

Espace populations sociétés

Space populations societies

2006/2-3 :

Espace urbain et santé

Articles

Méthodologie

Diffusion des épidémies et complexités géographiques

Perspectives conceptuelles et méthodologiques

Spatial Diffusion of Epidemics: Approaches of Complexities in Geography

EMMANUEL ELIOT ET ÉRIC DAUDÉ

p. 403-416

<https://doi.org/10.4000/eps.1867>

Résumés

Français English

La complexité se fonde sur l'analyse des interactions entre les entités qui composent les systèmes. Chaque entité d'un « système complexe » est ainsi structurée selon différents sous-niveaux et niveaux parallèles qui entretiennent entre eux des relations spécifiques et de différentes natures. Dans ce champ scientifique, les travaux portant sur la diffusion des épidémies à l'échelle intra-urbaine sont rares. À partir de travaux sur le VIH / Sida à Mumbai (Bombay, Inde) et sur la modélisation multi-agents de la diffusion d'une épidémie, cet article présente plusieurs types de complexité : celle liée à des niveaux spatiaux, à la quantité d'éléments considérés et celle liée aux comportements de systèmes non linéaires. Dans un premier temps, il s'agira de s'intéresser aux phases de transition entre des stades de diffusion spatiale et aux effets des réseaux de circulation et d'échanges sur l'émergence d'une épidémie. Dans un second temps, celui de la modélisation, il s'agira de proposer une approche nouvelle sur la diffusion des épidémies en tenant compte à la fois des effets de l'hétérogénéité spatiale de l'espace intra-urbain et des formes de mobilité associées à la propagation d'un agent pathogène.

Complexity theories focus on the interactions between entities in systems. Each entity of a complex system is organised in sub-levels and parallel levels interacting together in different ways. In geography, micro-level studies considering the spatial dynamic of epidemics as complex systems are quite rare. From a set of studies based on the analysis of the HIV/ AIDS epidemic in Mumbai (Bombay, India) and on the multi-agent based modelling of an epidemic, this paper explores several types of complexity : of levels, of the quantity of entities, and of the dynamics in non linear systems. First, we analyse the transition phases in a spatial diffusion process and the

impact of circulation networks in the emergence of an epidemic. Second, we propose a new approach in the modelling of the spatial diffusion of an epidemic by combining both heterogeneity of space and patterns of mobility.

Entrées d'index

Mots-clés : complexité, diffusion, émergence, épidémie, géographie, système multi-agents

Keywords : agent based systems, complexity, diffusion, emergence, epidemic, geography

Texte intégral

- 1 Dans le débat scientifique contemporain, la complexité apporte une « nouvelle problématique » [E. Morin]. Dans l'état actuel des connaissances, il est cependant difficile d'en donner une définition précise en raison d'une part, de son utilisation fréquente et parfois abusive, et d'autre part, du caractère multidisciplinaire de cette approche qui a comme effet de produire une grande variété de définitions. Quoi qu'il en soit, il est possible d'en donner un cadre très général. L'étymologie latine du terme - *cum plexus* (tressé ensemble) - présente l'image d'un entrelacs de phénomènes liés les uns aux autres à différents niveaux. La notion de complexité est associée à une propriété d'un système, défini comme étant une « entité autonome par rapport à un environnement, organisée en structure stable (repérable dans la durée) et constituée d'éléments interdépendants, dont les interactions contribuent à maintenir la structure du système et à la faire évoluer »¹. Ainsi, la complexité se fonde sur l'analyse des interactions entre les entités qui composent les systèmes. Chaque entité d'un « système complexe » est ainsi organisée selon différents sous-niveaux et niveaux parallèles qui entretiennent entre eux des relations spécifiques et de différentes natures. La dynamique à un niveau donné peut ainsi avoir un impact plus ou moins direct sur les autres niveaux. La caractéristique fondamentale de tout système complexe est donc l'émergence, processus par lequel des organisations à l'échelle macro peuvent apparaître de manière parfois inattendue à partir de processus interactifs à l'échelle micro.
- 2 Dans cette perspective théorique, les travaux utilisant les théories de la complexité en géographie de la santé sont encore rares [Gatrell, 2005]. Concernant la diffusion spatiale des épidémies, deux types peuvent cependant être identifiés. Les premiers mettent l'accent sur l'étude de la configuration des réseaux et leurs propriétés, dans une perspective de modélisation [Gould, 1993 ; Buchanan, 2002 ; Barabasi, 2002 ; Watts 2004 ; Dibble, 2004]. Les seconds s'intéressent aux synergies d'interactions et aux rôles des acteurs permettant d'expliquer l'apparition de catastrophes sanitaires. À cet égard, les travaux des Wallace, analysant les effets des politiques publiques et leur « résonance » sociale et sanitaire dans le quartier du Bronx à New York, sont les plus révélateurs de cette approche [Wallace R., Wallace D., Ullmann, Andrews, 1999].
- 3 Dans des perspectives comparables, l'objectif de cet article est de s'intéresser à la diffusion des épidémies à l'échelle intra-urbaine. En tant qu'objet spatial fondé sur la coprésence², la ville est un lieu de concentration caractérisée par de nombreux et intenses mouvements. Elle constitue une échelle d'étude souvent mineure dans l'analyse de la diffusion des épidémies en raison, principalement, de l'absence de données quantitatives (épidémiologiques, enquêtes de population...) disponibles, fines, et localisées. À l'aide de travaux sur le VIH / Sida à Mumbai (ex-Bombay) (Union indienne) et sur la modélisation multi-agents de la diffusion d'une épidémie, cet article présente plusieurs formes de complexité [Dauphiné, 2003] : celle liée à la quantité d'éléments considérée, de niveaux spatiaux et d'organisation identifiés et celle traitant de comportements non linéaires de systèmes. Dans un premier temps, il s'agira de s'intéresser d'une part, aux phases de transition entre des stades de diffusion spatiale et d'autre part, aux effets de réseaux circulatoires et d'échanges sur l'émergence de l'épidémie de VIH / Sida à Mumbai. Dans un second temps, celui de la modélisation, il s'agira de proposer une approche nouvelle sur la diffusion spatiale des épidémies en

