

Modélisation des dynamiques urbaines et analyse des formes urbaines

Olivier Bonin

Université Gustave Eiffel et ENPC, LVMT

30 mai 2022
Marne-la-Vallée

Recherches en lien avec les formes urbaines

Ville et géographie: la question des formes

Qu'entend-on par forme urbaine?

- ▶ Forme des villes: capacité des villes à se détacher de leur substrat géographique
- ▶ Forme-structure: manière dont les différents constituants d'une ville sont arrangés entre eux
- ▶ Forme-contour: frontière, hypothétique séparation entre l'urbain et le non-urbain

Problème fondamental: la description des formes

- ▶ Les mathématiques et la physique élémentaires sont plus orientés vers la description du mouvement que des formes
- ▶ Problème des échelles d'observation et de modélisation
- ▶ Articulation entre la forme propre des objets, et leur arrangement spatial

Questions de recherche classiques en lien avec les formes urbaines

- ▶ Les formes urbaines présentent-elles des caractéristiques communes? Typologies, classifications, etc.
- ▶ Comment modéliser la croissance des villes? L'étalement urbain?
- ▶ Les formes urbaines sont-elles stables? À quelles échelles?
- ▶ Comment passer des comportements individuels aux comportements collectifs pour expliquer l'émergence de propriétés dans les villes?
- ▶ Certaines formes urbaines sont-elles moins consommatrices d'énergie? Moins polluantes? Moins susceptibles d'engendrer de la ségrégation sociospatiale? ...

Questions de recherche classiques un peu plus éloignées des formes urbaines

La ville réduite à un point (une population, par exemple)

- ▶ Villes et réseaux de ville
- ▶ Croissance comparée des villes
- ▶ Loi rang-taille (loi de Zipf), autres invariants statistiques
- ▶ Statistiques et zonages: erreur écologique, et MAUP (modifiable areal unit problem)

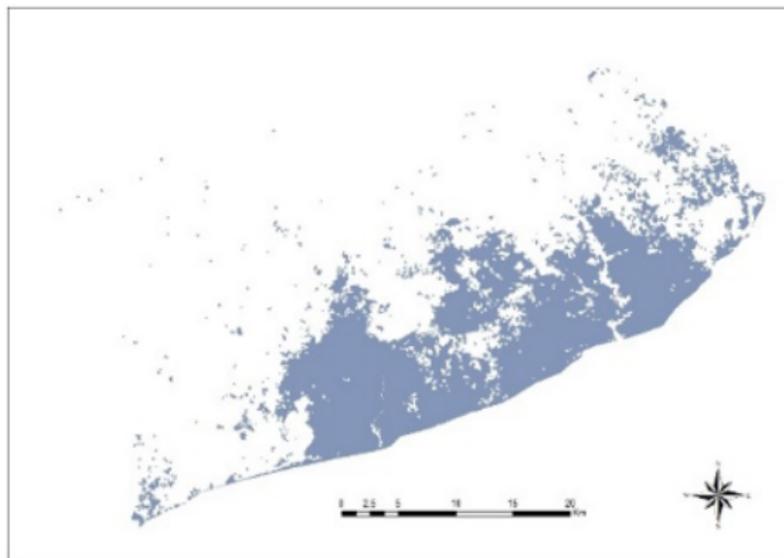
Analyse des formes urbaines

La ville vue du ciel

Approches de la télédétection

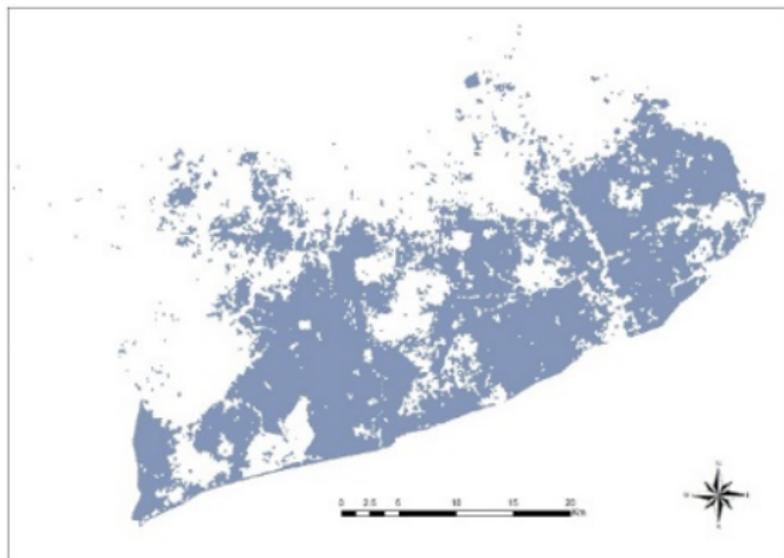
- ▶ utilisation d'images aériennes, ou satellitaires, ou encore de données statistiques: le monde vu de haut, posture du cartographe
- ▶ méthode de traitement d'image pour détecter des objets, des contours (morphologie mathématique,
- ▶ modélisation de l'évolution des objets par couplage d'un modèle de Markov observable avec un automate cellulaire

Exemple: région métropolitaine d'Accra (Ghana)



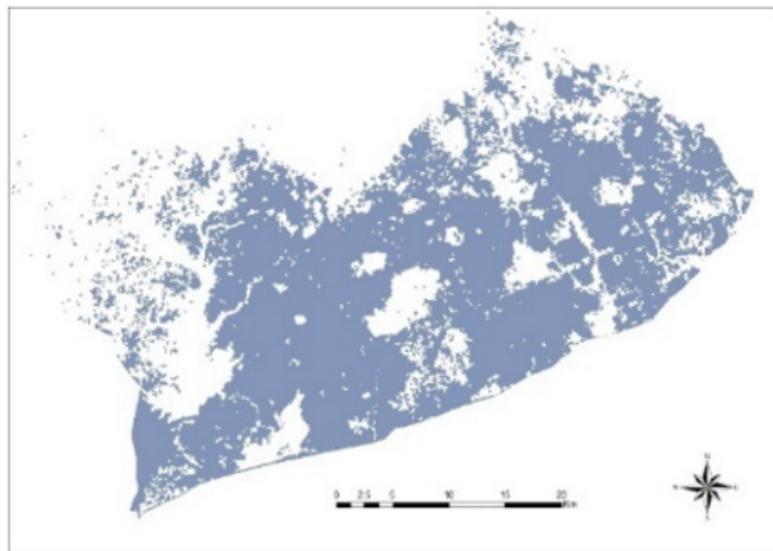
Zones urbanisées en 1991, classification par la méthode SLIC
(simple linear iterative clustering)

