



**HAL**  
open science

# La formalisation du changement dans trois modèles de dynamique urbaine: une étude comparative

Denise Pumain, Lena Sanders

► **To cite this version:**

Denise Pumain, Lena Sanders. La formalisation du changement dans trois modèles de dynamique urbaine: une étude comparative. *Revue d'économie régionale et urbaine*, 1992, 5, pp.773-794. halshs-01565237

**HAL Id: halshs-01565237**

**<https://shs.hal.science/halshs-01565237>**

Submitted on 19 Jul 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## LA FORMALISATION DU CHANGEMENT DANS TROIS MODELES DE DYNAMIQUE URBAINE : UNE ETUDE COMPARATIVE

Denise Pumain (INED, Paris) et Lena Sanders (CNRS, Paris)

(étude réalisée avec le concours de la Division des Affaires Scientifiques de l'OTAN, n°860105)

Une des questions majeures posées à la géographie et à l'économie régionale contemporaines est de pouvoir comprendre et prédire le changement dans les unités spatiales ou les entités géographiques. Nous nous intéresserons ici à un aspect de ce changement, qui est celui de la répartition ou de la distribution des populations et des activités entre les différentes zones constitutives d'un système spatial. Nous cherchons à caractériser cette dimension proprement géographique de la dynamique des systèmes sociaux. L'introduction dans les sciences humaines du paradigme de l'auto-organisation, des théories des structures dissipatives dans des systèmes ouverts situés loin de l'équilibre et de la synergetique, ainsi que le transfert des modèles dynamiques qui en dérivent ont suscité beaucoup d'espairs pour un progrès dans la description quantitative de la dynamique des systèmes spatiaux.

La richesse des concepts et l'aptitude des systèmes d'équations différentielles non linéaires à produire des évolutions contrastées, des bifurcations, voire du chaos, ont suscité une floraison d'articles et d'ouvrages (Wilson, 1981, Allen, 1978, Lung, 1987, Haken, 1977, Pumain, Sanders, Saint-Julien, 1989) et même la création d'une revue spécialisée (Socio-spatial dynamics, éditée par D. Dendrinos). Déjà, de nombreuses publications ont exploré avec enthousiasme la diversité des adaptations métaphoriques et analogiques, tandis que d'autres, plus nombreuses encore, ont perfectionné les outils mathématiques créateurs de bifurcations ou fauteurs de chaos. Deux exercices sont beaucoup plus rarement pratiqués : il s'agit de la vérification effective d'une correspondance entre les dynamiques simulées par les modèles et des évolutions réelles, ou encore de la comparaison des modèles entre eux. La multiplication de propositions théoriques non confrontées aux faits, ou bien la construction de modèles différents dont on ne se soucierait jamais de situer l'apport par comparaison avec d'autres, risquerait fort à terme de nous ramener dans la situation où nous nous trouvons naguère, lorsque nous en étions réduits à extraire une connaissance du rapprochement improbable d'incomparables monographies.

L'objet de cet article est de comparer ce qu'apportent à la formalisation de la dynamique spatiale trois modèles, qui ont été expérimentés sur des données réelles. Deux de ces modèles visent à simuler l'évolution de la répartition de l'activité économique entre les quartiers d'une grande agglomération urbaine. Il s'agit d'un modèle de P. Allen (Allen et al., 1982) et d'un modèle de A. Wilson (1981, Harris, Wilson 1978), qui ont déjà fait l'objet de comparaisons détaillées en termes de contenu du changement

urbain (Pumain, Saint-Julien, Sanders 1984, Lombardo et al. 1987). S'agissant ici plutôt de la nature de la dynamique incorporée dans les modèles, il a paru intéressant de confronter ces deux approches avec celle développée par Weidlich et Haag (1987) à propos des migrations interrégionales, et appliquée à l'évolution de la population d'un ensemble de villes (Haag et al. 1991). Bien que l'échelle géographique d'application soit différente, ce rapprochement éclaire les choix effectués pour formaliser le changement.

Les trois formes de modélisation évoquées sont parmi les principales actuellement disponibles pour modéliser le changement qualitatif urbain, c'est pourquoi il a semblé utile de procéder à cette comparaison. Sans détailler les composantes de chaque modèle, on a tenté d'identifier les principes qui leur sont communs, les aspects de la dynamique spatiale qu'ils prennent en compte et les limites de leurs approches respectives, qui tiennent en grande partie à une conception trop simplifiée du temps des villes.

### 1 - Les présupposés théoriques

Les théories physico-chimiques de l'auto-organisation, comme leurs prolongements dans les sciences biologiques, doivent beaucoup de leur succès actuel en sciences humaines au fait qu'elles réconcilient, dans le principe, la formalisation des systèmes qu'elles décrivent avec des caractéristiques tenues jusque là pour spécifiques des systèmes humains et auxquelles il fallait renoncer si on voulait les modéliser : unicité des histoires, irréversibilité du temps, discontinuités qualitatives associées à la continuité d'évolutions quantitatives, très grande ouverture des systèmes, absence des situations d'équilibre, dépendance et interaction entre les éléments, existence de plusieurs niveaux d'organisation ("échelles" géographiques) avec changement à chaque niveau de la nature des variables d'état pertinentes pour décrire le système.

Ces théories aident à décrire les structures spatio-temporelles de systèmes composés de sous-systèmes multiples, dont les éléments entretiennent des relations de coopération.

Elles se prêtent à la formalisation des systèmes spatiaux pour lesquels on a depuis longtemps repéré plusieurs échelles d'observation pertinentes : ainsi une ville peut être décrite à l'échelon microscopique comme un ensemble d'individus, d'acteurs (personnes, ménages, entreprises, collectivités locales...) dont les interactions constituent à méso-échelle des quartiers, les différences dans la composition élémentaire des quartiers définissant à l'échelle de la ville entière la configuration macroscopique de ce système spatial qu'est la ville. De même un réseau urbain peut-il être conçu comme un système constitué à méso-échelle de villes qui sont chacune composées d'un certain nombre de ménages, de personnes, de groupes ou d'entreprises en interaction.

Les théories de l'auto-organisation aident à concevoir la genèse et l'existence d'unités spatiales, d'entités géographiques repérables et comparables, de la manière suivante. Au niveau microscopique, l'évolution comporte de

très nombreuses fluctuations dans l'état des éléments (les acteurs, individus, ménages, entreprises du système géographique modifient leur statut, leur composition, leur localisation...), qui prennent chacun des décisions relativement libres par rapport à leur propre histoire, mais aussi en réaction avec la configuration du système dans lequel ils se situent, et avec les éventuelles perturbations venues de l'environnement extérieur au système considéré. La résultante macroscopique de toutes ces fluctuations individuelles ou locales pourrait revêtir une extrême diversité, faite de toutes les combinaisons possibles des destins individuels. Or dans la réalité, si une certaine diversité est observée, elle demeure remarquablement limitée par rapport à l'ensemble des configurations imaginables. Cette réduction des degrés de liberté du système provient des interactions, des relations de coopération (volontaires ou non) qui s'effectuent entre les éléments. Ces relations de coopération sont responsables des non-linéarités dans les trajectoires des variables qui décrivent l'état macroscopique du système.

Ces non-linéarités envoient ces trajectoires, parmi la multiplicité des possibles, vers des attracteurs correspondant à des configurations particulières et qui constituent des entités repérables : ainsi l'organisation centre-périphérie pour l'agencement des quartiers d'une ville, ainsi la hiérarchie parétienne des tailles de villes pour un réseau urbain peuvent être considérés comme des attracteurs sur la trajectoire de ces systèmes géographiques.

Par-delà l'irréductible unicité de chaque lieu dans sa configuration et dans son histoire, l'existence des "êtres géographiques" chers à Vidal de la Blache s'éclaire d'un jour intéressant, qui autorise la recherche du ou des attracteurs sous-jacents à cette configuration, et qui invite donc à formuler ce que l'on serait tenté d'appeler, improprement peut-être, des "lois" de la dynamique des systèmes géographiques, ou du moins les invariants de la dynamique spatiale.