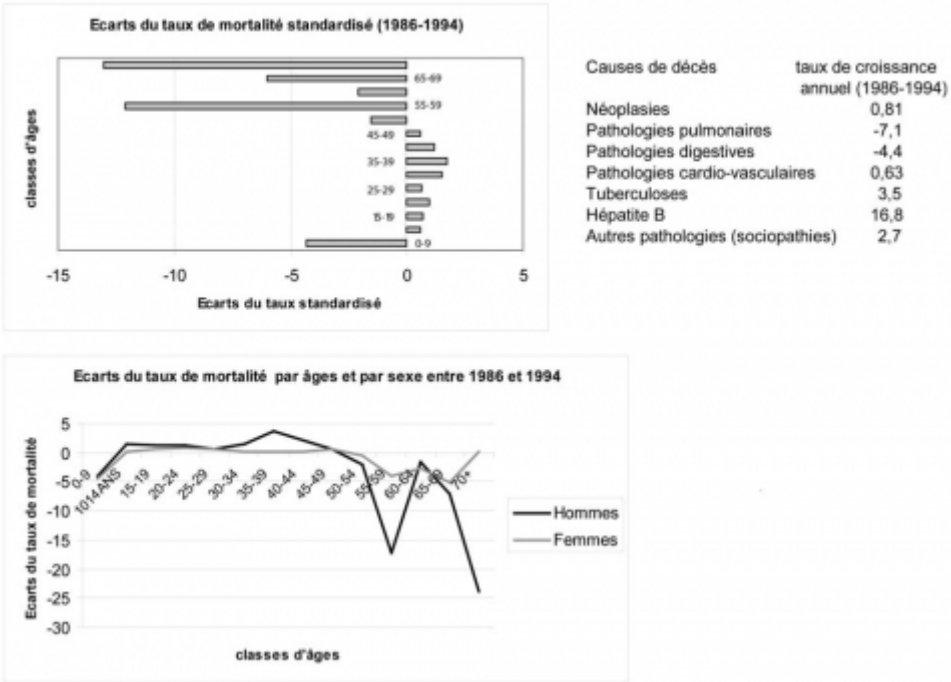
tenant compte à la fois des effets de l'hétérogénéité de l'espace intra-urbain et des formes de mobilités associées à la propagation d'un agent pathogène. Ces deux approches, conceptuelles et méthodologiques, illustrent de récentes perspectives en matière de compréhension des processus de diffusion à l'échelle de la ville.

1. Phases de transition dans la diffusion d'une épidémie : Jeux d'acteurs et logiques d'échelles. Exemple du VIH/ SIDA à Mumbai (Union Indienne)

1.1. Indices d'une bifurcation³ dans un système épidémiologique

- ⁴ Au début des années 1990, dans la métropole indienne de Mumbai (Bombay), plusieurs indices semblent présenter les caractéristiques d'un changement du point de vue épidémiologique allant en faveur d'une épidémisation par le Virus d'Immunodéficience Humaine (VIH) responsable du sida. Pour identifier ce changement, un ensemble de données a été recueilli auprès des services municipaux de la métropole sur la période 1986-1994.
- ⁵ Il présente le nombre de décès ainsi que leurs causes par âge et par sexe⁴.
- ⁶ Sur cette période, l'évolution de la mortalité par classes d'âges⁵ (figure 1) présente trois caractéristiques : une diminution de la mortalité infantile et de celle des enfants, une diminution très nette de la mortalité des plus de 50 ans, et une augmentation sensible de la mortalité des adultes et jeunes adultes. La mortalité masculine est cependant très marquée par la diminution dans les classes d'âges âgées et l'augmentation chez les adultes et jeunes adultes. Cette évolution de la mortalité à Mumbai peut être comprise à la lumière du modèle de la transition épidémiologique⁶. Ainsi, la baisse de la mortalité infantile et la forte diminution chez les populations les plus âgées au cours de la période étudiée en sont les conséquences. L'augmentation chez les jeunes adultes, en particulier hommes, paraît au contraire une « anomalie » dans le modèle puisque les taux devraient en effet se stabiliser ou croître de manière non significative.

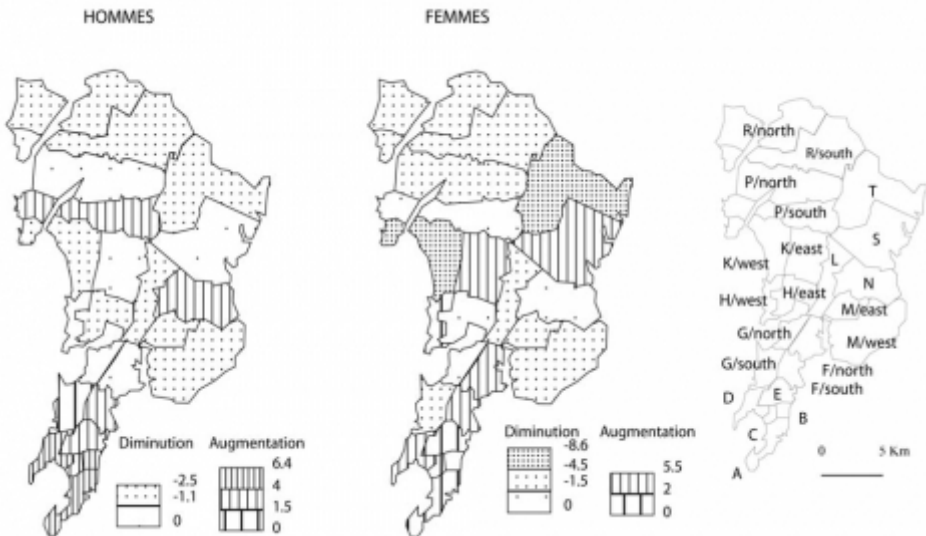
Figure 1 : Variation de la mortalité à Mumbai (1986-1994) et des causes de décès