Exemple: région métropolitaine d'Accra (Ghana)



Zones urbanisées en 2008, classification par la méthode SLIC
(simple linear iterative clustering)

Exemple: région métropolitaine d'Accra (Ghana)



Zones urbanisées en 2020, classification par la méthode SLIC
(simple linear iterative clustering)

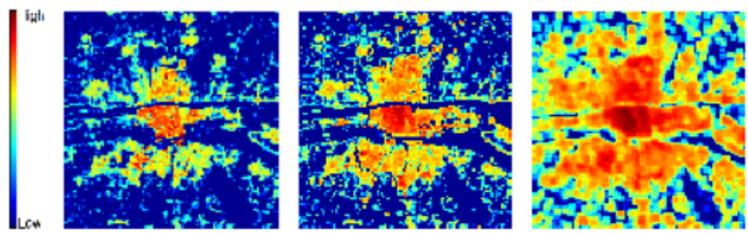
Exemple: région métropolitaine d'Accra (Ghana)

Quelle urbanisation en 2050? Quelles variables influent sur la consommation d'espace? Quelles autres transformations de la ville au-delà de l'étalement urbain?

Besoin d'introduire des processus de croissance, et de caractériser mieux les formes, par exemple par utilisation de l'analyse fractale (cf. présentation de Stéphane Jaffard).

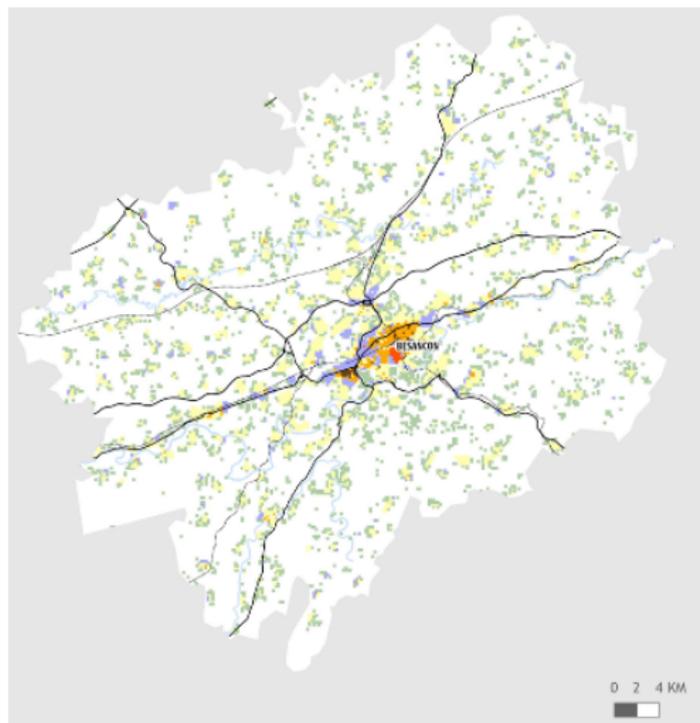
Méthodes de sémantisation de l'espace.

Classification de formes et structures urbaines



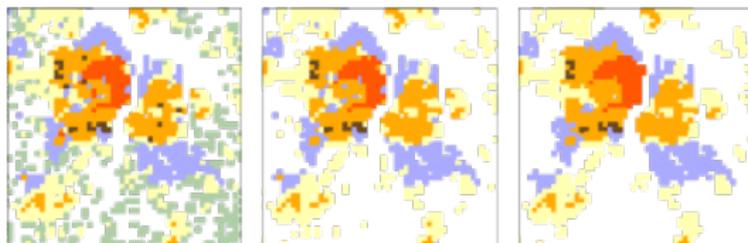
Données utilisées pour la classification; population (gauche), bâti (milieu), entropie du bâti (droite). Source: INSEE and IGN (2013).
Auteur: J. Baro

Classification de formes et structures urbaines



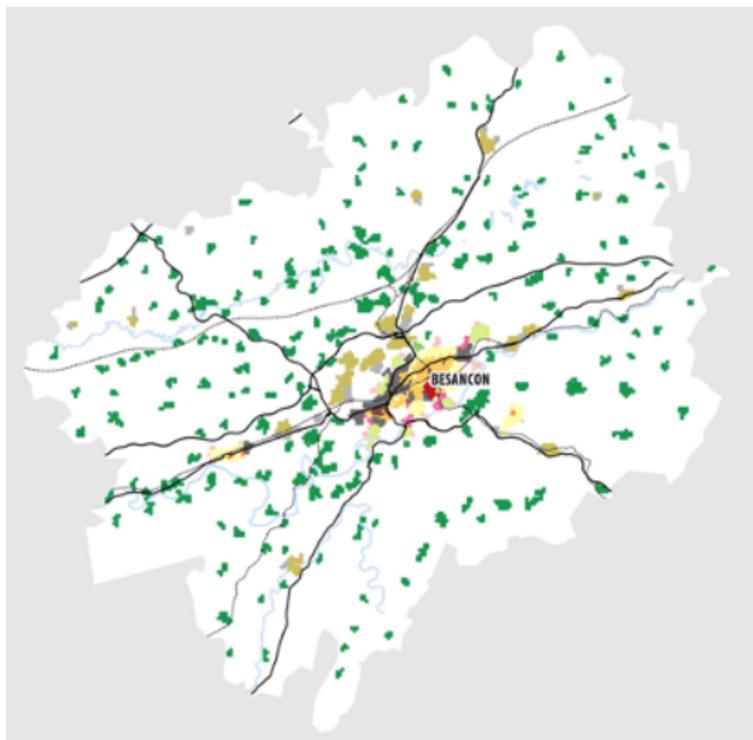
Taches urbaines identifiées par classification (champs de Markov cachés).

Classification de formes et structures urbaines



Simplification des régions (dilatation et érosion)

Classification de formes et structures urbaines



Morphotypes urbains

Quelques références bibliographiques

Classification occupation du sol

- ▶ Bonin O, Baro J, Hubert J-P, (2016). Identification of urban structures on regular squared grids with the help of spatial calculus, in Urban challenges in a complex world: Resilience, governance and changing urban systems, Editor: Niamh Moore-Cherry.
- ▶ Harris, P.M. and Ventura, S.J., (1995). The integration of geographic data with remotely sensed imagery to improve classification in an urban area. Photogrammetric engineering and remote sensing, 61 (8), 993–998.
- ▶ Herold, M., Couclelis, H., and Clarke, K.C., (2005). The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. Computers, Environment and Urban Systems, 29 (4), 369 – 399.