Les trois modèles analysés partagent cette conception de la morphogénèse des entités spatiales urbaines comme résultant d'interactions, de relations de coopération entre les acteurs des villes, qui créent des inégalités dans l'espace et les redistribuent de temps en temps, plus ou moins brutalement. Cependant, ils ont aussi en commun d'être des modèles qui tendent vers l'opérationnel, qui ont l'ambition d'aider à explorer le devenir des villes dans un avenir relativement proche. Or dans la pratique, il est rare que l'on ait à observer la genèse d'un être géographique. Ce que l'on modélise le plus souvent consiste donc en sous-systèmes, urbains ou régionaux, assemblés selon un découpage qui paraît pertinent et qui n'est parfois que commode, pour former une "entité" géographique de niveau supérieur, que l'on isole plus ou moins artificiellement du contexte qui l'environne. Nous rappelons brièvement la formulation adoptée par chaque modèle, avant de rechercher quelles observations générales peuvent être énoncées quant à la dynamique des unités territoriales ainsi délimitées.



## 2 - Les trois modèles

Chaque modèle a fait l'objet de nombreuses présentations, nous n'en redonnerons ici que les principales équations, utiles à la comparaison.

A. Wilson modélise l'évolution de l'offre de services  $W_j$  dans les zones  $j$  d'une agglomération comme s'ajustant, avec une vitesse de réaction mesurée par un paramètre  $k$ , à l'écart entre l'offre existante  $W_j$  et l'offre potentielle assimilée à un multiple de la demande  $D_j$ :

$$\frac{dW_j}{dt} = (D_j - k W_j) \quad (1)$$

Cette demande  $D_j$  regroupe les flux de consommateurs  $F_{ij}$  issus des zones  $i$ , de population résidente  $P_i$ , qui se distribuent entre les zones  $j$  en fonction de l'attractivité relative de celles-ci. L'attractivité d'une zone  $j$  est elle-même fonction du volume de l'offre en  $j$   $W_j$ , affectée d'un paramètre  $\alpha$  qui mesure la sensibilité aux différences de taille des centres de services, et du coût du déplacement  $c_{ij}$  entre les zones  $i$  et  $j$ , avec un coefficient  $\beta$  de sensibilité à la distance:

$$D_j = \sum_i F_{ij} = \frac{\sum_i P_i W_j^\alpha e^{-\beta c_{ij}}}{\sum_i W_j^\alpha e^{-\beta c_{ij}}} \quad (2)$$

P. Allen décrit l'évolution de quatre types d'activités (deux activités de base, industrie et tertiaire fondamental ou "finances-assurances" (Allen, 1985), et deux activités induites, tertiaire local ou "élémentaire" et tertiaire régional ou "spécialisé") et de deux catégories de population résidente (ouvriers et cols blancs) entre les zones d'une agglomération. L'évolution de la quantité  $S_j^E$  d'emplois de types  $E$  dans une zone  $j$  dépend de la demande potentielle  $D_j^E$ , pondérée par l'attractivité relative de la zone  $j$ :

$$\frac{dS_j^E}{dt} = \left( 1 - \frac{S_j^E}{D_j^E} \frac{A_j}{\sum_{j'} A_{j'}} \right) \quad (3)$$

Dans le cas des deux activités exportatrices, la demande  $D_j$  est d'origine extérieure, dans le cas des deux activités induites elle est calculée à partir de la population locale. L'attractivité  $A_j$  est fonction de la situation relative de la zone dans l'agglomération et de paramètres qui définissent la propension à l'agglomération  $\rho^E$ , la sensibilité aux effets de congestion  $\psi^E$ , et la sensibilité  $z^E$  à la disponibilité d'espace par rapport à l'espace déjà occupé  $L_j$ :

$$A_j = \frac{(1 + \rho^E S_j^E) (1 - \psi^E S_j^E) \cdot z^E}{(1 + K_j^E) (z^E + L_j)} \quad (4)$$

La situation relative est définie par un paramètre d'accessibilité  $\alpha_j$  modulé par une sensibilité aux coûts de transport  $\phi^E$  pour les activités de base ( $K_j^E = \alpha_j \phi^E$ ) et

par la distance  $d_{ij}$  aux consommateurs pour les activités induites ( $K_{ij}^E = \phi E d_{ij}$ ). Dans le cas des populations résidentes, c'est la distance domicile-travail, assortie d'un paramètre  $\beta$  de sensibilité aux coûts de transport, variable selon les sous-populations, qui caractérise la situation des zones dans l'équation de l'attractivité.

Le modèle de Weidlich et Haag est conçu pour décrire l'évolution de la répartition de la population urbaine entre un nombre  $L$  de villes qui ont chacune une population  $n_i$ . Une équation maîtresse exprime l'évolution de la probabilité d'une configuration particulière du système de villes, représentée par le vecteur  $(n_1, n_2, \dots, n_L)$ . On utilise dans les applications le processus déterministe associé à ce processus stochastique grâce à l'équation aux valeurs moyennes, qui relie l'évolution de la population  $n_i$  d'une ville  $i$  à la probabilité individuelle  $p_{ik}$  de migrer d'une ville  $k$  à la ville  $i$ :

$$\frac{dn_i(t)}{dt} = \sum_k n_k p_{ik} - \sum_k n_i p_{ki} \quad (5)$$

Cette probabilité individuelle est considérée comme dépendant d'un paramètre de mobilité générale  $v_0(t)$ , d'un paramètre  $f_{ik}$  représentant la facilité des échanges entre les deux villes  $i$  et  $k$ , et de la différence entre l'attractivité  $u_i$  de la ville  $i$  et l'attractivité  $u_k$  de la ville  $k$ :

$$p_{ik} = v_0(t) f_{ik} \exp(u_i - u_k) \quad (6)$$

Les attractivités de chaque ville sont estimées en ajustant le modèle sur des matrices de migration successives, et elles sont ensuite analysées en fonction des caractéristiques des villes par des modèles de régression. En particulier, l'effet de la taille des villes est décomposé selon un paramètre  $s$  mesurant la tendance à l'agglomération et un paramètre  $\sigma$  qui exprime la sensibilité à la saturation:

$$u_i = s n_i - \sigma n_i^2 + \delta_i \quad (7)$$

les résidus  $\delta_i$  de cet ajustement sont appelés "préférences" et confrontés ensuite à d'autres variables socio-économiques susceptibles d'expliquer les différences d'attractivité des villes.

En dépit des différences d'objet et de formulation de ces modèles, peut-on y retrouver des éléments communs, qui seraient les fondements d'une théorie de la dynamique territoriale?

### 3 - La croissance est logistique

Sans limites, la croissance des grandeurs généralement considérées dans les modèles d'évolution spatialisés - population, emploi, revenus- serait de type exponentiel: la croissance biologique des populations est naturellement multiplicative, et les flux migratoires sont proportionnels aux masses de population en présence; l'emploi est aussi un multiple, de l'emploi de base, ou de la population locale; la rémunération du capital, ou d'une accumulation quelconque,

tend également à être proportionnelle à l'importance du dépôt initial. Ce sont les limites imposées à cette croissance exponentielle, par les ressources disponibles dans le temps, ou par l'espace restant à occuper dans le cadre d'une unité géographique, qui font de la majorité des évolutions observées des courbes logistiques. Dans le temps, lorsque des innovations permettent de dépasser le seuil imposé à l'évolution initiale par les ressources exploitées jusqu'alors, on observe une succession de courbes logistiques. Dans l'espace, certaines innovations comme la construction en hauteur, l'ascenseur... ont permis par l'empilement de pallier l'encombrement de certaines zones, repoussant la limite de la logistique. D'autres considérations d'obsolescence, de congestion et de saturation ont conduit au contraire à une décroissance logistique de certaines quantités -mais la diminution de population des centres-villes n'empêche pas que continue l'ascension des courbes des prix fonciers...

Selon les lieux, selon leur taille, leur fonction et leur position relatives, selon leur histoire antérieure, les courbes logistiques qui caractérisent l'évolution de leurs variables d'état ont des vitesses différentes. Ces vitesses d'évolution dépendent d'un processus de compétition et de concurrence pour la croissance entre les unités spatiales, elles se traduisent par une différenciation géographique entre les sous-systèmes. Les inégalités ainsi créées perdurent souvent très longtemps, elles se redistribuent parfois.