Eliot E., 1999

- 7 D'autres indices permettent d'aller dans le sens de l'hypothèse d'une modification du système épidémiologique de la métropole. Les données disponibles pour l'étude des causes de décès sont - parmi celles ayant fait l'objet d'une collecte - parmi les plus incomplètes, mais elles autorisent cependant à identifier quelques tendances (figure 1) : une augmentation des maladies dégénératives, des sociopathies et de certaines maladies infectieuses, et plus particulièrement la tuberculose et l'hépatite B. En résumé, ces différents indices permettent de faire le constat d'une complexification de la mortalité. Elle se manifeste de deux manières : une augmentation de certaines pathologies infectieuses et une double caractéristique en matière de mortalité (diminution au sein des classes d'âges âgées et augmentation au sein des jeunes adultes).
- 8 Ces changements sont par ailleurs très localisés dans la métropole (figure 2). L'évolution de la mortalité par sexe entre 1986 et 1994 rend compte d'une augmentation, plus particulièrement chez les hommes et dans les wards⁷ centraux et méridionaux (11 à 18% dans le ward A, par exemple).

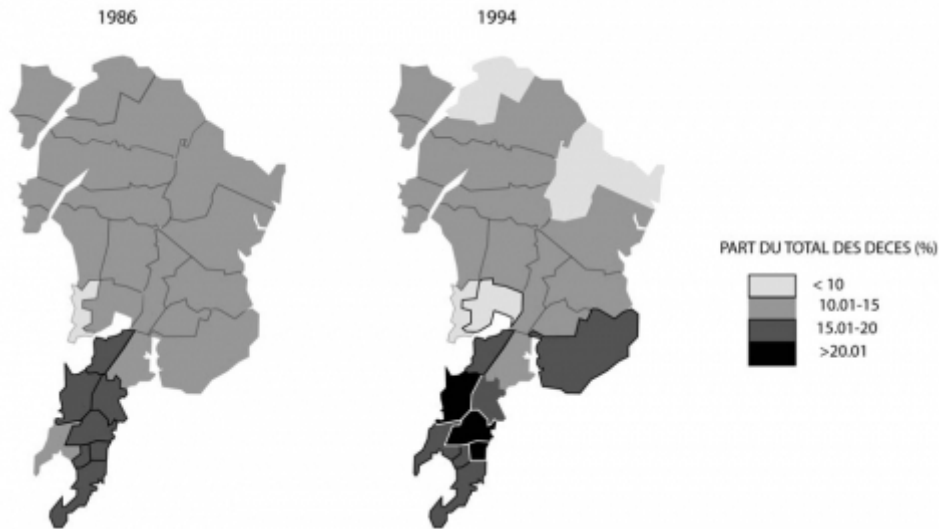
Figure 2 : Évolution de la mortalité par sexe et par ward à Mumbai (1986-1994)



- 9 À ces changements du point de vue de la mortalité se superpose une modification de la part de certaines causes de décès. En l'absence de relevé des cas de sida au cours de la période, certaines causes de décès considérées comme étant des maladies opportunistes types ont été sélectionnées : tuberculoses, hépatite B, pathologies digestives et

pulmonaires. Ainsi, entre 1986 et 1994, ces pathologies constituent une part de plus en plus importante des causes de décès dans les wards du sud et du centre (figure 3). Le ward E est exemplaire à cet égard. Ces pathologies représentaient 18,4 % du total des décès en 1986. La proportion est de 42,2 % en 1994 !

Figure 3 : Changement de la part des maladies en synergie avec le sida

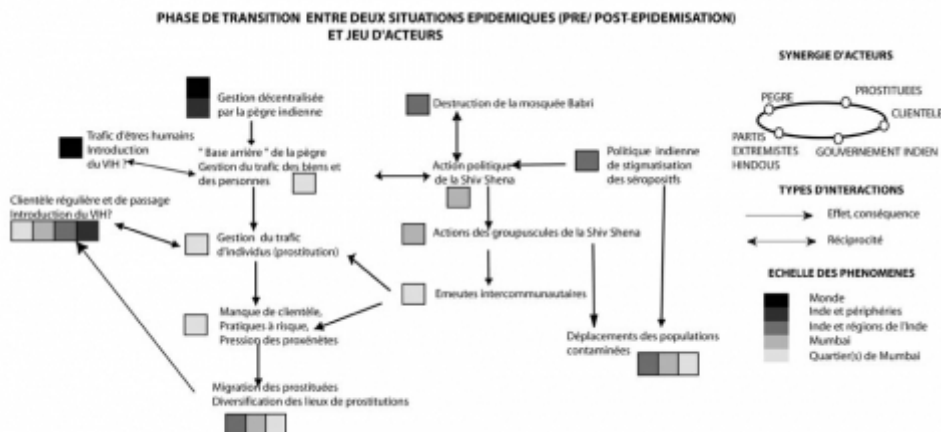


- 10 En somme, dans le système épidémiologique de la métropole, une bifurcation semble être apparue au cours des années 1990. La modification des causes de décès et l'évolution de la mortalité, en particulier masculine, en sont les indices. L'épidémie de VIH / Sida semble en outre avoir « trouvé sa place » dans les parties centrales de la métropole au cours des années 1990.

