou inversement de la densité de champs agricoles) dans le voisinage. La densité résidentielle locale est une variable endogène qui est calculée à chaque période de temps sur base de la configuration spatiale au temps précédent. C'est par le double effet des forces d'agglomération-dispersion par rapport au centre urbain et des forces d'agglomération-dispersion à l'échelle des voisinages, que sont générées des configurations toujours concentriques mais discontinues.

1. Le comportement résidentiel

Le modèle s'inspire du modèle monocentrique standard auquel s'ajoute deux types d'externalités de voisinage : des externalités « vertes » et des externalités de type « biens publics locaux » qui toutes les deux varient à travers l'espace en fonction de la densité des lieux. Le modèle couple donc le modèle « Neighborhood goods » (Fujita, 1989, p.200) avec le modèle « Crowding externalities » (Fujita, 1989, p.227). L'écriture des externalités est similaire à celle proposée par Fujita, si ce n'est que la densité locale (ρ) pour une distance donnée n'est pas une caractéristique du point uniquement mais est calculée au sein d'un voisinage autour du point. Les bornes de ce voisinage sont $d-v$, $d+v$.

³ Pour reprendre une terminologie relative aux biens publics locaux, nous considérons dans notre modèle des externalités de « supervoisinages » : *"If the benefits of a public good are confined within a city but vary among neighborhoods in the city, we call it a superneighborhood good"* (Fujita, 1989, p.177).

Contrairement à Caruso *et al.* (2004), le modèle présenté ici ne suppose pas une taille de lot constante. Dès lors (comme chez Fujita) la densité locale (ρ) est une densité de population et non pas une densité d'utilisations du sol. La population et la consommation de logement peuvent varier d'un lieu à l'autre. L'élasticité de la consommation de logement (α) est alors également un paramètre supplémentaire.

Tous les individus sont identiques. Ils obtiennent un revenu Y au CBD et paient un coût de navette qui croît de façon linéaire avec la distance (a est le coût unitaire de transport). Le programme des ménages s'écrit

$$[1] \quad \begin{aligned} \max \quad & U(Z, H, E(d), S(d)) = kZ^{1-\alpha} H^\alpha E^\beta S^\gamma \\ \text{s.c.} \quad & Z + R(d)H = Y - ad \end{aligned}$$

avec $k = \alpha^{-\alpha} (1 - \alpha)^{\alpha-1}$ (ce qui simplifie l'écriture de la rente foncière plus loin), $\alpha \in]0,1[$ et β et γ positifs. $E(d) \equiv E[\rho(d)]$ et $S(d) \equiv S[\rho(d)]$ sont respectivement l'externalité verte, décroissante avec la densité ($dE/d\rho < 0$), et l'externalité de biens publics, croissante avec la densité ($dS/d\rho < 0$). Z est la consommation d'un bien composite dont le prix est unitaire. H est la consommation de logement et $R(d)$ la rente foncière. La densité de ménages dans le voisinage d'un lieu est donnée par

$$[2] \quad \rho_d = \frac{\sum_{d-\nu}^{d+\nu} H_d^{-1}}{2\nu + 1}$$

Les fonctions d'externalités sont choisies de façon à ce que l'externalité verte soit de forme convexe et celle des biens publics soit concave.

$$[3] \quad E_d = e^{-\rho_d} \quad \text{et} \quad S_d = e^{\rho_d^{1/2}}$$

A l'optimum, les demandes pour les biens Z et H sont

$$[4] \quad \hat{Z}_d = (1 - \alpha)(Y - ad)$$

$$[5] \quad \hat{H}_d = \alpha(Y - ad)R_d^{-1}$$

et l'utilité indirecte

$$[6] \quad V_d = (Y - ad)R_d^{-\alpha} E_d^\beta S_d^\gamma$$

Les ménages qui migrent dans la ville sont alors prêts à offrir l'enchère foncière suivante pour se placer en une cellule d et obtenir le niveau d'utilité u .

$$[7] \quad \Psi_d = (Y - ad)^{1/\alpha} u^{-1/\alpha} E_d^\beta S_d^\gamma$$

2. La dynamique de conversion résidentielle

On considère une ville en croissance. L'espace et le temps sont discrets et le taux de conversion de l'espace agricole est donné : 1 cellule peut être développée de chaque côté du CBD à chaque période. Les individus qui entrent dans la ville à un moment donné choisissent une localisation parmi toutes celles qui sont encore agricoles. Le choix se fait de manière à maximiser l'utilité. Cette utilité est comparée à celle du reste du monde, le surplus étant un incitant à la migration. Lorsqu'il effectue son choix en t , un ménage considère uniquement la structure de la ville en $t-1$. Il considère à la fois la distance au CBD et l'apport en externalités de voisinage de chaque lieu. Le système est donc séquentiel et intègre une « dépendance de chemin ».

On suppose qu'à chaque période, il existe au moins deux cellules agricoles équivalentes. Dès lors, un ménage qui est seul à migrer en t peut faire jouer la concurrence entre les propriétaires fonciers. Il obtiendra une cellule en ne payant que la rente agricole et empoche le surplus d'utilité. Pour maximiser ce surplus, il se localise donc là où son utilité est la plus élevée. De façon équivalente on peut postuler la présence d'un promoteur immobilier monopoleur qui maximise l'ajout de rente foncière en chaque t . La nouvelle cellule développée est alors celle qui maximise l'enchère de réserve.