Morphogenèse

Modèle de morphogenèse urbaine

On cherche à mettre au point un modèle qui explique la formation des prix immobiliers et des quartiers (répartition des population dans l'espace).

Principe de la morphogenèse

On n'explique pas la forme comme le résultat d'une optimisation ou d'un processus en vue de l'obtention d'un résultat, mais comme résultat de mécanismes complexes d'évolution (genèse de la forme).

Morphogenèse selon A. Turing

A. Turing (1952) : The Chemical Basis of Morphogenesis.

Modèle qui permet d'expliquer l'apparition de formes à partir d'une distribution initialement homogène de réactifs et de catalyseurs que Turing appelle morphogènes.

Modèle général à deux morphogènes A et H , et une couronne de N cellules. A et H diffusent à des vitesses différentes, A est un activateur auto-catalytique et H un inhibiteur dont la synthèse est catalysée par A .

System de réaction-diffusion, facile à écrire sous forme d'équations différentielles.

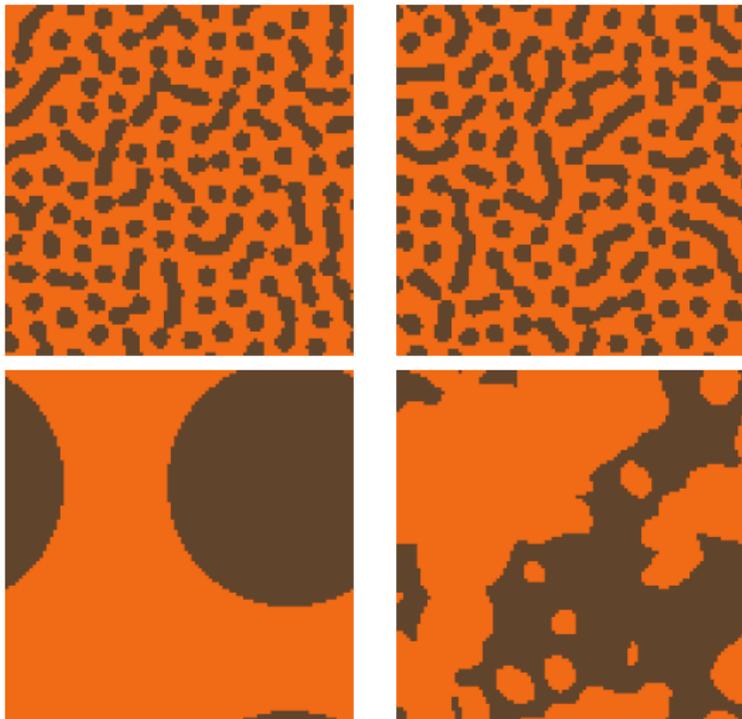
Modèle de Turing

Dans le cadre continu, on note $a(x, t)$ et $h(x, t)$ les concentrations de l'activateur A et de l'inhibiteur H à la position x et au temps t .

$$\begin{aligned}\frac{\partial a}{\partial t} &= \rho \frac{a^2}{h} - \mu_a a + D_a \frac{\partial^2 a}{\partial x^2} + \sigma_a \\ \frac{\partial h}{\partial t} &= \rho a^2 - \mu_h h + D_h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \sigma_h\end{aligned}$$

avec $\mu_a < \mu_h$ et $D_a \ll D_h$.

Simulation du modèle de Turing dans un plan avec Netlogo



Morphogenèse urbaine

Conception cousine de l'approche de dynamique des systèmes de Forrester (1969).

De très nombreux travaux avec des approches similaires :

- ▶ Systèmes de ville et auto-organisation: Allen et Sanglier (1979), Pumain, Sanders, St-Julien (1989), Sanders (1992), Pumain (1997)
- ▶ Expansion urbaine: Caruso, Cavailhès, Frankhauser, Petters, Thomas et Vuidel (2010)

ainsi que des approches non quantitatives:

- ▶ Lévy (1985), Ritchot (1992), Desmarais et Ritchot (2000)

Comment transposer les idées de Turing au cas de la formation des prix?

On peut identifier des éléments dont les concentrations varient dans l'espace et dans le temps, diffusent, se catalysent, s'auto-catalysent et s'inhibent : les populations, les surfaces de logement et les prix.

Le lien entre prix et population n'est pas suffisant : il est utile de prendre en compte des aménités physiques et des aménités sociales pour expliquer les choix de localisation et les mécanismes de formation des prix.

Les emplois sont laissés en dehors du modèle

Variable auxiliaire: la valeur positionnelle

Introduction d'une variable auxiliaire

On introduit une variable synthétisant les aménités sous la forme d'une quantité :

- ▶ perçue par toute la population;
- ▶ à laquelle les individus sont plus ou moins sensibles;
- ▶ que les individus renforcent ou détruisent au cours du temps.

On qualifie cette cette variable auxiliaire de *valeur* parce qu'elle est quantifiable, et que cette quantité est perçue par tous les individus (même s'ils ne sont pas obligés d'y adhérer).

Mécanismes (réactions «chimiques» et diffusion) 1/2

Dynamique de population

Les individus arrivent et partent de la ville selon une dynamique exogène au système (par exemple, maintien au cours du temps d'une population constante).

Évolution des surfaces

Les surfaces de logement peuvent varier en lien avec la valeur.

Dynamique des prix

Les prix évoluent en fonction d'un mécanisme d'enchères : modèle d'Alonso-Mills-Muth de l'économie urbaine (modèle mono-poly-centrique).

Mécanismes (réactions «chimiques» et diffusion) 2/2

Dynamique de la valeur

- ▶ Chaque individu peut contribuer à augmenter ou diminuer la valeur.
- ▶ La valeur diffuse localement
- ▶ La valeur peut s'auto-catalyser (par exemple intervention des pouvoirs publics).

Interactions prix-valeur

Chaque individu peut être plus ou moins sensible à la valeur, et cette sensibilité à la valeur modifie son utilité, donc son choix de localisation et ses enchères. Le couplage prix-valeur passe par les surfaces de logement.