1.2. Synergie d'acteurs et phases de transition des stades épidémiques : des hypothèses

- 11 L'émergence de l'épidémie du VIH/ Sida semble liée à une synergie entre différents acteurs. Les quartiers centraux, à partir desquels semble s'être propagée l'épidémie, sont issus de la vague d'industrialisation britannique de la fin du 19^{ème} siècle. À la suite de la crise textile des années 1980, la population, dont la plupart travaillait depuis des décennies dans les filatures des quartiers, a basculé dans une grande précarité. Cette situation a constitué un terrain favorable au renforcement des activités de la pègre de Mumbai (trafic de biens, de personnes...) déjà présente dans ces quartiers depuis plusieurs décennies. Le schéma (figure 4) présente les différentes stratégies des acteurs de l'épidémie qui semblent avoir conduit d'une part, à l'émergence de l'épidémie à Mumbai et d'autre part, à une situation de concentration de l'épidémie dans les quartiers centraux et à une dispersion dans d'autres quartiers de la métropole.

Figure 4 : Émergence et diffusion de l'épidémie : une synergie d'acteurs



- 12 Premièrement, la pègre de Mumbai dont les chefs résident aux Émirats Arabes Unis, organise le trafic des individus et des biens gérés localement par les gangs. Le VIH a pu ainsi avoir été introduit grâce à un réseau organisé de prostitution [Weniger, Tekebe, Ou CY, Yamazaki, 2001]. Par ailleurs, l'épidémie a pu être introduite et propagée par la clientèle des prostituées du quartier.
- 13 Deuxièmement, les carences de l'action publique, en particulier au cours des années 1990, ont conduit à faciliter la propagation de l'épidémie. Le sida étant considéré comme un « mal des étrangers », les mesures de prévention destinées à la population indienne ont ainsi été dans un premier temps très peu nombreuses et très focalisées sur les « groupes à risque » (étrangers, prostituées, chauffeurs-routiers...). Par exemple, les actions conjointes de la police et des services de santé de la métropole ont cherché avant tout à « nettoyer » les populations de certains quartiers. Les raids de la police visaient ainsi à chasser du quartier les prostituées qui étaient considérées contaminées. Dispersées, ces populations si elles étaient infectées ont pu, ensuite, faciliter la propagation de l'épidémie dans d'autres quartiers de la métropole.
- 14 Troisièmement, les actions de la Shiv Sena⁸ ont facilité la dispersion d'individus ayant pu être contaminés. En effet, l'« hygiène sociale » occupe une place importante dans l'idéologie du parti [Heuzé, 2000]. L'impureté, généralement associée à l'hindouisme orthodoxe, se teinte d'activisme grâce aux relais politiques de quartiers (les Shakkas), animés par les partisans. Prostituées et musulmans des quartiers centraux sont donc les boucs émissaires, les « parasites » qu'il faut chasser des quartiers considérés comme étant les territoires de l'identité des habitants de Mumbai.
- 15 Enfin, l'impact de la destruction de la mosquée Babri d'Ayodhya (Inde du Nord) le 6 décembre 1992 par des militants de la famille extrémiste hindoue opéra comme une bombe à travers l'Inde et produisit des vagues d'émeutes intercommunautaires dans de nombreuses villes. À Mumbai, la plupart d'entre elles se déroulèrent dans les quartiers centraux de la métropole. Dans le principal quartier de prostitution de Kamathipura, elles eurent l'effet suivant : une diminution de la clientèle⁹ et en conséquence, un déplacement d'une partie des prostituées vers d'autres quartiers.
- 16 En somme, à différentes échelles, une synergie d'interactions - dont certaines s'organisent en boucles de rétroaction positives - a contribué conjointement à l'apparition de l'épidémie et au passage d'un stade de concentration à un stade de dispersion de l'épidémie. Toutefois, la situation sanitaire de ces quartiers centraux a toujours été problématique depuis leur création au milieu du 19^{ème} siècle. Au début du 20^{ème} siècle, les responsables sanitaires britanniques qualifiaient ainsi la situation d'« intolérable » [Ramasuban, Cook, 1996]. En effet, les taux de mortalité de ces quartiers étaient les plus élevés de la ville et cette caractéristique s'est maintenue au cours du 20^{ème} siècle. En d'autres termes, ces quartiers centraux se caractérisent par une situation sanitaire médiocre et durable, situation ponctuellement aggravée par des crises épidémiologiques de grande ampleur : peste bubonique entre 1890 et 1914, et VIH / Sida au milieu des années 1980, entre autres.

1.3. Crises sanitaires et centralité dans les réseaux

- 17 Ces crises épidémiques sont des indicateurs d'une instabilité, d'un déséquilibre dans une situation de stabilité relative d'un point de vue épidémiologique. Pourquoi ces crises apparaissent-elles régulièrement dans ces quartiers centraux ? Si l'on considère l'épidémie de sida, la situation de précarité laissée par la crise de l'industrie textile du début des années 80, l'abandon des politiques publiques ainsi que le développement d'une « économie souterraine » a pu faciliter l'épidémisation. Ces quartiers centraux sont par ailleurs très « connectés » à différentes échelles (monde, région, villes indiennes...) et donc très ouverts sur l'extérieur par le biais de flux de personnes et de biens. Dans ces quartiers, cette épidémie peut être considérée comme étant l'un des indices d'une « mondialisation souterraine » opérée dans ces quartiers. Ceci étant, dès leur création au milieu du 19^{ème} siècle, ces quartiers ont été très centraux de par leur situation dans les réseaux économiques. À la fin du 19^{ème} et au début du 20^{ème} siècle,

ils accueillait les populations indiennes pauvres issues des régions rurales venues travailler dans l'industrie textile grandissante et Bombay était un nœud majeur dans les réseaux commerciaux et maritimes de l'empire des Indes [Durand-Dastès, 2003] En somme, de par leurs centralités multiples (ville, région, monde) et historiques (dans le réseau de l'empire des Indes, dans le réseau de l'antimonde¹⁰), ces quartiers semblent être des lieux privilégiés pour l'accueil des épidémies : régionale aux 19^{ème} et 20^{ème} siècles et mondiale à la fin du 20^{ème} siècle. Espaces centraux et accueillant des populations mobiles souvent précaires, ces lieux constituent des espaces favorables à l'émergence et à la propagation des épidémies.