La ville est ouverte, dès lors, c'est le dernier migrant qui fixe l'utilité u^t de tous les ménages présents dans la ville. Les propriétaires fonciers, myopes également, adaptent immédiatement la rente et la taille des lots déjà occupés en fonction de cette utilité mais aussi en fonction des changements advenus au voisinage de chaque localisation. Cette hypothèse est nécessaire pour éviter les migrations internes et donc l'abandon ou le retour de cellules développées à l'agriculture.

Enfin, la rente foncière en chaque temps est donnée par

$$[8] \quad R_d^t = \begin{cases} \Psi_d^t = (Y - ad)^{1/\alpha} u^{t-1/\alpha} E(\rho_d^{t-1})^\beta S(\rho_d^{t-1})^\gamma & \text{en toute cellule déjà urbanisée en } t-1 \\ \Phi & \text{pour la nouvelle cellule urbaine et les cellules agricoles en } t \end{cases}$$

III. CONFIGURATIONS ESPACE-TEMPS ET SENSIBILITE

Dans cette partie, nous présentons les résultats de diverses analyses de sensibilité. En premier lieu, nous procédons à une analyse de diagrammes espace-temps résultant d'une variation des préférences pour les externalités et de la taille des voisinages. Nous analysons ensuite le profil des rentes foncières et de la taille des lots en fonction de la distance et du temps. En troisième lieu, nous analysons l'effet d'une modification du revenu, du coût unitaire de transport et de la préférence pour la taille des logements. En quatrième lieu nous montrons l'effet qu'aurait une restriction de type « ceinture verte » sur le développement de la ville.

1. L'effet de la préférence pour les faibles densités et de la taille du voisinage

Lorsqu'aucune externalité de voisinage n'est considérée dans le modèle, chaque cellule se différencie des autres uniquement par le coût de transport. Pour maximiser son utilité, un ménage va toujours choisir de se localiser sur la cellule agricole non encore développée la plus proche du CBD. Le ménage qui migre au temps 1 va se placer immédiatement à côté du CBD. Le second se placera à côté du précédent et ainsi de suite. Si l'on suppose que le

processus est identique de chaque côté d'un CBD situé au centre d'un segment de droite de longueur 2×100 , l'évolution de la ville au cours du temps peut alors être représentée par un triangle isocèle de base 2×100 et de hauteur 100. Il représente une croissance urbaine concentrique et compacte. Au temps 100, tout l'espace est occupé et homogène, les 200 cellules de la base sont noircies (voir figure 3 première ligne).

Si nous introduisons des externalités, le triangle se transforme, le remplissage de la ville se fait de manière différente notamment par « leapfrogs ». La figure 3 présente de haut en bas un accroissement de la préférence (β) pour la verdure ou les faibles densités de population dans le voisinage. De gauche à droite, nous augmentons la taille du voisinage (ν), c'est à dire l'horizon spatial considéré par les ménages dans leur recherche d'aménités. Le niveau de la rente agricole (ou de manière équivalente l'utilité externe) est donné de façon à être très inférieur au revenu résidentiel. Du coup, rien n'empêche l'urbanisation complète du segment. La base du diagramme est à chaque fois composée de 200 cellules noires⁴ de manière semblable aux automates élémentaires homogènes. Néanmoins, des structures apparaissent au cours du développement urbain.

Soit s , la pente de l'enveloppe du diagramme. s est un indicateur de la vitesse, V , de l'expansion urbaine (ou vitesse de la limite externe de la zone de navettes). Dans le cas d'une croissance uniforme sans externalité et sans discontinuités, $s=45^\circ$ et $V=\cotg s = 1$, soit la croissance donnée de façon exogène pour chaque côté du segment. Au plus l'externalité « verte » est importante, au plus la pente de l'enveloppe est faible et donc au plus la zone de navettes s'étend rapidement.

L'enveloppe externe des diagrammes est toujours linéaire ou concave. Cela indique que le taux d'expansion de la zone des navettes est soit constant, soit décroissant. Plus précisément, puisque les ruptures de continuité de bâti sont générées par un effet de voisinage et puisque les voisinages sont de taille fixe un résident n'a jamais intérêt à se localiser à une distance d'une cellule bâtie plus grande que son voisinage. Le « leapfrog » maximal est fixé par ν . La vitesse maximale de l'expansion urbaine est donc atteinte lorsque β est élevé et force alors chaque individu qui rentre à se localiser le plus loin possible d'un autre. Sur la figure 3, nous observons que la vitesse maximale est atteinte et reste constante lorsque $\beta=2$ pour les deux plus petits voisinages (2 premières colonnes, où $V = \nu + I$, et la pente s est donc respectivement de $26,57^\circ$ et $18,43^\circ$). Elle est atteinte et reste constante avec $\beta=3$ lorsque le voisinage compte 7 cellules ($s=14,04^\circ$) et pas encore tout à fait lorsque le voisinage est plus grand (la forme globale est légèrement concave). La vitesse de l'expansion urbaine est donc fonction du taux de croissance donné mais aussi de la taille des voisinages et de l'importance de β .