Équations du modèle

L'utilité d'un ménage de revenu Y occupant un logement de surface q à la population r de l'espace pour un loyer au m^2 de $R(r)$, et effectuant un aller-retour vers son travail de coût $T(r)$ a pour utilité :

$$U = (Y - T(r) - qR(r))^\alpha (q + \beta x(r))^{1-\alpha}$$

où $x(r)$ est le supplément de surface perçu, fonction de la valeur de la position r . α est de l'ordre de 0,75.

La surface optimale est alors :

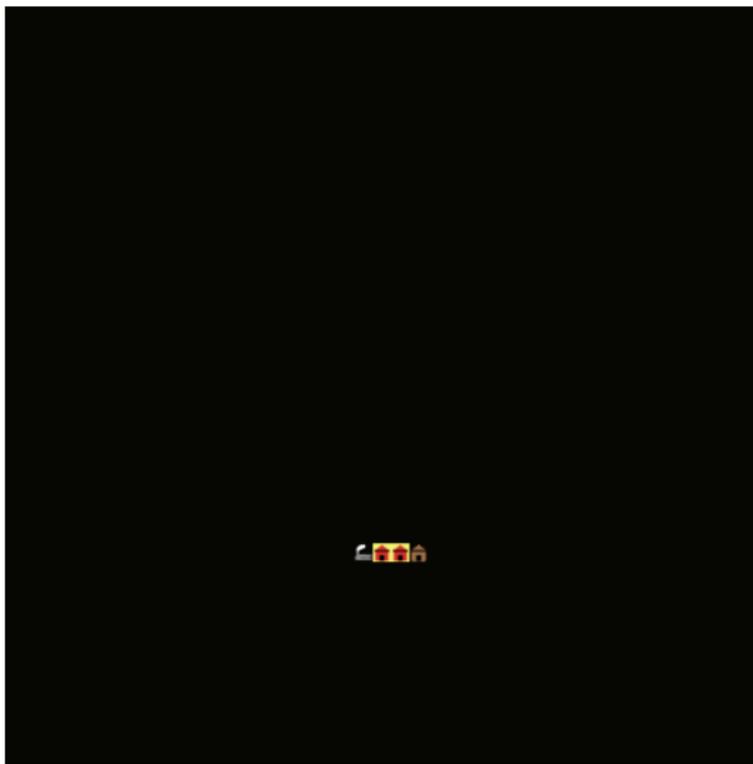
$$q = (1 - \alpha) \frac{Y - T(r)}{R(r)} - \alpha \beta x(r).$$

Mise en œuvre numérique

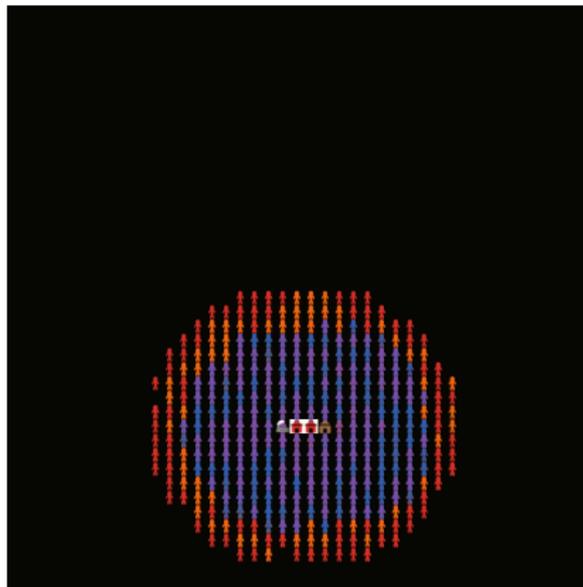
- ▶ Résolution distribuée par micro-simulation : introduction d'agents
- ▶ Utilisation de la plateforme NetLogo
- ▶ Application sur des villes types

Dans les simulations présentées ici, deux classes de revenus (*riches* et *pauvres*), et quatre classes d'agents (*riches*, *riches-val*, *pauvres* et *pauvres-val*) en fonction de leur sensibilité à la valeur positionnelle (paramètre β). Deux classes d'emplois : les *usines* et les *services*

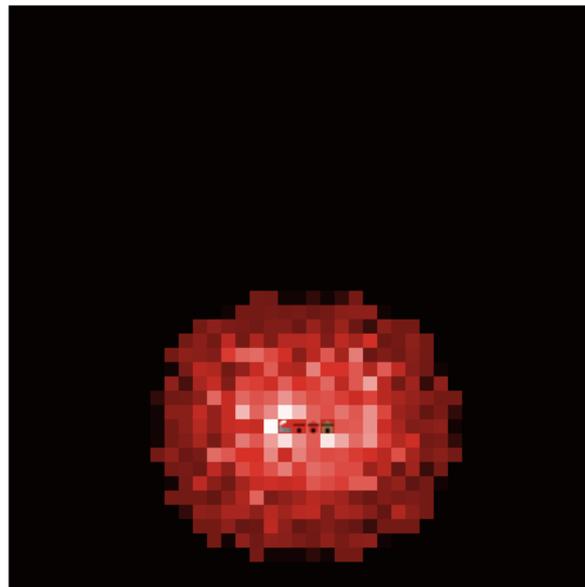
Simulation sans valeur positionnelle 1/2



Simulation sans valeur positionnelle 2/2

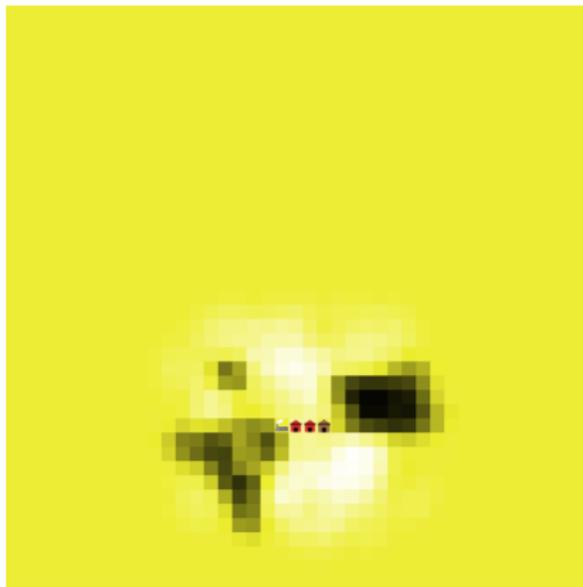


Population : pauvres en bleu
pauvres-val en violet
riches en rouge
riches-val en orange