- 18 Si les sciences de la complexité offrent de nombreux concepts pour « lire » les phénomènes qui se déploient dans l'espace géographique, elles offrent également des méthodes pour explorer le comportement d'hypothèses dans le temps et dans l'espace.

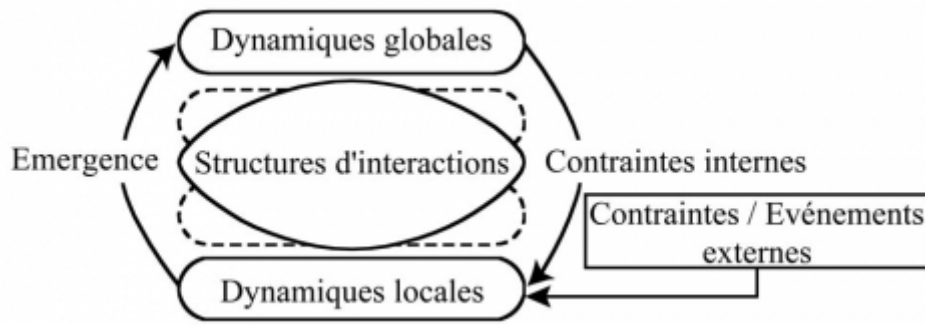
2. Effets des configurations et des formes de mobilités sur la diffusion spatiale d'une épidémie : Modèles à base d'agents

- 19 Le passage entre des concepts aussi riches que la bifurcation, la non-linéarité ou l'émergence et leurs formalisations n'est pas aisé. L'enjeu est donc de proposer des modèles relativement simples dans leur construction - nous verrons plus loin la signification de cette proposition - qui permettent de redécouvrir la complexité lors des simulations. Il s'agit alors non pas de reconstruire la complexité du réel mais bien de tester la pertinence et la validité d'hypothèses sur le fonctionnement de cette complexité.

2.1. Méthodologie multi-agents et modèle formel de diffusion

- 20 Les systèmes multi-agents (SMA) relèvent des méthodes dites individus-centrées, ils permettent d'implémenter informatiquement des modèles qui sont des « mondes artificiels » et de mener des expérimentations proches de celles d'un laboratoire, par le contrôle et la modification possible de l'ensemble des paramètres et la réplication de séries d'expériences par la simulation. Fruit des recherches en intelligence artificielle distribuée et en robotique initialement, ces agents interagissent entre eux et avec leur environnement, le plus souvent selon des modes de coopération, de concurrence ou de coexistence, dans le but de résoudre des problèmes dont la complexité dépasse leurs capacités individuelles. Les domaines d'application de telles méthodes s'élargissent et se développent ces dernières années en sciences humaines et sociales dans le cadre des sciences de la complexité et plus particulièrement en géographie avec la GéoSimulation [Benenson & Torrens, 2004]. En offrant une formalisation explicite de l'espace, du temps, des interactions, des comportements et des niveaux d'organisation, ces méthodes trouvent ainsi un terrain favorable aux questionnements géographiques [Daudé, 2005], notamment dans l'étude exploratoire de phénomènes qui se propagent dans l'espace [Daudé, 2003, 2006]. Il s'agit alors de proposer une formalisation explicite des mécanismes fondamentaux qui concourent à la dynamique d'un phénomène, ceux-ci étant ensuite implémentés dans un système informatique afin d'en éprouver la validité par la simulation.
- 21 La figure 5 illustre les composantes essentielles d'un système, un ensemble d'objets en interactions, la complexité étant dans la nature non prévisible, non déductible des propriétés globales du système par la seule analyse de ses composants élémentaires.