Au sein de cette enveloppe, nous pouvons distinguer des structures locales de densités différentes. Au plus le voisinage est large, au plus la diversité des structures est grande. Ainsi, 2 types de structures sont observées dans la première colonne alors qu'il y en a respectivement 3, 4 et 6 dans les colonnes suivantes. Dans le premier cas en effet, les résidents se localisent soit de manière compacte, soit en laissant une cellule d'écart. Dans les autres cas, la taille des voisinages laissent d'autres possibilités.

⁴ Ce n'est pas exactement vrai sur le graphique car les images ont été coupées de manière à éviter de effets de bords lorsque la limite externe du segment est trop proche. Les diagrammes ne vont donc que jusque $t=95$.

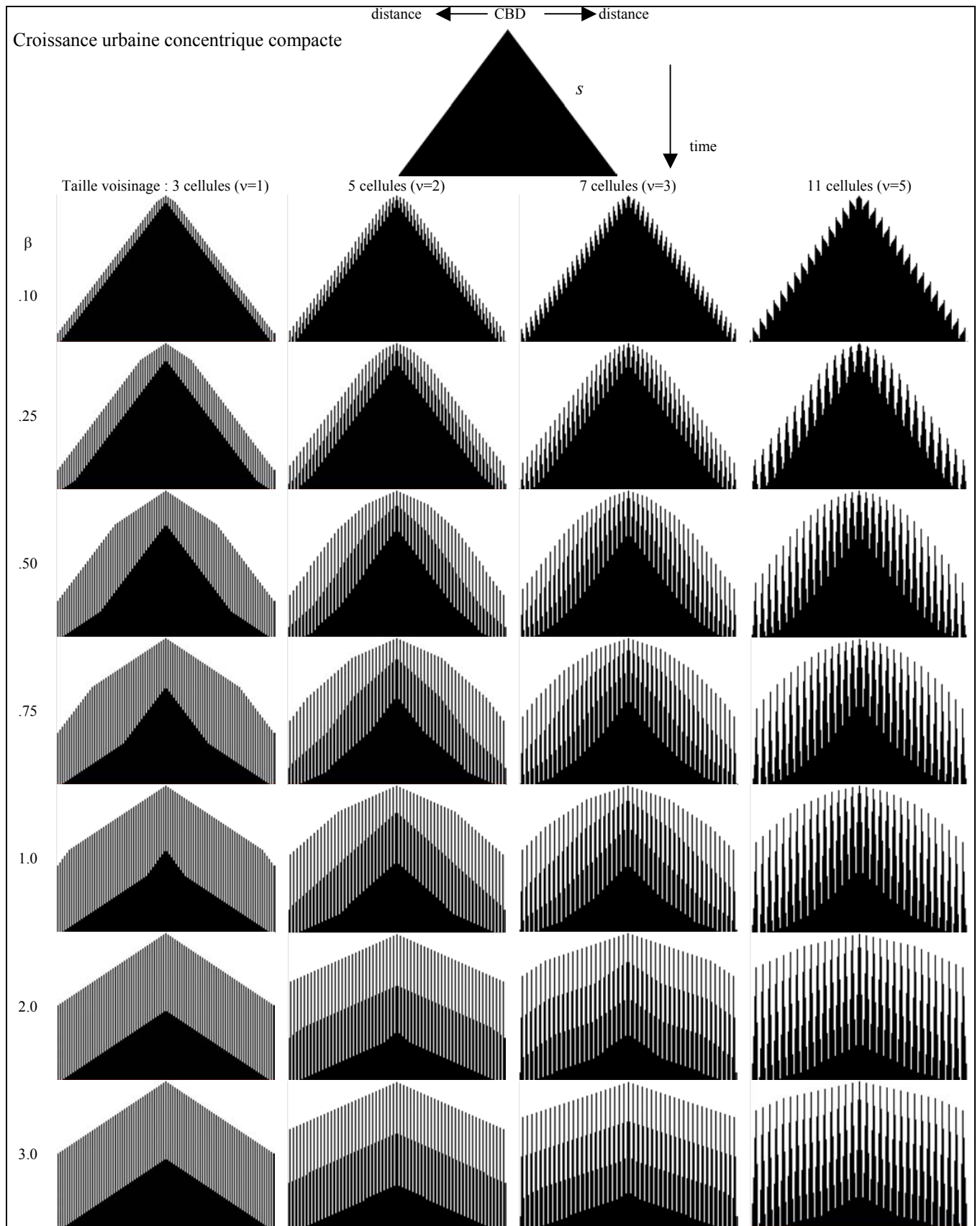


Figure n° 3 : Diagrammes espace-temps et variation de la préférence pour les faibles densités locales et de la taille des voisinages considérés

La forme des sous-enveloppes délivre alors une information sur la vitesse d'expansion des différents modes (densités) d'habitat. Par exemple, la concavité des sous-enveloppes de faible densité indique une décélération de l'expansion de ce type de structures. Au contraire, la convexité des cônes noirs montre l'accélération au cours du temps du développement compact (non mixte) de la ville. Celle-ci est en effet d'autant plus rapide qu'elle n'a plus qu'à remplir les espaces agricoles interstitiels du périurbain laissé vides au préalable.