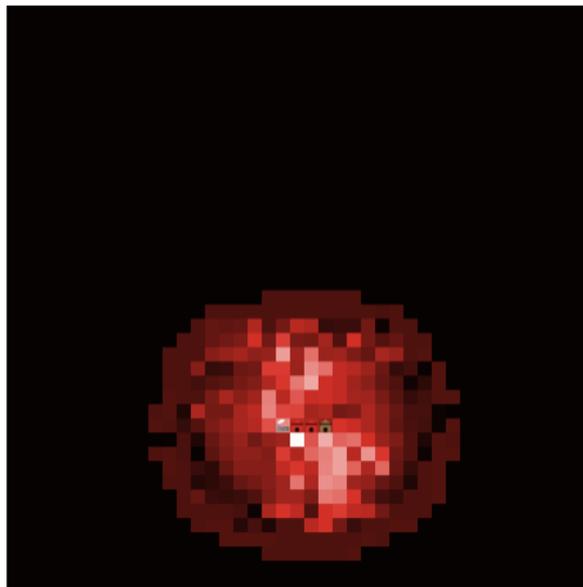


Prix

Scénario avec emploi central 1/3

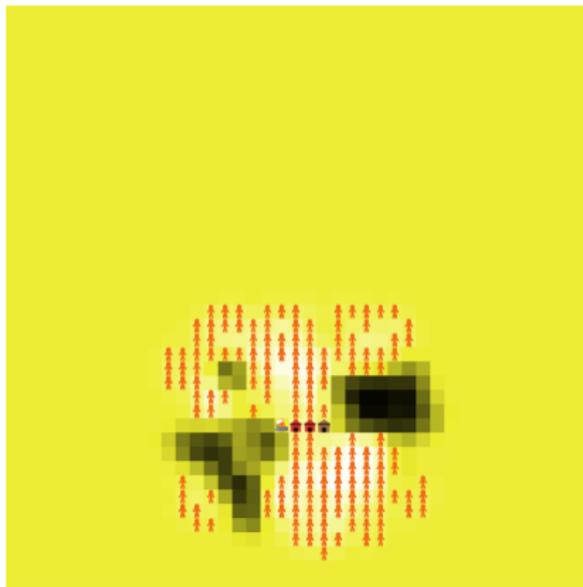


valeur positionnelle

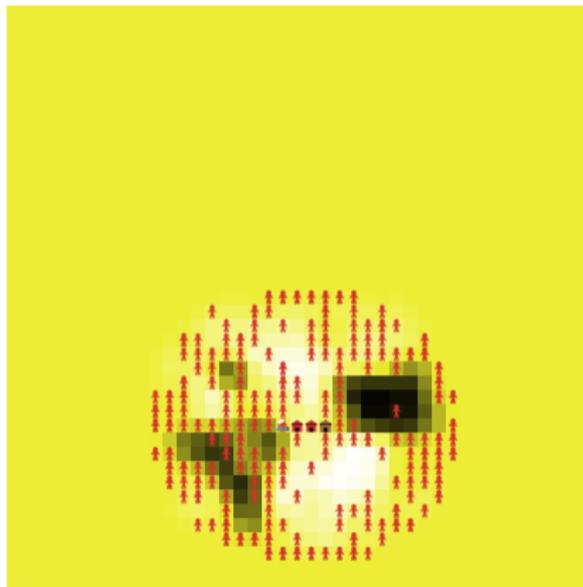


prix

Scénario avec emploi central 2/3

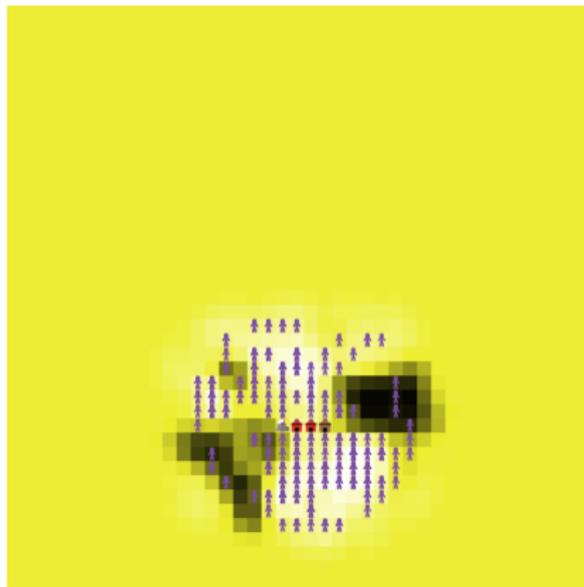


riches-val

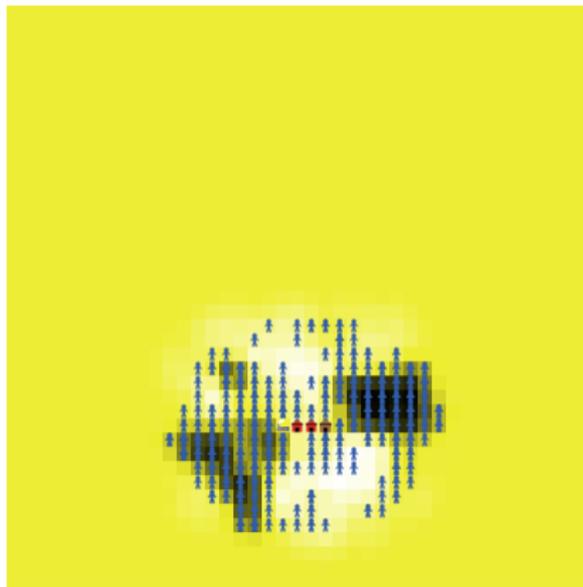


riches

Scénario avec emploi central 3/3

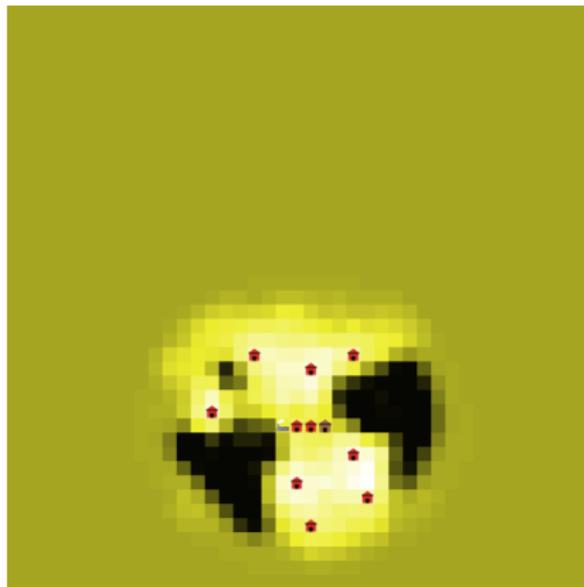


pauvres-val

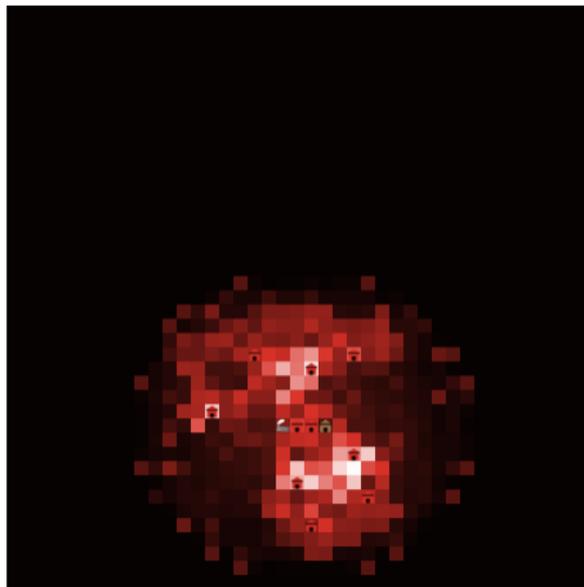


pauvres

Choc sur le coût du transport 1/3

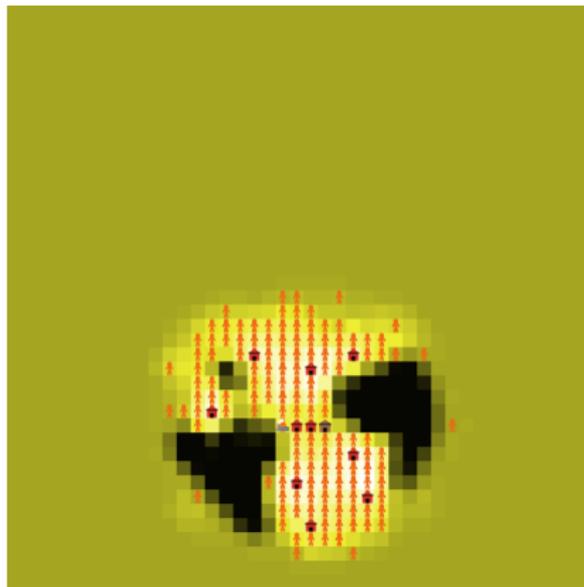


valeur positionnelle

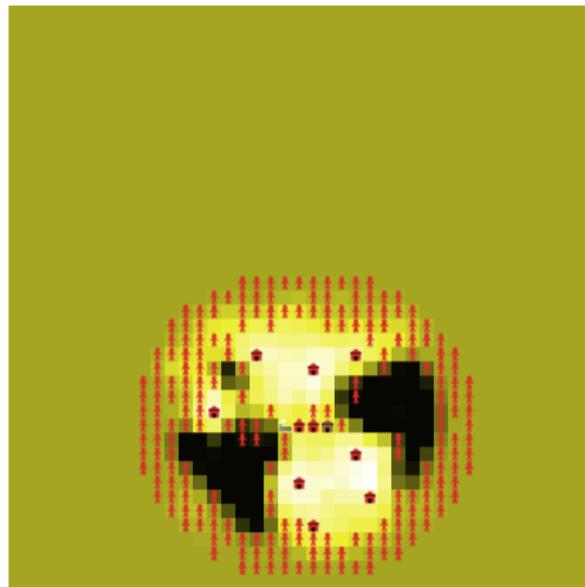


prix

Choc sur le coût du transport 2/3

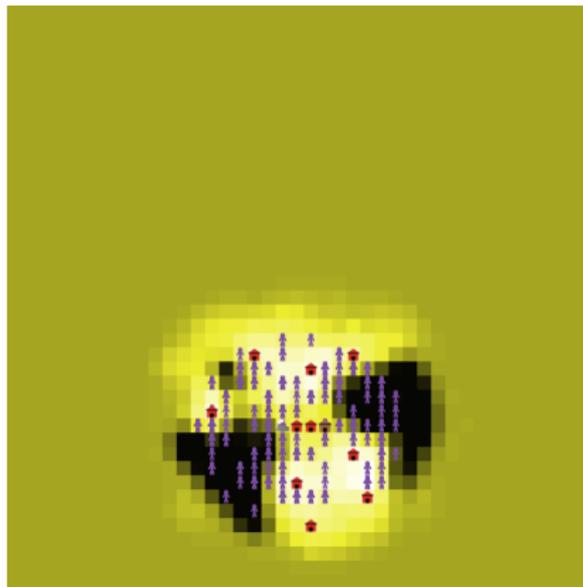


riches-val

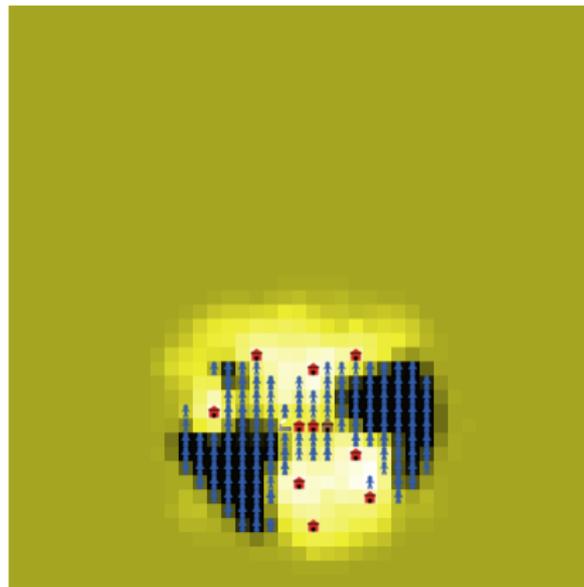


riches

Choc sur le coût du transport 3/3



pauvres-val



pauvres

Quelques références bibliographiques

- ▶ Allen, P. M., & Sanglier, M. (1978). Dynamic models of urban growth. *Journal of Social and Biological Structures*, 1(3), 265–280
- ▶ Amson, J. C. (1975). Catastrophe Theory: A Contribution to the Study of Urban Systems ? *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2(2), 177–221
- ▶ Bonin O, Hubert J-P (2014). Modélisation morphogénétique de moyen terme des villes : une schématisation du modèle théorique de Ritchot et Desmarais dans le cadre du modèle standard de l'économie urbaine, *Revue d'Économie Régionale et Urbaine*
- ▶ Courtat, T., Gloaguen, C., & Douady, S. (2011b). Mathematics and morphogenesis of cities : A geometrical approach. *Physical Review E*, 83(3), 036106
- ▶ Turing, A. M. (1952). The chemical basis of morphogenesis. *Bulletin of mathematical biology*, 52(1), 153–197