Ce sont les relations de coopération entre les acteurs microscopiques qui font la croissance logistique et la compétition territoriale observables à l'échelon macroscopique.

La formalisation logistique est directe dans les modèles de P. Allen et A. Wilson (équation 3 et 1), elle apparaît dans l'expression des attractivités chez Weidlich et Haag (équation 7).

#### **4 - La tendance est à l'agrégation**

Qu'il s'agisse de "sociabilité" (J. Reynaud, 1841), d'économies d'échelle, d'économies d'agglomération ou d'urbanisation, et quelle qu'en soit la raison invoquée, il semble qu'une population vivant sur un territoire tende à se regrouper sur le long terme en agrégats de plus en plus grands. Est-ce parce que les humains recherchent l'interaction, d'où résulte la créativité, et parce que la probabilité d'interaction croît comme le carré du nombre des personnes rassemblées ? Est-ce parce qu'un des grands invariants accompagnant la flèche du temps historique est l'accroissement de la vitesse et de la facilité des communications, qui contracte d'autant l'espace ?

Les trois modèles incorporent la tendance à la concentration spatiale, et d'une possible déconcentration par effet de congestion, au moyen de paramètres qui prennent leurs valeurs pour l'ensemble des zones étudiées. Dans le modèle de Wilson, c'est le comportement des consommateurs, qui, selon leur goût pour les grandes surfaces commerciales (ou encore les voyages à but multiple non prévus par la théorie classique

des lieux centraux), déterminent une attraction qui est une fonction non linéaire de la taille des centres de service (représentée par le paramètre  $\alpha$  dans l'équation 2; si  $\alpha$  est plus grand que 1, cet effet joue, s'il est inférieur à 1, la préférence des consommateurs a au contraire des effets dispersants). Dans le modèle de P. Allen, le jeu des paramètres  $\rho$  et  $\psi$  de l'équation 4 traduit, pour chaque type d'activité, des effets contraires et simultanés d'agglomération et de saturation, qui sont ressentis cette fois par les entrepreneurs localisant l'offre d'emplois ou de services. Ces effets sont mesurés simultanément et globalement dans le modèle de Weidlich et Haag, ils ne sont pas distincts du mécanisme de croissance logistique (équation 7).

## 5 - La distance est dissuasive

La diminution des interactions avec la distance, invariant quasi-universel de la dynamique spatiale, est prise en compte dans les trois modèles. Les deux premiers l'incorporent explicitement dans une formulation de type gravitaire, comme une fonction exponentielle décroissante de la distance (Allen pour les populations résidentes) ou du coût du déplacement (Wilson - équation 2- et Allen - équation 4- pour les activités). Des paramètres qui représentent tantôt une sensibilité aux coûts de transport, tantôt une résistance à l'éloignement, permettent de moduler ces effets, très sélectifs dans le jeu des interactions entre les différents quartiers d'une ville, selon les activités ou les sous-populations considérées.

Dans le modèle de Weidlich et Haag, l'effet des distances séparant les villes n'est pas introduit explicitement. Cependant, les paramètres  $f_{ij}$  décrivent la facilité réciproque des échanges entre deux villes  $i$  et  $j$ . Ces paramètres sont calculés dans les applications d'après la matrice des migrations interurbaines, dont ils représentent en quelque sorte la partie symétrique. Quoique n'étant pas toujours très fortement corrélés avec d'autres mesures plus classiques de la distance entre les villes, ces paramètres la reflètent cependant assez largement. Certaines équations dérivées du modèle ont d'ailleurs permis d'évaluer, dans le cas des plus grandes villes françaises, un écart croissant entre les paramètres  $f_{ij}$  estimés et des mesures de distance kilométrique, qui exprime l'affaiblissement des contraintes de la distance physique pour les migrations de population au cours des quarante dernières années. Cette dernière modélisation a en outre l'avantage de préciser la forme mathématique des interactions réelles, pour lesquelles la forme exponentielle n'est qu'une approximation trop simple (Haag et al, 1991).

On voit déjà que, si des hypothèses fondamentales de la théorie dynamique urbaine sont bien présentes dans les trois modèles, elles sont incorporées d'une manière différente, a priori par A. Wilson et P. Allen, a posteriori par W. Weidlich et G. Haag. Leur explicitation dans un même modèle permet d'évaluer l'importance respective de ces propositions théoriques. Ainsi, par exemple, le modèle de P. Allen a été appliqué à 4 grandes agglomérations françaises, Rouen, Nantes,



Bordeaux et Strasbourg (Pumain D., Sanders L., Saint-Julien Th., 1989). Ces applications ont permis de hiérarchiser les différents facteurs de l'évolution: pour l'ensemble des villes, les économies d'agglomération jouent un rôle prépondérant pour la redistribution de l'ensemble des activités et des populations à l'intérieur de la ville, alors que l'espace disponible n'intervient pratiquement pas. Le jeu des localisations relatives des zones les unes par rapport aux autres joue un rôle discriminant intermédiaire. A côté de ces régularités, on peut observer un certain nombre de spécificités: à Rouen, les sensibilités à la distance sont plus fortes que dans les autres villes, surtout pour les déplacements domicile-services. Les contraintes imposées par le site escarpé d'une partie de la ville sont sans doute à l'origine de cette particularité. D'autre part, la propension à s'agglomérer des cols blancs est particulièrement forte à Nantes, alors que celle des ouvriers ressort à Bordeaux. Ces phénomènes peuvent s'expliquer par une plus forte inertie de la répartition de ces classes sociales dans ces agglomérations ou éventuellement par des tendances ségrégatives plus marquées.

La manière dont le temps est pris en compte dans les trois modèles, ainsi que les relations à l'équilibre et l'éventualité de bifurcations, est plus difficile à saisir par une simple lecture des équations. Nous l'analyserons davantage à partir d'exemples tirés d'applications.

## **6- Le traitement du temps**

Les régions, les villes, les systèmes de villes sont les sièges de changements continus, relatifs à des échelles de temps différentes dont la durée est de l'ordre de la journée, de l'année, du demi-siècle... Les déplacements domicile-travail, résidence-services, s'inscrivent dans la journée; les migrations se réfèrent à l'année ou à une période intercensitaire ; l'amélioration d'une route, la démolition d'un immeuble, la construction d'un nouveau bâtiment relèvent également de l'échelle annuelle, mais l'intervalle séparant deux opérations de ce genre est de l'ordre d'une ou plusieurs décennies; la rénovation complète d'un quartier, avec pour effet un changement profond du contenu et des fonctions (par exemple le quartier du Marais à Paris) nécessite environ une vingtaine d'années; la transformation d'une ville dont le profil économique et social et l'infrastructure ont été marqués par des industries lourdes en une ville où prédominent les fonctions de services demande au moins une cinquantaine d'années; il en est de même pour une diffusion complète et une parfaite intégration des technologies nouvelles en matière de transport et de communications sur l'ensemble d'un territoire.

Toutes ces transformations renvoient à des temporalités différentes et combinent des dynamiques d'échelles très diverses mais qui agissent simultanément. Ces échelles de temps différentes interfèrent pour créer l'évolution, le changement. C'est la prise en compte de cette simultanéité et de ces interférences qui est souvent modélisée d'une manière trop réductrice. En effet, pour formaliser l'interférence complexe de dynamiques différentes, la plupart des modèles n'intègrent en fait que la simultanéité de trois échelles de



temps correspondant aux trois différents statuts qui peuvent être donnés aux éléments composant le modèle:

- une dynamique supposée extrêmement lente exprimée par des paramètres invariants dans le temps, ce sont des constantes;
- une dynamique lente traduite par l'intermédiaire de paramètres variant dans le temps;
- une dynamique rapide correspondant à l'évolution des variables d'état du système.

Ces trois dimensions temporelles sont insuffisantes pour rendre compte de la réalité. On observe souvent, lors des applications à des données fictives ou réelles, une réaction trop rapide du système spatial pour certaines variables face au changement de valeur d'un paramètre, cette réaction est incompatible avec leur rythme d'évolution réel.