Finalement, nous retiendrons qu'en intégrant des externalités vertes dans les préférences des agents, le développement compact de la ville par accumulation de résidents à la frange se transforme en un développement discontinu de la ville laissant des espaces ruraux interstitiels qui se remplissent à leur tour lorsque l'extension maximale de la ville est atteinte. L'apparition de la forme compacte de la ville est retardée d'autant plus que les résidents préfèrent les faibles densités locales et lorsque les voisinages ont une taille plus importante.

2. Equilibre de long terme et évolution des rentes foncières et de la taille des logements

Dans les exemples précédents, nous observons une complète urbanisation du segment car soit le revenu des ménages est énorme, soit l'utilité externe est très faible, soit encore la rente d'opportunité du sol est quasiment nulle. Ici, les paramètres⁵ sont choisis de manière plus « réaliste » afin de pouvoir visualiser un équilibre de long terme. Nous définissons les paramètres de façon à obtenir une frange urbaine classique (hors externalité) à une distance 50 du CBD. Dans ce cas, comme le montre le diagramme espace-temps de la figure 4a, 50 est aussi le temps qu'il faut pour atteindre l'équilibre de long terme (indiqué par t^*). Puisque un individu peut rentrer à chaque période de chaque côté du CBD, il y a 100 cellules occupées en t^* .

La rente foncière est décroissante à chaque période de temps et en t^* ($t50$), elle correspond exactement à l'enchère de réserve du modèle standard de l'économie urbaine. Au fur et à mesure du temps, elle augmente du fait de l'augmentation de la population et de la diminution de l'utilité, elle même consécutive à l'accroissement de la longueur des navettes à la frange de la ville. La taille des logements consommés effectue le chemin inverse, on a donc un accroissement de la densité d'occupation de chaque cellule au fur et à mesure de la croissance urbaine.

En présence d'externalités de voisinage vertes (goût pour les faibles densités de population), l'équilibre t^* est atteint plus tôt. La ville est moins urbanisée. Par contre l'équilibre de long terme n'est plus une ville compacte. Au plus proche du centre, l'espace est urbanisé de façon continue mais au delà des développements disjoints apparaissent. Nous pouvons même remarquer que les interstices ruraux ne sont ni constants ni immédiatement croissants avec la distance. La tranche t^* présentée en bas des graphiques 4b le montre bien. Ce résultat n'est pas trouvé lorsque les agents considèrent une densité d'occupation du sol (comme dans Caruso et al, 2004) plutôt qu'une densité de population dans les externalités de voisinages. A deux dimensions, les structures spatiales sont donc susceptibles d'être plus complexes que celles présentées en figure 2. Dans le périurbain, la proximité de l'espace complètement compact se double ici d'une proximité de densités intra-cellulaires plus fortes. Les individus compensent alors par une disjonction de leur habitation. Les suivants peuvent ensuite se permettre de se regrouper plus.

⁵ $Y=10$, $a=0.12$, $\Phi=1$, $u=4$, $\alpha=0.25$, $\beta=0.00$ (en 4a) $=0.50$ (en 4b et 4c), $\gamma=0.00$ (en 4a et 4b) $=0.40$ (en 4c), et $v=5$