Figure 5 : Schéma général d'un système complexe



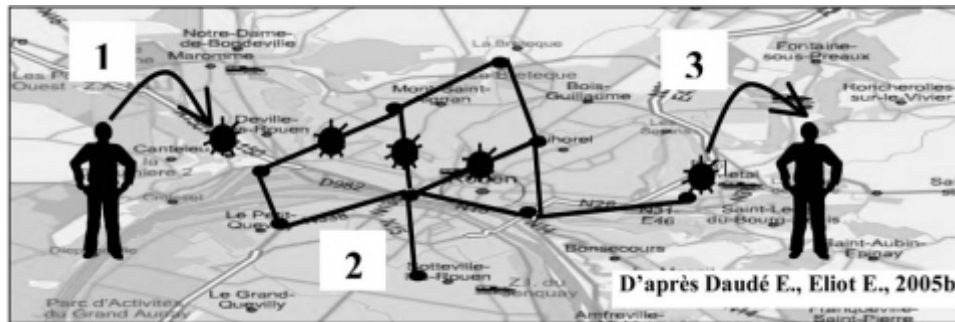
- 22 Dans l'organisation d'un système complexe modélisé, les *dynamiques locales* représentent le comportement des entités élémentaires, souvent décrites comme le niveau individuel en sciences humaines et sociales, et comme un agent d'un point de vue informatique. Selon J. Ferber (1995), l'agent est une entité qui évolue dans un environnement, capable de le percevoir, le plus souvent de manière limitée, et peut agir dessus. La communication entre agents se réalise sous la forme d'échanges de flux, soit d'information soit de matière. L'agent possède ainsi des ressources propres et a un comportement en partie autonome, lequel peut être vu comme la conséquence de ses connaissances, de ses buts et des interactions qui le lient aux autres agents. Dans les approches individus-centrées, le niveau élémentaire ne se confine évidemment pas au seul niveau individuel, il peut selon la nature et l'échelle du questionnement relever de niveau d'agrégation supérieur, tel un quartier [Vanbergue, 2000], lorsqu'on s'intéresse aux migrations intra-urbaines ou à une ville [Bura, 1996] dans le cas de l'émergence d'un système de peuplement par exemple. L'hétérogénéité des caractéristiques et des comportements individuels, liés en partie à des considérations sociales, économiques ou culturelles produit alors par le jeu des interactions des *dynamiques globales* qu'il est possible de découvrir à travers la simulation : un ensemble de comportements dit à risque dans le cas du sida est en partie responsable de sa propagation à l'échelle de la ville, par exemple.
- 23 Au-delà de cette approche strictement émergentiste, du local vers le global, se produisent dans la dynamique du phénomène de propagation des effets de rétroaction, du niveau global vers le niveau local, qui peuvent freiner ou accélérer la diffusion : politique sanitaire, transferts de population, etc. Ces mécanismes sont fondamentaux car ils sont observables et si l'objectif des modèles et des simulations est d'explorer les trajectoires possibles de vagues d'épidémies selon un fonctionnement décentralisé, c'est-à-dire sans action de contrôle du niveau supérieur vers les niveaux inférieurs, l'objectif est également de tester l'efficacité de politiques de prévention : où et quand intervenir pour être le plus efficace dans la lutte contre la propagation d'une épidémie ?
- 24 Enfin, des éléments extérieurs au système modélisé peuvent intervenir, tels des mouvements migratoires en provenance d'autres pays. Or, si dans la nature les systèmes complexes sont ouverts sur l'extérieur, leur implémentation informatique oblige à les isoler, quitte à réintroduire dans la simulation des événements ponctuels traduits en événements informatiques. Dans le cas de la diffusion d'une épidémie dans une ville, l'évènement extérieur au système peut être l'apparition en un lieu du virus : on s'intéresse alors moins à la simulation de ces conditions d'apparition qu'aux mécanismes responsables de sa propagation.
- 25 La modélisation informatique de ce schéma général dans un but de simulation conduit à proposer un modèle formel rendant compte de ces différents éléments dans le cas de la diffusion [Daudé, Langlois, 2006]. Ce modèle propose de distinguer une structure, la base invariante du système, et une dynamique, qui rend compte des processus d'évolution du contenu de la structure. La figure 6 illustre les différents composants de ce modèle. La structure se définit ainsi par trois éléments :
- Les entités élémentaires, appelées *hôtes*, qui répondent à un stimulus par un changement d'état (un modèle d'état de type Susceptible-Infected-Recovered (SIR) par exemple) ;
 - Les particules qui rendent probable la diffusion, appelés *vecteur* ;

- Les *canaux de propagation* qui représentent les voies empruntées par le vecteur pour se répandre (réseaux de communication, contact interpersonnels, proximité spatiale, etc.).

26 La dynamique de ce modèle est formalisée à l'aide de règles de transition parfaitement adaptées à la méthodologie multi-agents :

- la règle d'*émission* (1) caractérise le processus qui régit la sortie du vecteur de l'hôte dans le canal ;
- la règle de *circulation* (2) concerne le mécanisme de propagation du vecteur dans le canal,
- la règle d'*acquisition* (3) définit le ou les mécanismes de changement d'état de l'hôte, donc la contamination par le vecteur.

Figure 6 : Schéma d'un modèle formel de diffusion



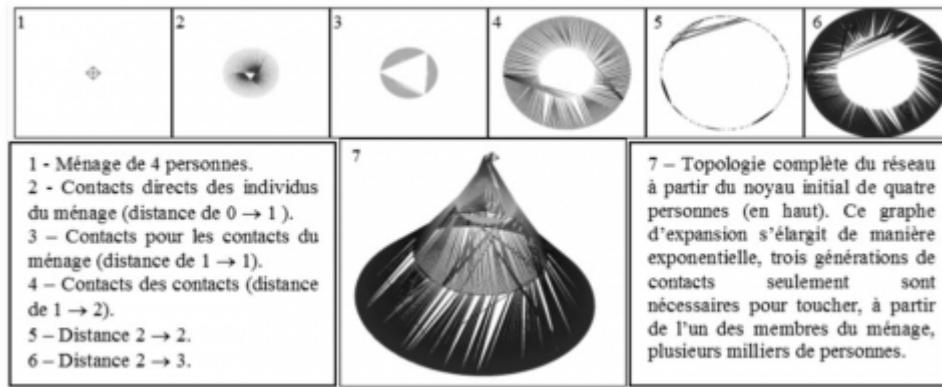
27 Ces trois processus interagissent et produisent la dynamique de diffusion. Il reste alors à préciser, en fonction de la question posée, les différents éléments qui composent ce modèle formel.

2.2. Une épidémie dans la ville

28 La possibilité de prédire comment une épidémie se manifeste et se répand dans une population donnée est essentielle pour la surveillance et la mise en oeuvre de stratégies de contrôle. La simulation informatique est à ce titre un complément méthodologique aux modèles mathématiques et statistiques développés au siècle précédent, notamment par la richesse des informations qu'il est possible d'intégrer dans le modèle et des scénarii qu'elle permet de tester.