Un problème général consiste ainsi à "brider" l'évolution du système à l'intérieur de limites raisonnables. Il faudrait réussir à bien départager la logique de la dynamique lente de celle d'une dynamique plus rapide et à interpréter le "frottement" de l'une sur l'autre en incorporant dans le modèle les limites, les contraintes dues à des vitesses différentes d'évolution. Résoudre ce problème implique d'être capable de déterminer assez précisément les domaines de définition des différents paramètres. Leur domaine de définition mathématique est en fait très large par rapport à ce qu'on pourrait appeler le domaine de définition "géographiquement vraisemblable". Ce domaine de définition est d'autant plus difficile à définir qu'il n'est ni continu, ni fixe. Dans certaines configurations de paramètres, les effets d'une variation d'un paramètre particulier peuvent être tout différents que dans une autre configuration. Par exemple, les modèles de P. Allen et de A. Wilson contiennent tous deux un paramètre mesurant la vitesse de réaction du système, mais celui-ci s'avère insuffisant à maintenir l'évolution du système entre les bornes du vraisemblable. Comme le soulignait déjà Wegener (1986) à propos du modèle de Harris et Wilson, ces modèles ignorent souvent les coûts des relocalisations et de la construction, en ne différenciant pas suffisamment les effets de temporalités radicalement différentes.

La conception du modèle de Harris et Wilson, basée sur une adaptation quasi-immédiate entre l'offre et la demande débouche ainsi sur une certaine incompatibilité avec son but, qui est l'analyse des distributions des emplois, des services et des résidents à l'intérieur d'une région ou d'une agglomération. Si le problème ne se pose pas sur le plan conceptuel pour le modèle de P. Allen, il apparaît en revanche sur le plan technique. Le paramètre mesurant la vitesse de réaction du système s'avère insuffisant pour toujours maintenir le système dans les bornes du vraisemblable. Il y a ainsi un véritable problème d'identification du temps du modèle et du temps réel, du temps où le changement peut effectivement opérer.

Donnons-en un exemple. En vue d'effectuer une comparaison systématique entre les modèles de Wilson et d'Allen, nous

avons construit une agglomération fictive, correspondant à un découpage spatial hexagonal reflétant l'organisation intra-urbaine d'une ville européenne d'environ 500 000 habitants (figures 1 et 2). Nous présenterons seulement les résultats de deux simulations, correspondant à deux scénarios d'évolution qui ne diffèrent que par les conditions d'accessibilité d'une des zones centrales (zone 32) pour les activités tertiaires fondamentales. Il s'agit de tester l'effet de la fermeture d'une station de métro dans le quartier 32, qui se traduit dans le scénario B par une accessibilité de ce quartier pour le tertiaire fondamental moins bonne que dans le scénario A. Ce changement de paramètre a eu deux effets (figure 3):

- un effet attendu et de faible ampleur, se traduisant par une croissance du tertiaire fondamental moins rapide et moins poussée dans le quartier 32 pour le scénario B.
- un effet non attendu et spectaculaire, se traduisant dans le scénario B par une formidable concentration de l'industrie dans cette zone initialement occupée par les services et la fonction résidentielle, alors que le quartier voisin 39, initialement industriel, change complètement de profil.

Le démarrage plus lent du tertiaire fondamental dans le quartier 32 lui donne, par rapport aux autres quartiers centraux, un très léger avantage en matière d'espace disponible en début de période, avantage dont va bénéficier l'industrie. Après cet amorce de développement industriel, cette zone maintient son avance, les effets d'agglomération commencent à jouer, les avantages s'accumulent rapidement et la zone enregistre une rapide expansion de l'industrie qui va passer en 20 ans de 2500 emplois à 20000, alors que la zone voisine (Q39), initialement plus industrielle, va perdre plus de 8000 emplois durant la même période.

Cet exemple présente plusieurs intérêts:

- d'une part, il illustre les effets de la prise en compte des interrelations complexes et non linéaires dans le modèle: le changement d'un paramètre relatif aux conditions d'accessibilité du tertiaire fondamental bouleverse bien plus la répartition des activités industrielles dans le centre que celle du tertiaire fondamental; il montre aussi le rôle essentiel que peut jouer une variable (ici, l'espace disponible) dans certaines configurations particulières alors que cette variable est très peu discriminante la plupart du temps.

- D'autre part, il donne une idée de la rapidité de réaction du système qui est incompatible avec les contraintes de la réalité. Dans ce modèle, l'évolution du nombre total d'emplois de l'agglomération est déterminé par la demande extérieure et est donc en quelque sorte fixée de façon exogène, ce qui donne une échelle de temps au modèle. La redistribution de ces emplois dépend en revanche entièrement de mécanismes endogènes au modèle, qui peuvent ainsi engendrer des évolutions peu compatibles avec les contraintes de la réalité. Il est en effet peu vraisemblable qu'un quartier central d'une grande agglomération perde 8000 emplois industriels en l'espace de 20 ans au profit d'un autre

quartier tout aussi central. Ainsi, dans cette configuration particulière, le changement du paramètre de la valeur .5 à la valeur .6 fait sortir ce paramètre de son domaine de définition "géographiquement vraisemblable" alors que ce même changement, dans la plupart des autres configurations aurait eu l'effet attendu sur l'évolution du tertiaire et aucun effet sur le développement du secteur industriel. Dans ce type de modèle, il n'y a donc pas un domaine de définition fixe pour un paramètre donné, il évolue en fonction des valeurs de l'ensemble des autres paramètres et n'est de ce fait pas identifiable dans l'absolu.

Cet exemple illustre la difficulté de définir des intervalles de valeurs des paramètres qui conduisent à des évolutions plausibles, les vitesses d'ajustement s'avérant souvent trop rapide ou trop brusques par rapport à la réalité. C'est par cet aspect non bridé que le modèle de P. Allen manque d'opérationnalité.

Le modèle de Weidlich et Haag présente l'avantage d'une construction par étapes et l'ensemble des projections effectuées conduisent à des évolutions raisonnables tant que la dynamique propre des variables socio-économiques n'est pas intégrée. Dans ce dernier cas, en revanche, les évolutions mènent à des changements plus brusques, quelquefois trop rapides par rapport aux contraintes de la réalité. Il semblerait ainsi que ce problème est d'autant plus accentué qu'on est face à un système de formalisation complexe et que l'on se trouve dans une configuration éloignée de l'équilibre. Changement brusque de tendance ou bifurcation peuvent alors se traduire par des évolutions incompatibles avec l'inertie de la réalité. On aboutit ainsi au paradoxe suivant lequel, plus un modèle est complexe et vraisemblable sur un plan théorique, plus forts sont les risques d'aboutir à des invraisemblances sur le plan des applications...

L'intégration effective de vitesses d'évolution différentes, en fonction du degré de réversibilité des changements (événements) est un problème essentiel à résoudre pour une amélioration de la qualité des modèles dynamiques.

## **7- Dynamique et équilibre**

Dans tous les modèles dynamiques, l'évolution est caractérisée par une trajectoire se dirigeant vers un certain équilibre. Mais cet équilibre est appréhendé de façon très différente dans ces modèles:

- le modèle de P. Allen appréhende le système loin de l'équilibre et a pour but de saisir sa dynamique "en plein vol". L'état d'équilibre lui-même n'est pas analysé de manière explicite. En perpétuelle évolution, il représente un état purement fictif que l'on n'atteindra jamais et dont les propriétés intrinsèques sont sans importance. D'ailleurs, la complexité formelle du modèle est telle qu'on ne peut déduire aucune propriété de cet état par une approche analytique. Cette vision a l'avantage de bien correspondre à la complexité du monde urbain, en constante évolution et adaptation aux conditions nouvelles.

- le modèle de A. Wilson, basé sur une logique d'équilibre économique entre offre et demande, se situe plus près de l'équilibre, le moteur de l'évolution du système étant le passage d'un équilibre à l'autre au fur et à mesure des variations des paramètres. L'équilibre est analysé de façon analytique et le modèle permet de ce fait d'identifier des points de bifurcation et des configurations de paramètres pouvant conduire à des comportements particuliers, chaos ou cycle limite.