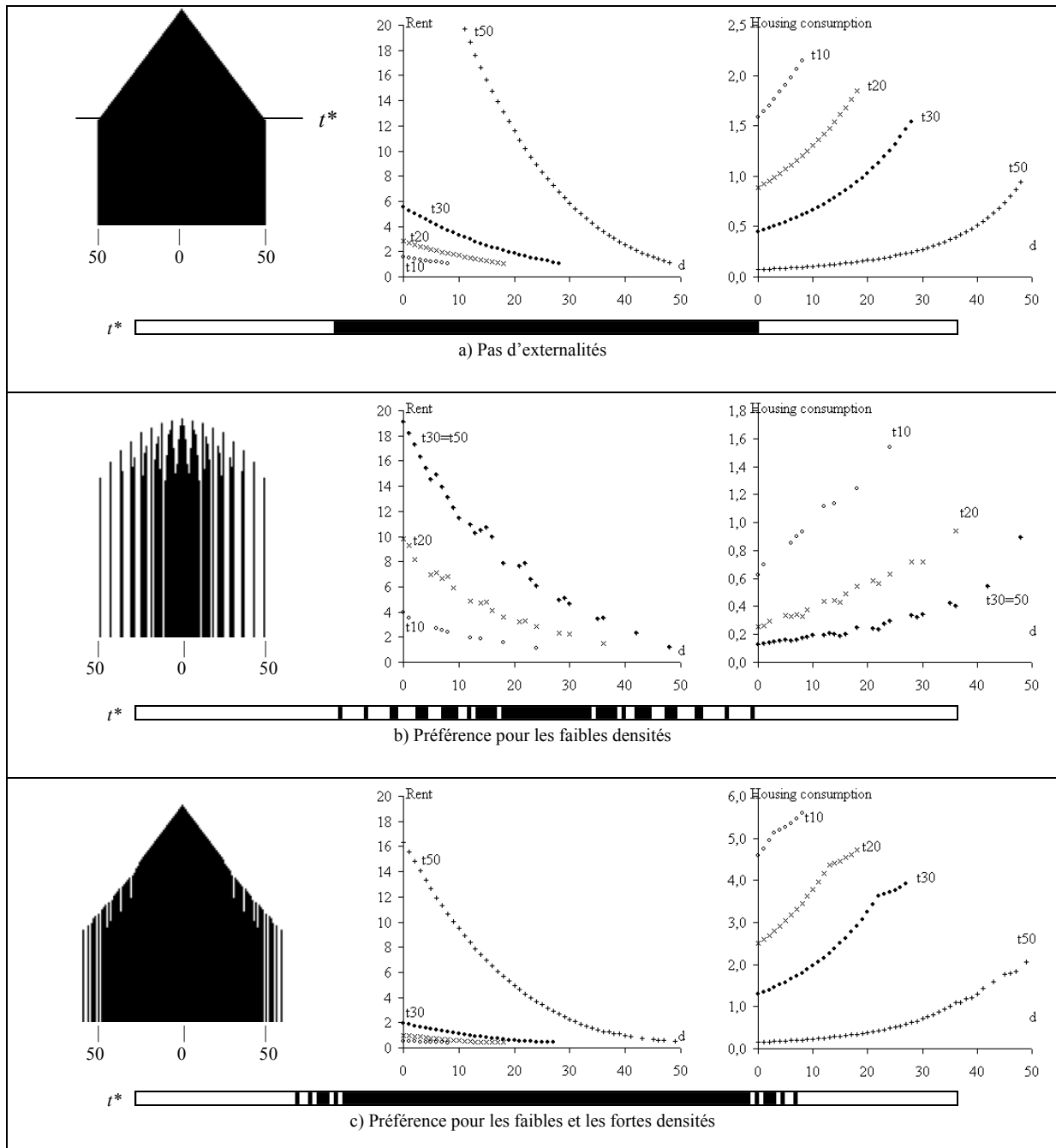


Figure n° 4 : Diagrammes espace-temps et évolutions des rentes et consommations de logement

En ce qui concerne les rentes foncières, nous voyons qu'elles continuent à augmenter du fait de la croissance de la population comme en figure 4a, mais d'autre part, elles sont aussi réévaluées localement à la hausse ou à la baisse en fonction des changements qui adviennent dans le voisinage de chaque localisation. Dès lors, les rentes sont discontinues du fait de la présence d'agriculteurs mais en plus il y a des inversions locales du profil. Pour les localisations très proches du CBD, les rentes sont plus faibles que dans le cas précédent puisque les ménages donnent une valeur à la verdurisation de leur voisinage alors qu'ils se trouvent dans une zone complètement urbanisée.

Enfin dans le troisième cas (figure 4c), les ménages expriment une préférence pour les biens publics locaux, liés à la densification des voisinages. Cette préférence reste toutefois plus faible que la préférence pour les espaces ouverts. A l'équilibre, nous trouvons comme dans le cas précédent un espace mixte avec des résidences disjointes du centre compact. Il est intéressant ici de constater que ces leapfrogs n'interviennent qu'après un certain temps dans la croissance de la ville. Sous réserve de vérification des hypothèses posées, cela tendrait à indiquer qu'il y a une taille minimale de ville à atteindre avant de voir l'émergence d'un espace périurbain mixte en périphérie.

Les fonctions de lot résidentiel en la distance présentent également une forme particulière (moins perceptibles sur les rentes). La croissance de la taille des lots s'écrase dans l'espace périurbain. Les ménages périurbains peuvent en effet compenser cette perte relative par une verdurisation plus importante du voisinage, ce que les ménages « suburbains » qui ont été englobés dans l'agglomération compacte ne peuvent pas faire. Toutes choses étant égales, nous constatons que la taille des lots fonciers est également plus grande en présence de ces externalités d'agglomérations locales, quels que soient le lieu et la période.

3. Effet transport, revenu et élasticité de la consommation de logement

Pour cette troisième analyse, nous repartons du cas présenté en figure 4b (externalités vertes seulement) et faisons varier de +/- 30 % Y , a et α .

Sans surprise, nous pouvons d'abord constater qu'une augmentation du revenu ou une diminution du coût unitaire de transport accroît la taille de la ville et retarde donc l'équilibre de long terme (deux premières colonnes de la figure 5). C'est l'effet classique de suburbanisation.

Par ailleurs, nous constatons également que l'effet revenu et l'effet coût de transport ne sont pas équivalents en termes spatiaux. En effet, en comparant les situations $-30\% a$ et $+30\% Y$, nous remarquons d'abord que l'extension maximale de la ville est atteinte plus rapidement dans le premier cas que dans le second. La pente de l'enveloppe globale du diagramme est plus forte lorsque l'on considère l'augmentation du revenu. L'augmentation de revenu conduit effectivement à une croissance de la partie compacte de la ville tandis que l'espace mixte est rejeté en périphérie, sa taille variant peu. La diminution du coût de transport se fait par contre au bénéfice de la partie périurbaine mixte qui s'accroît pour une zone centrale compacte de taille constante. Suivant la même logique, nous pouvons également constater que lorsque le revenu est faible ($-30\% Y$), le centre aggloméré peut disparaître complètement laissant place uniquement à un espace mixte, alors que ce n'est pas le cas lorsque le coût de transport est élevé ($+30\% a$).