29 En 2004, S. Eubank *et al.* publient dans *Nature* un article sur la propagation de la variole dans la ville de Portland, États-Unis. Le modèle EpiSims [Eubank *et al.*, 2004] est fondé sur les mêmes principes évoqués jusqu'ici : la prise en compte de comportements individuels, les interactions entre individus, l'existence de réseaux relationnels et les effets de la structure spatiale dans la propagation de l'épidémie. La richesse de ce travail est qu'il tire parti d'une autre application, TransSims [Barrett *et al.*, 2000] dont l'objectif est de simuler les déplacements des individus dans la ville, contraints par les infrastructures de transport. Calibré à partir d'enquêtes, ce modèle initialement prévu pour estimer les effets de l'introduction de nouvelles routes dans la ville a été utilisé pour simuler la propagation d'épidémies, en se focalisant sur l'existence de réseaux sociaux de type « petits mondes¹¹ ». La figure 7 montre par exemple la topologie d'un réseau social théorique, constitué à la base d'un ménage de quatre personnes. Avec les réseaux de type « petits mondes » ainsi construits, les auteurs démontrent que la distance nécessaire pour toucher un grand nombre de personnes est relativement petite, la distance s'exprimant ici en termes de relations sociales. À la différence des supernœuds physiques, il n'y a pas ici de supernœuds humains (des centres de réseaux), ce qui aurait constitué le cas échéant un moyen de lutte efficace pour ralentir la propagation des épidémies, en isolant par exemple les individus représentant des nœuds importants. Dans leur travail, aucun individu n'a plus de 15 contacts dans le réseau.

Figure 7 : Topologie de réseau social de type « Petit Monde » (d'après S. Eubank, 2004)

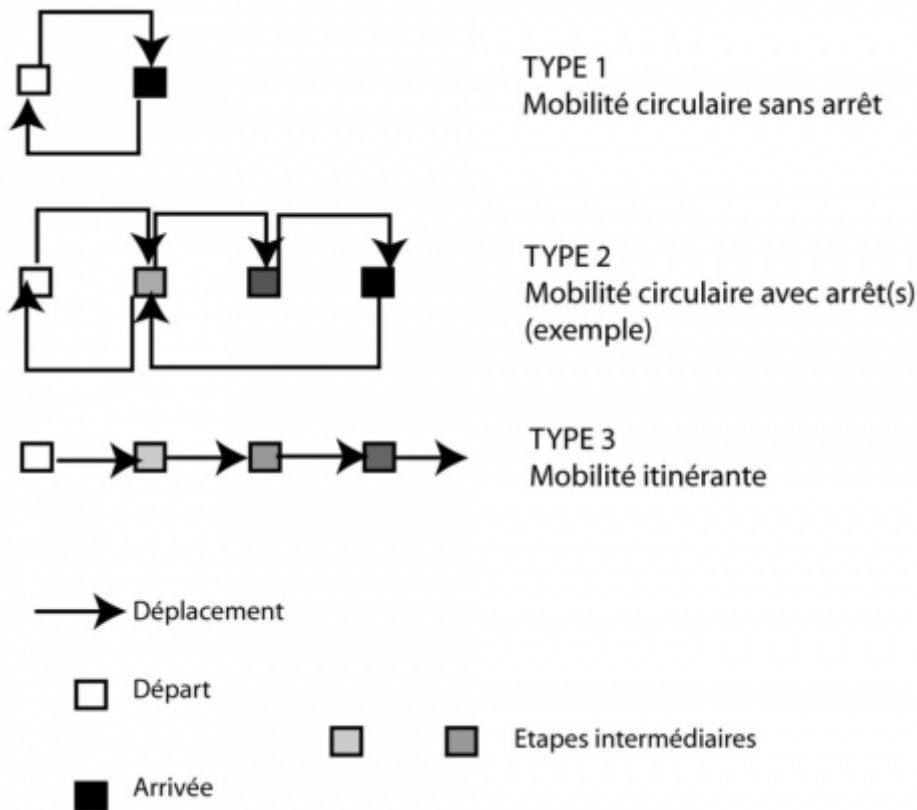


- 30 Au-delà de la formalisation de ces réseaux sociaux, le modèle utilise pour son fonctionnement un ensemble de paramètres décrivant une journée « type » pour chaque individu. On connaît ainsi à un instant donné : son point de départ, sa localisation, son activité en ce lieu, son (ses) moyen(s) de locomotion et les personnes qui l'accompagnent.
- 31 Dans la ville « artificielle » de Portland, ce sont ainsi plus de 180 000 lieux qui servent de supports de déplacement aux quelque 1,6 million d'agents. L'objectif d'EpiSims est alors de simuler la propagation de la variole et les effets de l'introduction de contre-mesures telles que la mise en quarantaine, la vaccination, l'utilisation ciblée ou massive d'antibiotiques. Une des conclusions de ce modèle est que la rapidité d'intervention est le critère de loin le plus important pour lutter contre l'extension d'une épidémie de ce type : l'isolement forcé ou volontaire des personnes infectées détermine l'envergure de l'épidémie [Barrett et al., 2005]. Cependant, au-delà même de la reproductibilité d'un tel modèle, on peut se demander si ce facteur d'isolement joue un rôle aussi important dans le cas d'épidémies qui opèrent sur des temporalités beaucoup plus longues, à l'instar du sida.

2.3. Configurations spatiales et modèles de mobilités dans la diffusion des épidémies

- 32 La modélisation implique de faire des choix entre des modèles « réalistes » qui intègrent une importante quantité d'informations et de nombreux mécanismes, et des modèles « vraisemblables », épurés, où l'accent est mis sur l'analyse de quelques mécanismes jugés fondamentaux dans l'étude du phénomène considéré. Dans la pratique, la distinction se fait par rapport aux objectifs, la première catégorie de modèles renvoyant à des fins opératoires, telle la prédiction, quitte à perdre en grande partie la compréhension du fonctionnement du phénomène, la seconde catégorie de modèles renvoyant plutôt à des objectifs de compréhension, d'explication, quitte à s'éloigner de la réalité observée du fait de la simplicité des informations intégrées. C'est dans cette seconde perspective qu'une première série de modèles a été réalisée afin d'explorer deux facteurs fondamentaux dans la propagation d'une épidémie : la mobilité et la « rugosité » de l'espace. En effet, quels que soient les types d'épidémies ces deux facteurs sont - à des degrés divers - des phénomènes explicatifs fondamentaux [Daudé, Éliot, 2005a]. Du point de vue de la mobilité, on considère que les individus ont une pratique de l'espace du quotidien relativement cohérente au cours du temps, que l'on peut décomposer en trois types (figure 8).