- Le modèle de Weidlich et Haag, quoique d'essence dynamique, est basé sur un ajustement période par période et l'état d'équilibre associé, quoique lointain ici également, résume l'aboutissement d'une dynamique possible et est analysé avec précision. L'étude analytique des trajectoires permet de déterminer si le système se dirige vers un état stationnaire stable ou instable, dans quelles conditions il va se diriger vers un cycle limite ou entrer dans une trajectoire chaotique. On s'intéresse à l'état d'équilibre de manière explicite, et les écarts à cet état, en temps et en structure, constituent même des indicateurs permettant de caractériser le système et d'effectuer des comparaisons. La figure 4, représentant l'écart entre les tailles des villes observées en 1982 et celles qu'elles auraient à l'équilibre, si l'évolution récente se maintenait pendant des centaines d'années, en donne un exemple.

Ce traitement différent de l'équilibre rend bien sûr difficile les comparaisons entre modèles. Ainsi, dans l'essai de comparaison entre les modèles de P. Allen et A. Wilson que nous avons effectué en collaboration avec G. Rabino et S. Lombardo, l'agglomération de départ, commune aux deux applications, s'est avérée inapte à la comparaison. En effet, pour procéder à des simulations, le modèle de Wilson nécessitait de considérer cette configuration comme étant à l'équilibre, alors que le modèle d'Allen appréhendait au contraire cette même configuration comme loin de l'équilibre. Cette contradiction fondamentale empêchait d'effectuer une comparaison sérieuse des simulations de l'évolution du système par les deux modèles. La seule base de comparaison était donc de définir au préalable une agglomération qui puisse être considérée à l'équilibre pour les deux approches.

Cette configuration fictive a été obtenue en simulant l'évolution de la ville par le modèle d'Allen avec des paramètres constants et notamment une demande extérieure qui ne varie pas dans le temps. Le point d'équilibre obtenu est stable, il traduit une configuration urbaine vraisemblable, et le système réagit lentement et régulièrement aux variations des paramètres. Mais l'utilisation du modèle pour décrire l'évolution a entièrement perdu son attrait et sa richesse du point de vue théorique, puisque le modèle de P. Allen, avec sa logique géographique, décrit un système complexe et perpétuellement éloigné de l'équilibre.

Cet exemple d'essai de comparaison montre combien il est difficile de comparer deux modèles différents, même à partir de simulations. En l'absence d'expérimentation sur des données empiriques, on ne dispose pas de véritables outils pour



confronter des modèles et réellement tester leurs avantages et inconvénients.

## 8- Bifurcations

Un phénomène analogue se produit pour les bifurcations qui jouent un rôle central dans ces modèles, du moins sur le plan théorique. Ici encore, on note un certain décalage entre les possibilités du modèle à engendrer des bifurcations et la rareté de ces bifurcations dans la réalité. Les bifurcations sont d'autant plus nombreuses qu'elles concernent une échelle de temps de niveau inférieur. Ainsi, elles sont plus nombreuses au niveau d'un quartier ou d'une commune qu'au niveau d'une agglomération dans son ensemble. Prigogine et Stengers (19779) soulignent que "la taille critique est d'autant plus élevée, et la fluctuation instabilisante est donc d'autant plus rare, que la diffusion qui couple toutes les régions du système -et en particulier la région fluctuante avec son environnement- est élevée. En d'autres termes, plus rapide est la communication dans le système, plus grande est la proportion des fluctuations insignifiantes, incapables de transformer l'état du système, plus stable est cet état." Le système très intégré des villes tend ainsi à amortir la plupart des fluctuations et il le fait d'autant mieux que l'information circule bien entre les composantes du système. Ce résultat très important explique la grande stabilité générale des systèmes humains, au moins sur le court et le moyen terme. La plupart des modèles mathématiques disponibles sont incapables de reproduire cet aspect. Soit ils sont inaptes à reproduire la moindre bifurcation et un certain aspect du changement sur le long terme est alors oublié, soit, ils produisent des bifurcations générales avec une trop grande facilité, montrant par là une trop grande sensibilité par rapport à l'échelle de temps considérée.

Dans les modèles évoqués ici, le problème se pose de plusieurs façons différentes:

- dans les modèles de A. Wilson et Weidlich et Haag, l'approche analytique permet d'identifier la bifurcation de manière précise mais un problème d'interprétation se pose. Quelle est la réelle signification de la valeur du paramètre pour laquelle le système bifurque? Quelle est sa valeur prédictive? Comment établir une correspondance entre cette valeur et des phénomènes observables? Comment reconnaître une certaine valeur limite de la dissuasion de la distance ou des effets des économies d'agglomération? Si le modèle a été validé par une confrontation entre l'évolution observée et la dynamique reproduite par le modèle, il y a des chances pour qu'au voisinage de cette valeur, le système puisse s'engager sur des trajectoires de nature différente. Mais sans cette validation, est-on en droit de tirer la moindre conclusion sur la valeur associée à ce point de bifurcation?

- pour le modèle de P. Allen, le problème se pose en d'autres termes, puisqu'il n'existe pas de méthode de résolution analytique et que seules les simulations permettent d'identifier les bifurcations. Mais comment les reconnaître? Sans définition mathématique claire, cette identification dépend en fait de la notion de stabilité structurelle en



théorie urbaine, question sur laquelle il n'y a pas de véritable consensus parmi les spécialistes. Par exemple, nous ne disposons pas de critères scientifiques pour déterminer dans quelle mesure les configurations représentées sur la figure 5 (Sanders 1990) sont qualitativement différentes ou non.

D'autre part, P Allen souligne que des résidus de valeur élevée pour une zone lors d'une application peuvent révéler l'effet d'une bifurcation locale. Dans les applications qui ont été réalisées pour les agglomérations françaises, on a effectivement remarqué que les résidus importants correspondaient systématiquement à la création d'un centre de services, d'une ZUP ou d'une université. Ces phénomènes dépendent en général d'une macro-décision et ne relèvent donc pas de mécanismes intégrés dans le modèle. Ils induisent le plus souvent des bouleversements profonds au niveau de la zone, quasiment irréversibles, et laissant pressentir le passage d'un point de bifurcation.

### **Conclusion: de l'utilité de ces modèles**

Ces trois modèles sont très stimulants, d'abord pour leurs apports immédiats, mais surtout pour les potentiels de développement énormes qu'ils possèdent. Ils sont d'un apport évident pour l'analyse urbaine par leur richesse conceptuelle: mécanismes d'auto-organisation, ordre par fluctuation, bifurcation, jeu simultané de déterminisme et d'aléa, inertie et fluctuation, sont des processus dont on pressent l'importance dans l'analyse de l'évolution des villes. Ces modèles, avec leur outillage mathématique très complet, devraient permettre de procéder à des vérifications empiriques, de tester la validité d'hypothèses théoriques, étape sans laquelle l'utilisation des seuls concepts reste incomplète.

Sur le plan de la théorie urbaine, l'apport de ces trois modèles nous semble de même nature: ils ne créent pas véritablement de nouvelles connaissances mais ils fournissent des indicateurs de mesure très utiles en vue de comparaisons entre des systèmes situés dans des espaces différents ou se référant à des époques différentes: rôles respectifs des économies d'agglomération, des effets de saturation, de la concurrence pour l'espace ou les contraintes de localisation dans le cas d'un système intra-urbain, rôles respectifs de l'inertie du système, des innovations récentes ou des proximités géographiques dans le cas d'un système de villes.

Ces trois modèles appartiennent à la catégorie bien précise de modèles pré-opérationnels, construits pour analyser le changement à moyen terme. Ils sont donc historiquement situés, dans l'analyse qu'ils font du fait urbain. Privilégiant l'exploration de transformations prévisibles ou vraisemblables dans les prochaines années ou les prochaines décennies, ils décrivent surtout l'évolution interne du système considéré, plutôt qu'ils ne s'intéressent à l'explication du changement urbain en général.