Enfin, en faisant varier la préférence pour la taille des logements (α), l'effet sur l'expansion urbaine est très faible. Par contre, la population n'est pas constante. L'augmentation de α conduit à une croissance de la partie compacte de la ville au détriment de l'espace périurbain. A l'inverse lorsque α est faible, la partie compacte de la ville peut disparaître. Ce résultat peut paraître contre intuitif. Toutefois, rappelons que dans le cas présenté ici il n'y a aucun désir d'agglomération des résidents si ce n'est par le fait de la distance au CBD. Dès lors toute autre chose étant égale, une augmentation de α conduit à donner une importance relative moindre aux externalités « vertes » et donc à un espace plus compact.

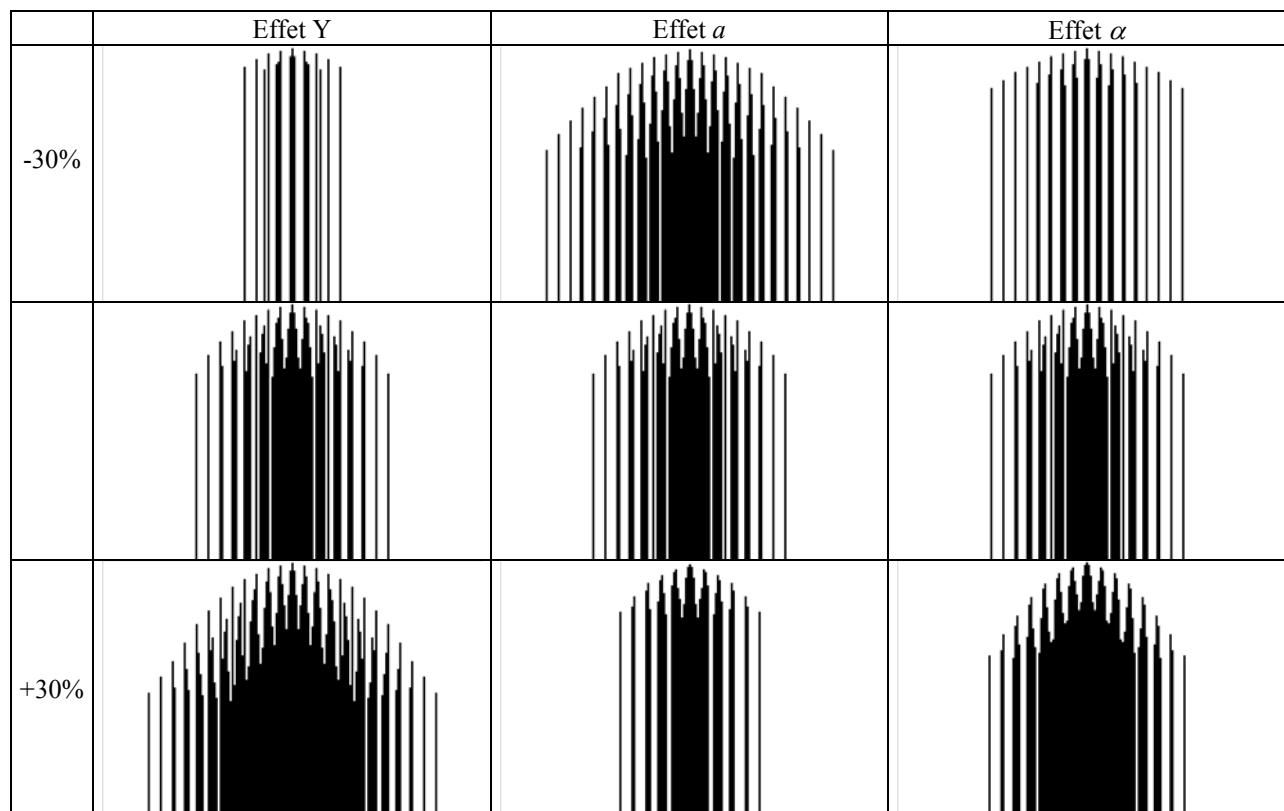


Figure n° 5 : Diagrammes espace-temps et variation de Y , a et α

4. Exemple de politique spatiale : l'effet d'un Green Belt

Dans ce quatrième exemple, nous forçons le trait en augmentant le poids des deux externalités dans la fonction d'utilité ($\beta=5$ et $\gamma=3$). Le but est de montrer comment la méthode pourrait être utilisée pour explorer des scénarios de politiques d'aménagement du territoire lorsque l'on sait que la qualité des voisinages est fortement considérée par les ménages dans leur décision de localisation.

Nous modélisons la mise en place d'une zone verte non constructible à une distance donnée du CBD (entre les distances 30 et 40). Ceci peut par exemple refléter l'impact des Green Belts instaurés autour des villes anglaises, ou encore du Green Heart de la Randstad. La provision d'« open space » est en effet, aujourd'hui encore, une politique « anti-sprawl » souvent préconisées. De la même façon, la zone verte non constructible peut également rendre compte d'une externalité naturelle exogène dont seuls les voisins proches peuvent bénéficier.