Passage de l'individuel au collectif

Modèle de coordination entre acteurs

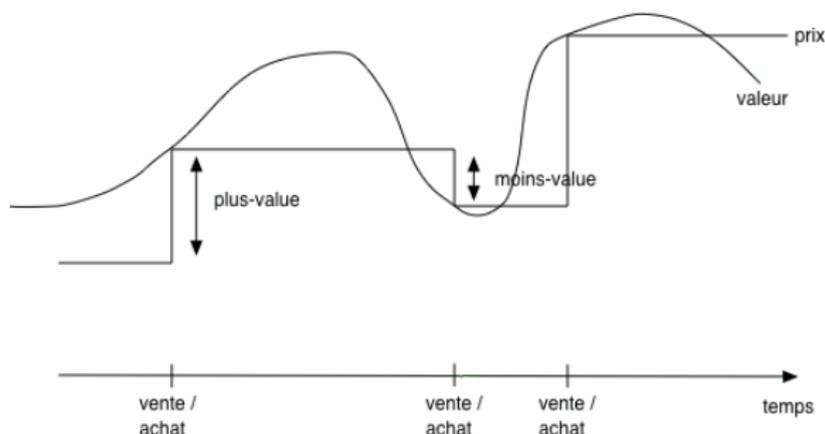
Modélisation simplifiée d'un marché immobilier.

- ▶ Empiriquement, on constate des période de hausse des prix très supérieure à l'inflation, et on assiste parfois même à la formation de bulles immobilières et à leur éclatement.
- ▶ Le mécanisme de coordination entre acteurs, s'il existe, est relativement subtil. Les acheteurs et vendeurs potentiels ne se réunissent pas pour décider de stratégies collectives, pas plus qu'ils ne sont contraints par des acteurs de régulation d'agir dans tel ou tel sens.

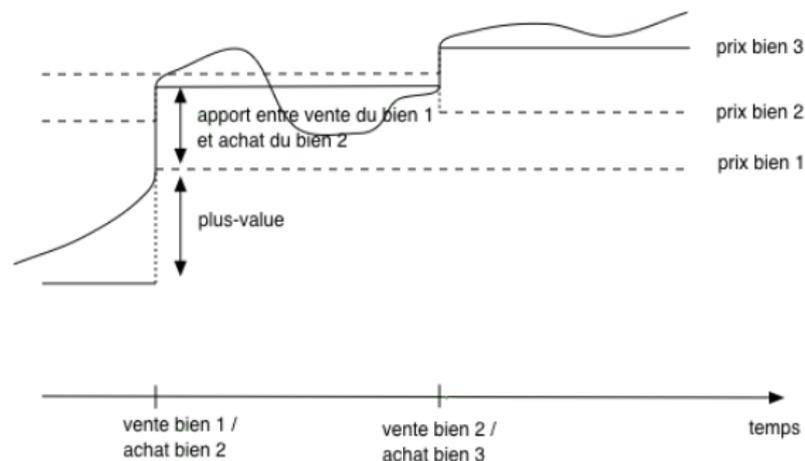
Proposition d'un modèle inspiré de la synergétique (H. Haken):
étude de systèmes ouverts loins de l'équilibre thermodynamique.

Principe du modèle

Au moins deux situations peuvent inciter un propriétaire à mettre en vente son bien : un changement dans sa situation personnelle (familiale, professionnelle, héritage, etc.), et un changement dans le marché immobilier qui lui permet de réaliser un bénéfice important. Le propriétaire réactualise donc son estimation de la valeur de son bien régulièrement. En revanche, les prix évoluent de manière discrète, uniquement lors des transactions.



Prix et valeur du point de vue d'un propriétaire



Formalisation du modèle

La valeur v est modélisée par une variable ayant une dynamique continue, et le prix p par une fonction en escalier, avec lors des transactions une transformation de la valeur en prix :

$$p^k = f(v^k)$$

pour l'individu k , avec f fonction identité ($p^k = v^k$) si l'estimation de l'individu k de la valeur de son bien est parfaite.

Les différentes transactions sont indexées par n , et la durée d_n^k entre deux transactions peut être constante (durée de possession de chaque logement identique pour tous les individus), ou encore dépendre de la dynamique du marché (durée de possession plus courte si marché très variable).

Formalisation du modèle (suite)

En notant v^k la valeur de l'individu k , et p^k le prix de son bien immobilier (celui de la dernière transaction), nous postulons que pour chaque individu :

$$\tau \frac{dv^k}{dt} = \alpha^k p^k + \sum_{l \neq k} \beta^{k,l} p^l - \gamma |v^k| v^k$$

avec τ un constante de temps, et α^k , $\beta^{k,l}$ et γ des paramètres qui décrivent le comportement de chaque individu.

- ▶ Le paramètre $\alpha^k > 0$ représente la confiance qu'a le propriétaire dans le fait que le prix auquel il a acheté son bien reflète bien le prix du marché.
- ▶ Les paramètres $\beta^{k,l}$ représentent la confiance qu'a le propriétaire dans les prix des biens des autres propriétaires pour estimer la valeur de son propre bien.

Formalisation du modèle (suite)

Si nous avons un seul acteur sur le marché, et donc tous les $\beta^{k,l}$ nuls, c'est une équation de Landau classique et la solution v converge vers $\sqrt{\alpha/\gamma}$.

Si on prend en compte le fait que chaque propriétaire ne peut suivre qu'un nombre fini de biens sur le marché, il faut introduire une contrainte sur la quantité d'information maximale utilisable. Nous postulons ainsi que :

$$C_{obs}^k = \sum_{l \neq k} (\beta^{k,l})^2 (p^l)^2 \leq C_{max}^k$$

avec C_{obs}^k charge cognitive de l'observateur, C_{max}^k dépendant de l'individu k ou identique pour tous les acteurs du marché. On suppose en introduisant les p^l dans l'équation que suivre des prix élevés induit une charge plus importante que suivre des prix bas.