L'apport est plus discutable quant à la théorie du changement elle-même. Une critique fondamentale touche à la

réalité de la revendication à se saisir enfin du passage entre les niveaux d'organisation, en particulier entre le niveau microscopique, qui est celui des acteurs, et le niveau macroscopique qui serait celui de la forme spatiale. Si effectivement nos trois modèles décrivent bien comment l'évolution différentielle de zones de niveau mésoscopique (quartier ou ville) contribue à changer la configuration d'un système envisagé à l'échelon macroscopique (la ville entière ou le système des villes), aucun ne résout de façon satisfaisante le problème du nécessaire changement de variable entre le niveau microscopique et le niveau macroscopique. Ces modèles traitent de deux niveaux de l'organisation des systèmes spatiaux et non de trois.

En dépit des appellations de certains paramètres (sensibilité des acteurs, degré d'information...), qui tendraient à renvoyer leur interprétation au niveau microscopique, un examen attentif montre qu'ils sont en réalité définis pour des zones, à l'échelon mésoscopique. Même le paramètre  $u_i$ , que Weidlich et Haag rapprochent dans certains de leurs écrits d'une "utilité" individuelle, peut être considéré comme mesurant une attractivité agrégée des lieux. En fait, on ne sait pas bien encore convertir les déterminants individuels de la localisation ou de la migration en déterminants de l'évolution des groupes ou d'agrégats spatiaux.

Ainsi s'explique que, au vu de ces modèles, on soit tenté de critiquer un certain décrochage entre des logiques explicatives différentes: celles qui relèvent du comportement individuel, qui s'analysent en termes de raisons d'agir, de finalité, de sens intentionnel, et celles qui reproduisent des régularités spatiales, dépourvus de finalité intrinsèque et produits involontaires des déterminants individuels. C'est plus à ce niveau que se situe la critique, qu'à un parti pris qui s'imposerait à cette modélisation de se limiter au fonctionnement urbain de type "capitaliste libéral", ignorant les mécanismes collectifs de la production de l'espace. Rien n'empêche d'utiliser la formalisation de ces modèles pour traiter des interactions entre des acteurs plus ou moins puissants et une planification plus ou moins contraignante. Dans tous les cas, il faut progresser encore pour affiner l'expression théorique de la relation entre les motivations et les stratégies des acteurs et les configurations spatiales résultantes.

D'autres approches du changement sont possibles que celles évoquées au moyen des trois modèles proposés ici, telles celles utilisant des processus dynamiques du type Volterra-Lotka, ou la croissance fractale. J.B. Rosser (1990) ou W.B. Zhang (1990) en donnent des exemples. Nous voulons cependant défendre l'idée que l'exploration de nouvelles voies de formalisation n'est pas seule en cause dans le transfert de modèles d'une discipline à l'autre, mais qu'un transfert efficace exige aussi une spécification soignée dans le domaine d'application et des confrontations répétées des modèles avec des données empiriques et des modèles entre eux.

## REFERENCES

- Allen P. 1978, Dynamique des centres urbains. Sciences et Techniques, 50, 15-19
- Allen P. 1985, Comprendre la ville d'aujourd'hui pour explorer la ville de demain, in La cité belge aujourd'hui, Crédit Communal de Belgique, 287-302.
- Allen P. Sanglier M. 1979, A dynamic model of growth in a central place system. Geographical Analysis, 11 (3), 256-272
- Allen A. Bon F. Deneubourg J.L. De Palma A. Sanglier M, 1982, Models of urban settlement and structure as self-organizing systems, Washington DC, Department of Transportation.
- Haag G. 1989, Dynamic decision theory: applications to urban and regional topics. Dordrecht, Kluwer Acad. Pub.
- Haag G. Munz M. Pumain D. Saint-Julien T. Sanders L. 1991, Interurban migration and the dynamics of a system of cities. A paraître dans Environment and Planning.
- Haken H. 1977, Synergetics, an introduction. Berlin, Springer.
- Harris B. Wilson A.G., 1978, Equilibrium values and Dynamics of attractiveness terms in production-constrained spatial-interaction models, Environment and Planning A, 10, 371-388.
- Lombardo S. Pumain D. Rabino G. Saint-Julien Th. Sanders L., 1987, Comparing urban dynamic models: the unexpected differences in two similar models, Sistemi Urbani, 2/3, 213-228.
- Lung Y. 1987, Les ruptures de la dynamique spatiale, Auto-organisation, Bifurcation, Catastrophe..., Presses Universitaires de Bordeaux.
- Paelinck J. 1986: Bifurcation analysis in space economy. Revue d'Economie Régionale et Urbaine, 3, 339-347.
- Prigogine I. Stengers I. 1979, La nouvelle Alliance, Gallimard.
- Pumain D. 1982: La dynamique des villes. Paris, Economica.
- Pumain D. Saint-Julien Th. Sanders L., 1984, Vers une modélisation de la dynamique intra-urbaine, Espace Géographique, 2, 125-135.
- Pumain D. Sanders L. Saint-Julien 1987, Application of a dynamic model. Geographical Analysis, 1-2, 152-168.
- Pumain D. Sanders L. Saint-Julien T. 1989, Villes et auto-organisation. Paris, Economica.

Reynaud J. 1841, Villes in l'Encyclopédie Nouvelle, cité par M.C. Robic; 1982, Cent ans avant Christaller, une théorie des lieux centraux, l'Espace Géographique...

Rosser J.B. 1990, Approaches to the Analysis of the Morphogenesis of Regional Systems. *Socio-spatial Dynamics*, 2, 75-102.

Sanders L., 1990, Modèles de la dynamique urbaine: une approche critique, Séminaire "Temporalités Urbaines" INED

Sanders L. Pumain D., 1990, Un modèle dynamique de l'évolution du système urbain français, in AIDELF, Croissance urbaine et urbanisation, Actes du 3ème séminaire international, Rabat 15-17 mai, Paris, PUF-INED.

Sanders L. Pumain D. Saint-Julien Th., 1991, Interurban migration and dynamics of the French urban system: socio-economic components, in Pumain ed., *Spatial Analysis and Population Dynamics*, Paris, J. Libbey- INED, Congrès et colloques n°6.

Wegener M., 1986, Transport network equilibrium and regional deconcentration, *Environment and Planning*, A, 18, 437-456.

Weidlich W. Haag G. ed. 1987, *Interregional migration, a dynamic theory and international comparison*. Berlin, Springer Verlag.

Wilson A. 1981, *Catastrophe theory and bifurcation: applications to urban and regional systems*. London, Croom Helm.

Zhang W.B. 1990, Stability versus instability in Urban Pattern Formation. *Socio-Spatial Dynamics*, 1, 41-56.

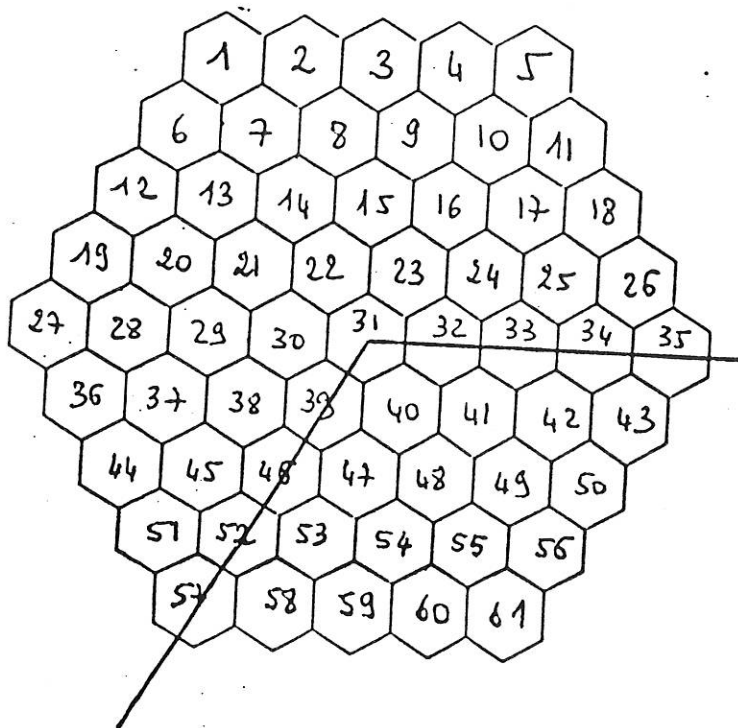
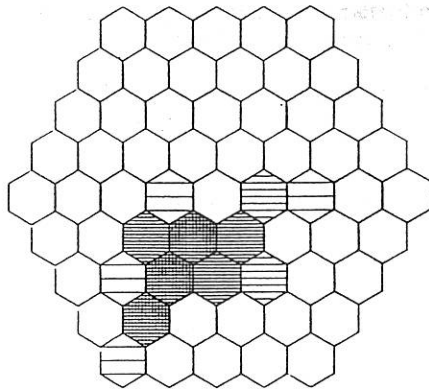