De la simple exploration à la figure 6, il ressort que le Green Belt provoque bel et bien une densification de l'habitat pour les aires les plus proches de ses bords interne et externe. Il n'a par contre aucun effet sur la densification des zones plus centrales. Nous remarquons également qu'au cours de la croissance, ce n'est qu'après avoir densifié l'espace à la bordure interne du Green Belt que des ménages sautent au delà du Green Belt et acceptent un coût de navettes plus important.

Une telle politique semble donc capable à court terme d'enfermer le développement résidentiel. De plus, nous constatons à travers ce modèle que les développements résidentiels

qui prennent ensuite place au delà de la zone protégée tendent à être plus groupés. L'équilibre de long terme présente en effet un mitage de l'espace rural lointain moins important, constitué d'un nombre moindre de développements mais dont la taille est plus importante.

Du point de vue des rentes foncières, le Green Belt a pour effet d'inverser le profil à l'approche de la zone protégée (le profil étant déjà lui même discontinu du fait de la présence de fortes externalités de voisinage et de la variation des densités de population au sein des voisinages). La rente est par contre réduite dans l'espace situé entre le CBD et le Green Belt. La baisse de la rente est particulièrement sévère pour les localisations proches du CBD. L'effet sur la taille des lots consommés est inverse, les logements sont plus grands à proximité du CBD lorsque la zone protégée est mise en place.

Il faut toutefois rester très prudent sur ces quelques conclusions avant de décider de l'impact positif ou négatif d'un Green Belt. Comme le suggèrent Wu et Plantinga (2002) dans une analyse similaire, il conviendrait de tester l'effet de la taille du Green Belt et de sa proximité au CBD en relation avec le niveau des externalités offertes et le coût de transport.

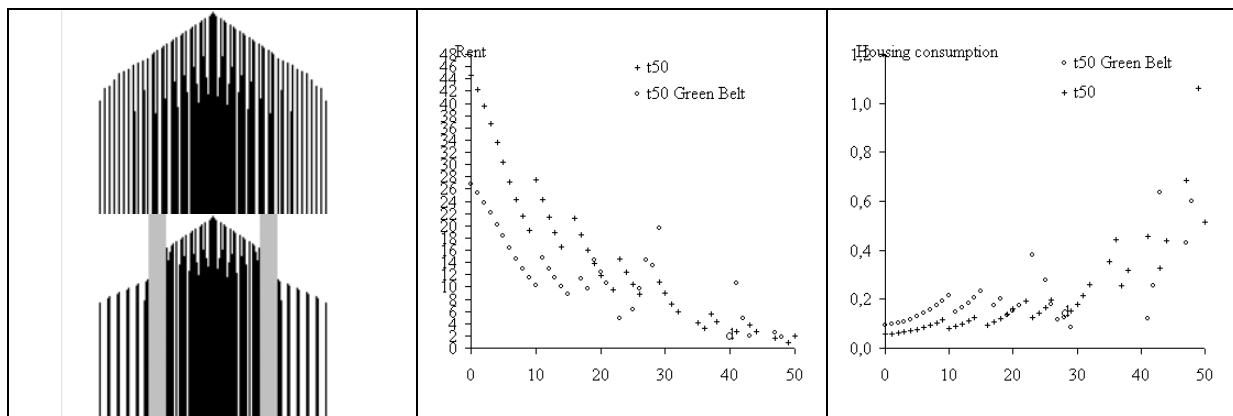


Figure n° 6 : Effet d'un 'Green Belt' (distance 30 à 40) en présence d'externalités de voisinages importantes

IV. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons exploré les mécanismes de la croissance résidentielle au sein d'un espace initialement rural, à l'aide d'un outil de simulation inspiré des automates cellulaires mais pour lequel des fondements microéconomiques ont été définis. Notre analyse a porté principalement sur la dynamique des structures spatiales. Dès lors contrairement à la plupart des modèles d'automates cellulaires nous avons considéré ici une seule dimension spatiale. La dynamique des structures (péri)urbaines a essentiellement été appréhendée par le biais de diagrammes espace-temps, mais aussi par le biais d'une analyse graphique des rentes et lots fonciers.

Le modèle utilisé postule que les ménages se localisent de façon séquentielle dans une ville monocentrique et donnent de la valeur à deux types d'externalités. Ces externalités dépendent de la densité de la population au sein d'un voisinage donné mais fonctionnent en sens inverse l'une de l'autre. Nous avons d'abord pu décrire la vitesse et le mode de remplissage de l'espace par l'urbanisation en fonction des préférences des ménages pour les aménités vertes et en fonction de la taille du voisinage pris en compte.

Dans un second temps nous avons examiné l'apparition d'un équilibre de long terme dans lequel on retrouve à la fois un centre aggloméré et une périphérie mixte. L'importance de la discontinuité du bâti en périphérie n'est pas directement liée à la distance au centre. De plus, les discontinuités et variations des densités de voisinage provoquent des inversions locales du profil des rentes foncières. En présence de biens publics locaux ou d'externalités sociales de voisinage, l'analyse suggère notamment que la ville doit atteindre une certaine taille avant de s'entourer d'une périphérie mixte.