Etude du système

L'intérêt d'un tel système est qu'une étude analytique est possible, en considérant un intervalle τ_n sur lequel le prix d'un bien k , ainsi que tous les autres prix, sont constants, et les valeurs toutes positives. Une étude numérique également. Nous simulons à un marché à quatre propriétaires, dont la dynamique est décrite par le système. Les intervalles τ_n sont de longueur aléatoire, modulés par la dynamique d'évolution de la valeur :

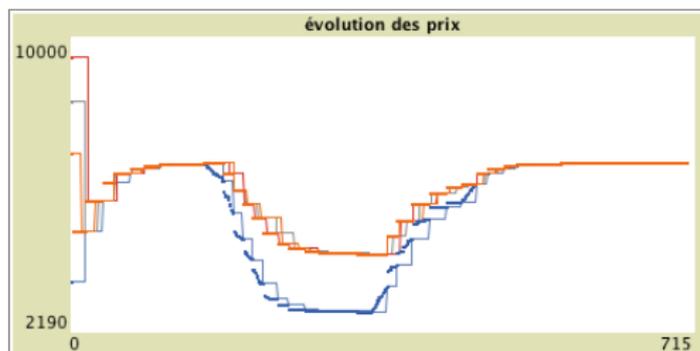
$$\tau_n = X/z$$

avec X variable aléatoire uniforme sur $[10, 100]$ et

$$z = 100(v^k - p_n^k)/v^k$$

Etude du système: asservissement

Le propriétaire 1 ne s'intéresse pas aux autres prix immobiliers, et les trois autres propriétaires accordent une importance très importante au prix du propriétaire 1, ce qui donne comme seuls coefficients non nuls : $\alpha^1 = \beta^{2,1} = \beta^{3,1} = \beta^{4,1} = 100$.



Exemple de scénario plus complexe

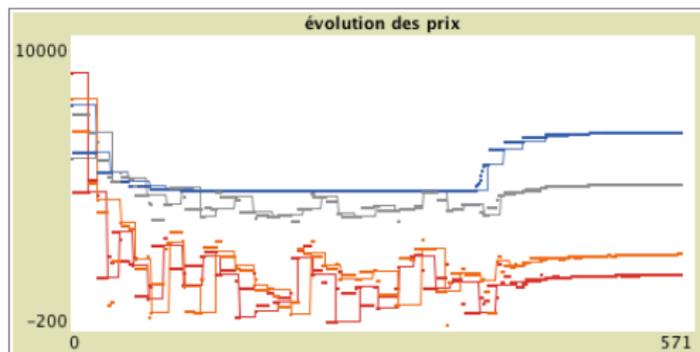
Dans certains cas, le paramétrage peut engendrer des instabilités.

$$\alpha^1 = 70$$

$$\beta^{2,1} = \beta^{2,2} = \beta^{2,3} = 33$$

$$\alpha^3 = 15, \beta^{3,1} = -20, \beta^{3,2} = 50, \beta^{3,4} = -75$$

$$\alpha^4 = 15, \beta^{4,1} = 25, \beta^{4,2} = -55, \beta^{4,3} = 75$$



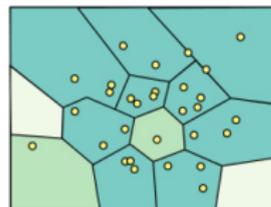
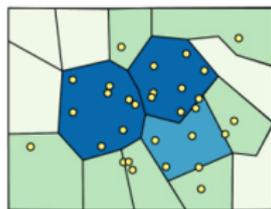
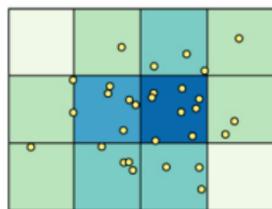
Quelques références bibliographiques

- ▶ Epstein, J. M. (2006). *Generative Social Science : Studies in Agent-Based Computational Modeling*. Princeton University Press
- ▶ Haken, H. (1993). Basic concepts of synergetics. *Applied Physics A*, 57(2), 111–115
- ▶ Pumain, D., Sanders, L., & Saint-Julien, T. (1989). *Villes et auto-organisation*. Paris, France : Economica
- ▶ Schelling, T. C. (1971). Dynamic models of segregation. *Journal of mathematical sociology*, 1(2), 143–186
- ▶ Weidlich, W., & Haag, G. (1983). *Concepts and Models of a Quantitative Sociology : The Dynamics of Interacting Populations*. Berlin : Springer Berlin Heidelberg. OCLC : 840301055

Zonages et statistique

Le MAUP: modifiable aeral unit problem

Problème ancien, formalisé par Openshaw: de nombreuses statistiques spatiales sont très sensibles aux zonages utilisés.



Source: <http://gispopsoci.org/maup/>

Erreur écologique

Article de Robinson en 1950: analyse de la relation entre taux d'analphabétisme et proportion de la population née hors des États-Unis pour chacun des 48 États (et le district of Columbia) à partir du recensement de 1930.

- ▶ au niveau des états, corrélation négative de $-0,53$ (ecological correlation)
- ▶ au niveau des individus (individual correlation), et non plus sur des pourcentages, le coefficient de corrélation passe à $+0,12$

En fait, les immigrants ont tendance à s'installer dans des États les plus prospères où la population autochtone est plus instruite.

Quelques références bibliographiques

- ▶ Goodchild, Michael F., Lam, Nina Siu Ngan (1980). Areal interpolation: a variant of the traditional spatial problem. London, Ont.: Department of Geography, University of Western Ontario, 1980.
- ▶ Openshaw, Stan (1977). A geographical solution to scale and aggregation problems in region-building, partitioning and spatial modelling. Transactions of the institute of british geographers, p. 459-472.
- ▶ Openshaw, Stan (1984). Ecological fallacies and the analysis of areal census data. Environment and Planning A, 1984, vol. 16, no 1, p. 17-31
- ▶ Robinson, W. S. (1950). Ecological Correlations and the Behavior of Individuals. American Sociological Review, 1950, p. 351-357.

Recherches plus éloignées des applications

Autres approches mathématiques

Utilisation de la théorie des catastrophes de Thom

- ▶ Stabilité des formes urbaines: applications de la théorie des catastrophes
- ▶ Passage de l'individuel au collectif: machines à catastrophes
- ▶ Couplage de dynamiques dans le substrat et dans l'espace des variables latentes

Utilisation de la théorie des catégories

- ▶ Approche relationnelle de la complexité, comme dans les travaux de Robert Rosen
- ▶ Couplage du monde physique et du monde des idées à l'aide d'espaces de Chu

Me contacter si vous voulez en savoir plus.