Figure 1: Une ville fictive

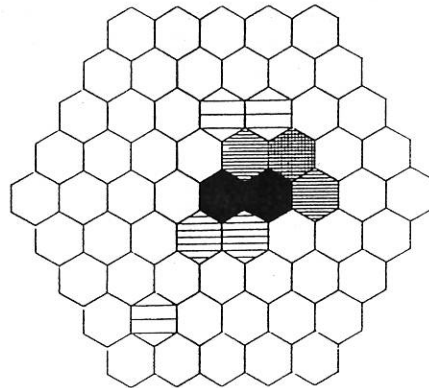


CONFIGURATION INITIALE

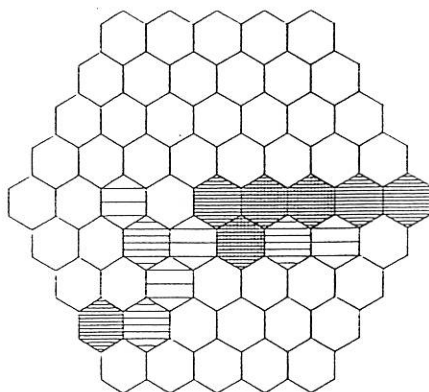
INDUSTRIE



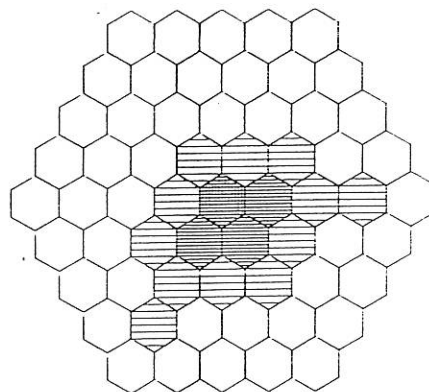
TERTIAIRE FONDAMENTAL



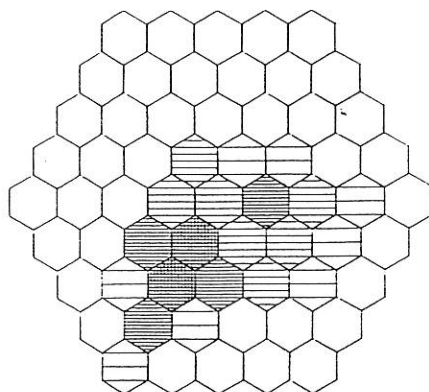
TERTIAIRE LOCAL



TERTIAIRE REGIONAL



OUVRIERS



COLS BLANCS

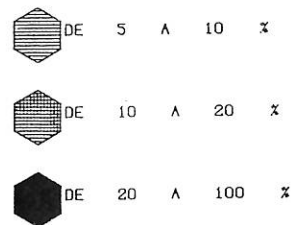
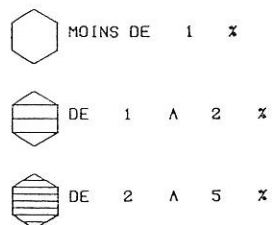
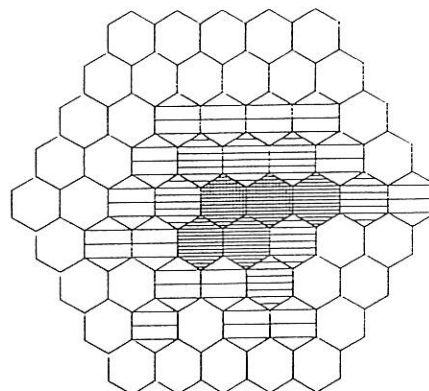
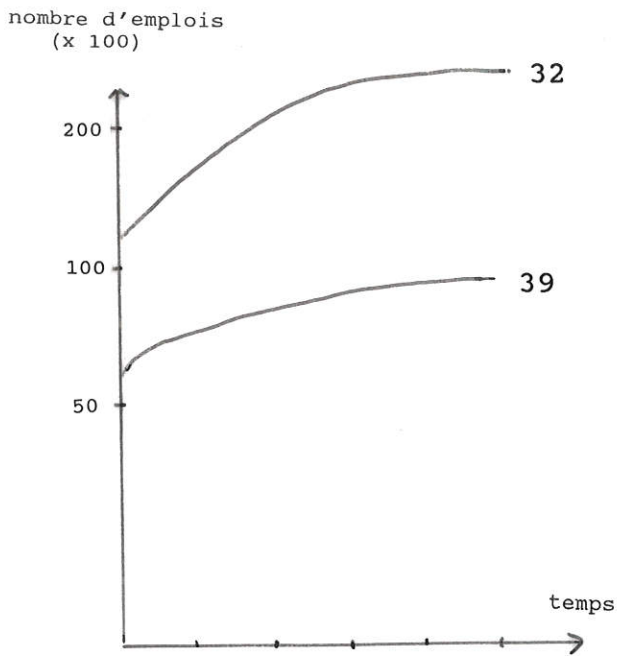
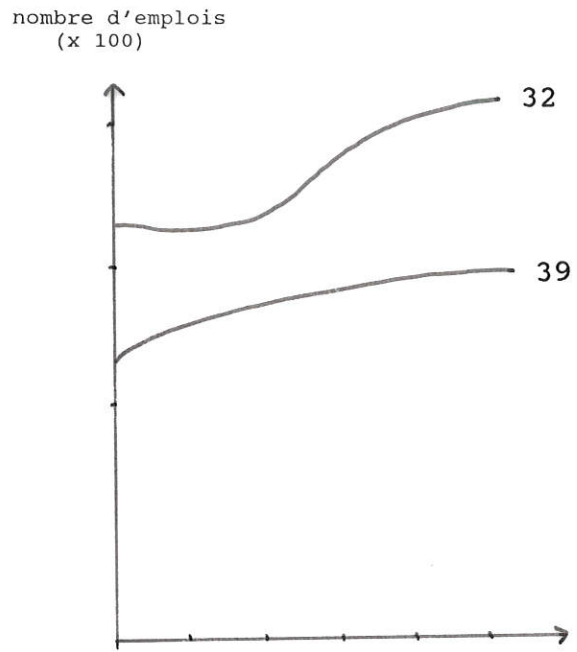


Figure 2: Répartition des activités et des populations résidentes à l'intérieur de la ville fictive