Dans un troisième temps, les effets revenu et coût de transport ont été comparés. L'augmentation du revenu conduit à un espace central plus compact et fait reculer la ceinture périurbaine, tandis que la diminution du coût des navettes augmente la taille de l'espace mixte. Enfin, si l'utilité des ménages est plus fortement liée à la consommation de leur logement qu'à la qualité du voisinage, la ville tend à être plus classique et donc compacte.

Enfin, la quatrième analyse nous a permis de constater que la méthode peut potentiellement être utile pour évaluer des politiques spatiales qui viseraient par exemple à réduire le mitage de l'espace rural par la croissance résidentielle.

BIBLIOGRAPHIE

- BATTY, M., COUCLELIS, H., EICHEN, M. (1997) "Urban systems as cellular automata" *Environment and Planning B*, 24, 159-164.
- BRUECKNER, J.K. (2000a) "Urban sprawl: diagnosis and remedies" *International Regional Science Review*, 23, 2, 160-171.
- BRUECKNER, J.K. (2000b) "Urban Growth Models with Durable Housing: An Overview" in THISSE, J. F. et HURIOT, J. M. *Economics of cities : theoretical perspectives*. Cambridge, Cambridge University Press, p.263-289.
- CAMAGNI, R., GIBELLI, M. C., RIGAMONTI, P. (2002) "Urban mobility and urban form: the social and environmental costs of different patterns of urban expansion" *Ecological Economics*, 40, 2, 196-216.
- CARUSO, G. (2002) "Figures de la périurbanisation en Europe" in Perrier-Cornet, P. (dir.) *Repenser les Campagnes*. p.67-99. Aube, Datar.
- CARUSO, G., PEETERS, D., CAVAILHÈS, J., ROUNSEVELL, M. (2004) "Spatial configurations and cellular dynamics in a periurban city" Paper submitted.
- CAVAILHÈS, J., PEETERS, D., SEKERIS, E., THISSE, J-F. (2003) "La ville périurbaine" *Revue Economique*, 54, 1, 5-23.
- COUCLELIS, H., (1985) "Cellular worlds: a framework for modelling micro-macro dynamics". *Environment and Planning A* 17, 585-596.
- EUROSTAT (1999) *Les zones densément peuplées dans l'union européenne : essai de délimitation et de caractérisation des agglomérations urbaines*. Statistiques en Bref, Statistiques Générales, Thème1-2, 8p.
- FUJITA, M. (1989) *Urban Economic Theory. Land use and city size*. Cambridge, Cambridge University Press, 366 p.
- GALSTER, G.C., HANSON, R., RATCLIFFE, M.R., WOLMAN, H., COLEMAN, S., FREIHAGE, J. (2001) "Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept" *Housing Policy Debate*, 12, 681-717.

- LANGTON, C. (1990) "Computation at the edge of chaos: Phase transitions and emergent computation" *Physica D*, 42, 12-27.
- MIYAO, T. (1987) "Dynamic urban models" in MILLS, E.S. (ed.), *Handbook of Urban and Regional Economics*. p.877-926. Vol2. North-Holland, Amsterdam.
- NOWAK, M. A., MAY, R. M. (1992) "Evolutionary games and spatial chaos" *Nature*.359, 826-829.
- SCHELLING, T. C. (1978) *Micromotives and Macrobehavior*. WW Norton and Company, New York.
- THOMAS, I., FRANKHAUSER, P., DE KEERSMAECKER, M-L. (2004) "Fractal dimension versus density of the built-up surfaces in the periphery of Brussels" ERSA conference, Porto, September 2004.
- TOBLER, W.(1979) "Cellular geography" in GALE, S OLSSON, G. (ed.), *Philosophy in geography*. Vol. 9. Reidel, Dordrecht, pp. 379-386.
- TORRENS, P., ALBERTI, M. (2001) "Measuring sprawl" Working Paper 27, Centre for Advanced Spatial Analysis, University College of London.
- VANDERMOTTEN C, VERMOESEN, F., DE LANNOY, W., DE CORTE, S. (1999) "Villes d'Europe, cartographie comparative" *Bulletin du Crédit Communal*, 207-208.
- WEBSTER, C. J., WU, F. (2001). Coase, spatial pricing and self-organising cities. *Urban Studies* 11, 2037-2054.
- WHITE, R., ENGELEN, G. (1997) "Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling" *Environment and Planning B*. 24, 235-246.
- WOLFRAM, S. (1984) "Universality and complexity in cellular automata" *Physica D.*, 10, 1-35.
- WOLFRAM, S. (2002) *A new kind of science*. Champaign Il, Wolfram media, 1197 p.
- WU, F. (2003) "Simulating temporal fluctuations of real estate development in a cellular city" *Transactions in GIS*, 7, 2, 193-210.
- WU, J., PLANTINGA, A.J. (2002) "Open space policies and urban spatial structure" World Congress of Environmental and Resource Economists, Monterey, California, June 2002.
- YACOVISSI, W., KERN, C.R. (1995) "Location and history as determinants of urban residential density" *Journal of Urban Economics*, 38, 207-220.