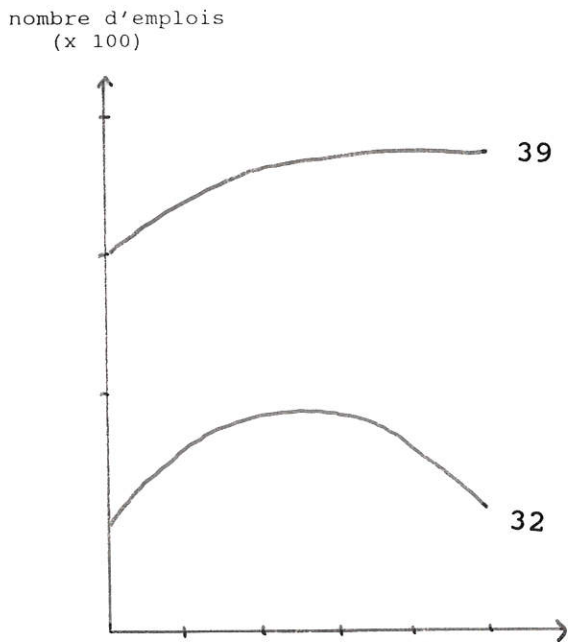


scenario A

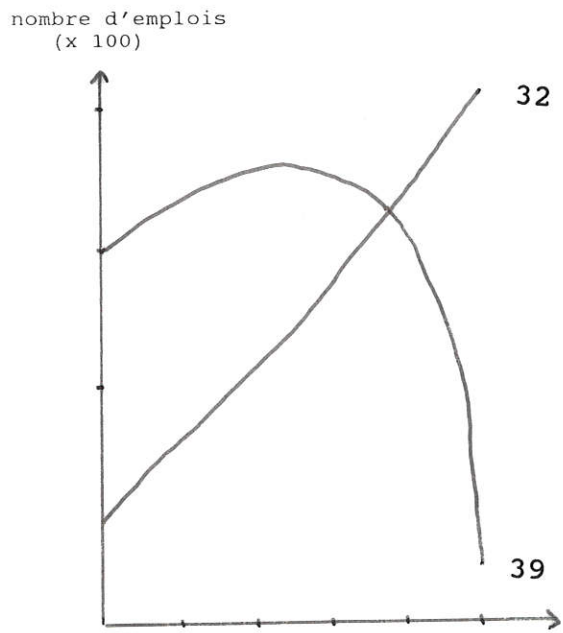


scenario B

Tertiaire fondamental



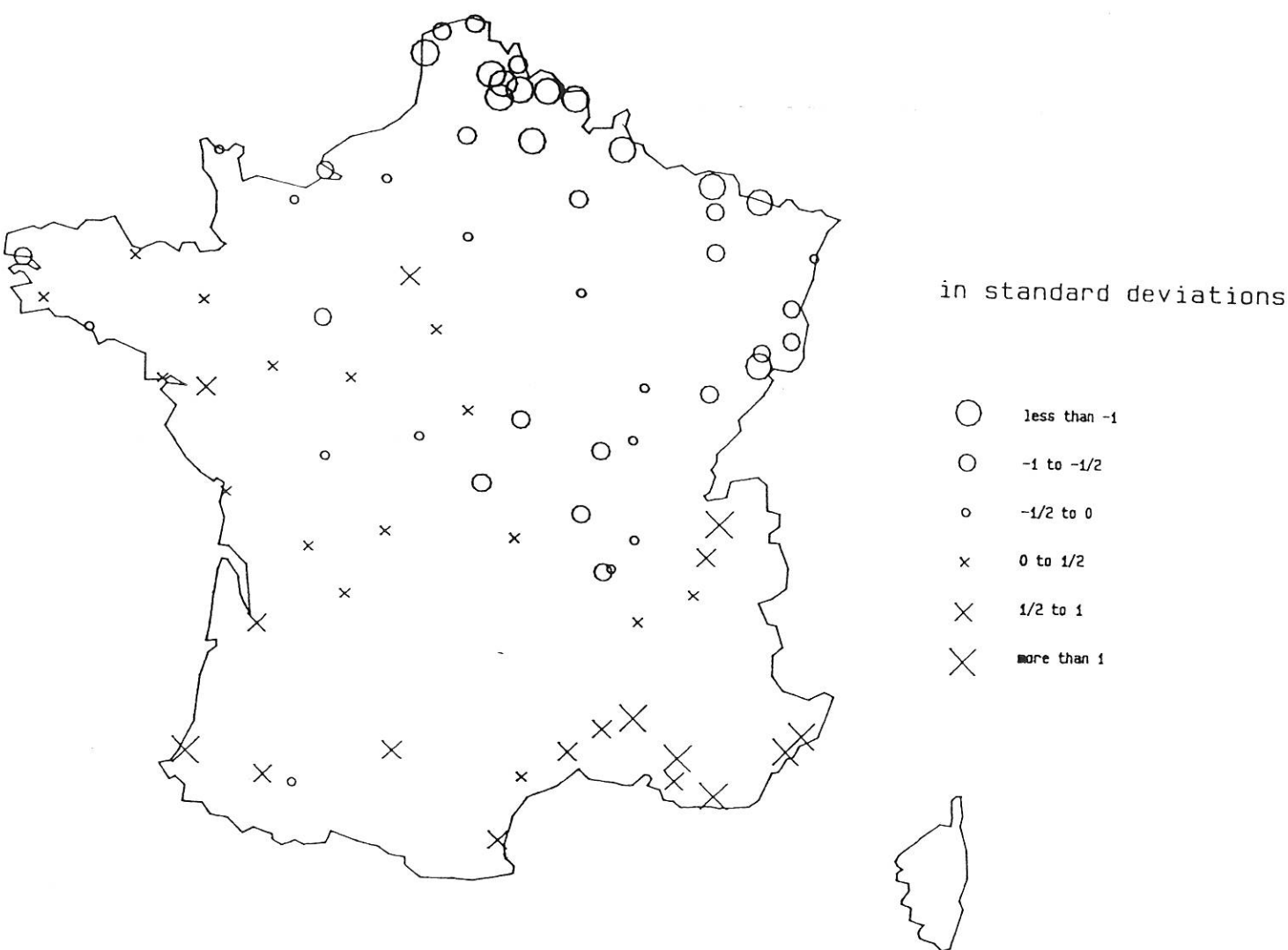
scenario A



scenario B

Industrie

Figure 3: Evolution du tertiaire fondamental et de l'industrie dans deux quartiers centraux



CNRS Equipe P.A.R.I.S.

Figure 4: Application du modèle de Weidlich et Haag à l'évolution des villes françaises; écart à l'état stationnaire en 1982

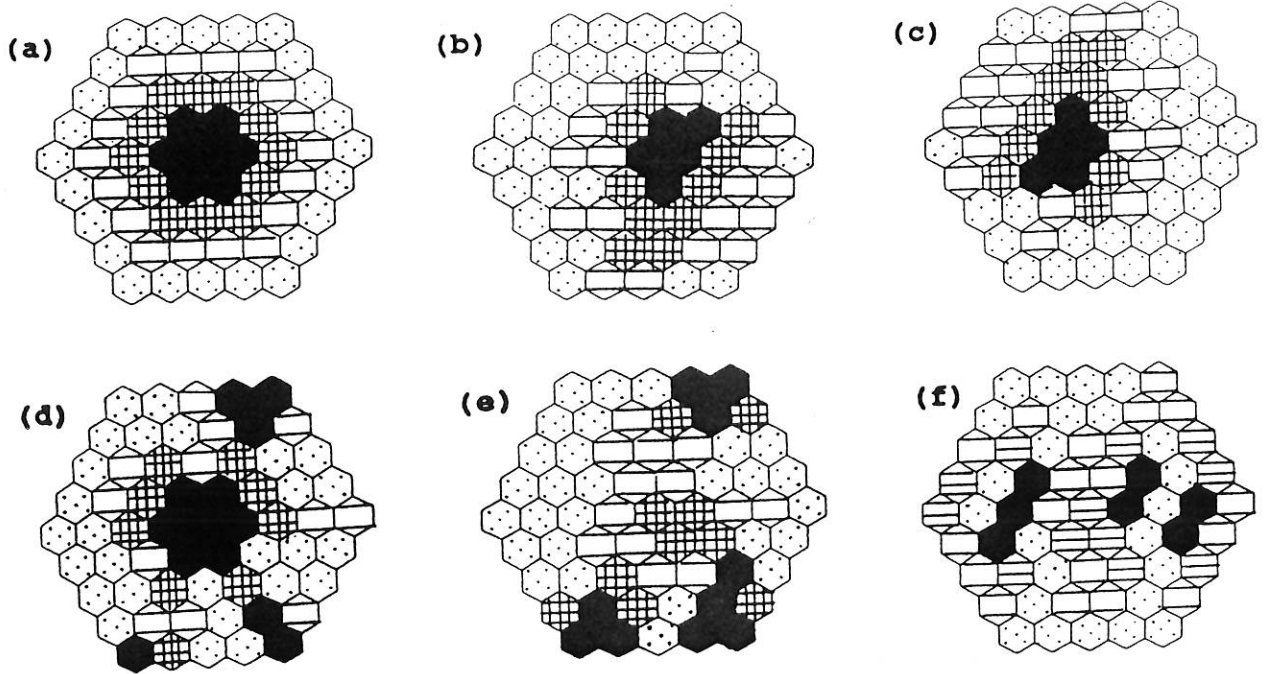


Figure 5: Comment comparer des configurations différentes ?