Figure 8 : Schéma de formalisation de la mobilité (d'après É. Daudé, E. Éliot, 2005a)



33 Dans ce contexte, la *mobilité circulaire sans arrêt* représente une forme classique de déplacement de type domicile-travail, la *mobilité avec arrêt* une forme plus composée de type déplacement à buts multiples et la *mobilité itinérante* peut être associée aux individus qui passent ponctuellement dans une ville ou un quartier sans que ce comportement spatial soit rémanent : activité touristique par exemple. Ces formes de mobilité s'expriment dans des contextes spatiaux qui vont influencer la dynamique de propagation.

34 L'introduction d'une topologie dans un espace de simulation est en effet relativement importante car de la nature des relations entre les différents objets qui composent cet espace peut découler une dynamique de diffusion contrastée. Plusieurs topologies ont été testées à partir d'une « ville artificielle » composée de vingt-cinq quartiers : deux d'entre elles ont été retenues, une cité très connectée, de type « Manhattan », et une cité faiblement connectée¹², de type « réseau en étoile » (figure 9). Dans ces deux cités, près de 3000 agents circulent et ont des activités quotidiennes (figure 10) : un cycle de simulation décrit ainsi une journée type durant laquelle l'ensemble des agents quittent leur foyer, circulent dans la ville, et regagnent leur foyer en fin de journée.

Figure 9 : Topologies d'une « ville artificielle » (d'après É. Daudé, E. Éliot, 2005b).

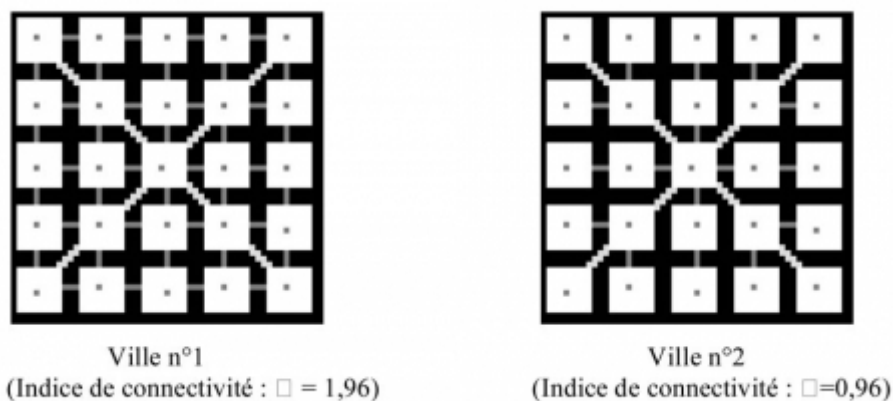
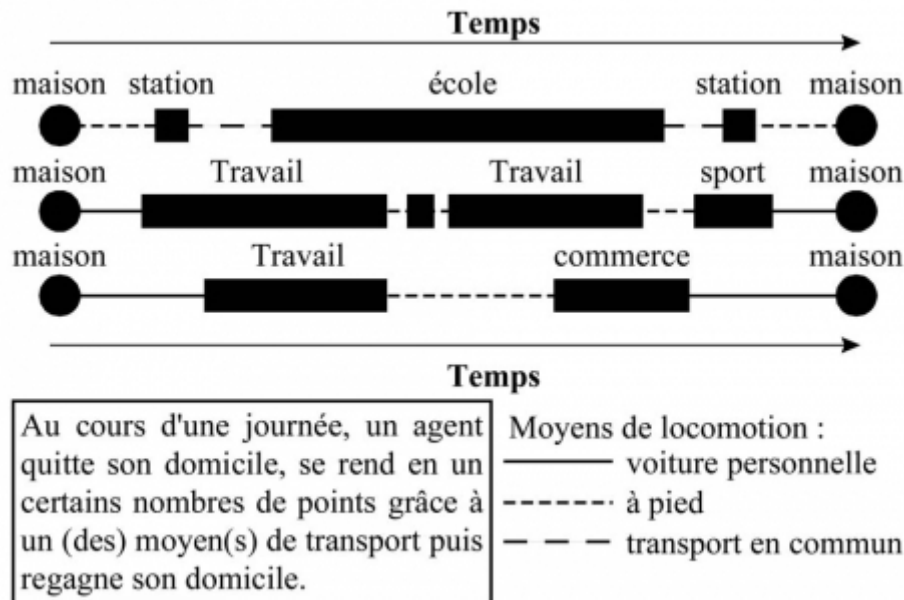


Figure 10 : Exemples d'activités virtuelles de quelques habitants de la ville



- 35 Enfin un modèle de contamination relativement simple a été choisi (figure 11) . Il détermine la probabilité P pour un individu de passer de l'état (s) sain (o) à l'état infecté (1) selon la proportion d'individus contaminés dans son voisinage (vt). Ce mécanisme favorise explicitement le contact interpersonnel, la probabilité dans la transmission du virus étant de plus soumise à un élément aléatoire r^{13} .

Figure 11 : Formalisation mathématique du modèle de contamination

$$P\left(s_i = 1 \middle/ s_i = 0\right) = r \cdot \langle v_i(t) \rangle$$

- 36 Au début des simulations, un agent sélectionné au hasard au centre de la ville est infecté par le virus. Le modèle est alors « plongé dans le temps », c'est la phase de simulation, les journées-types telles qu'on les a décrites s'enchaînent et le virus se répand.

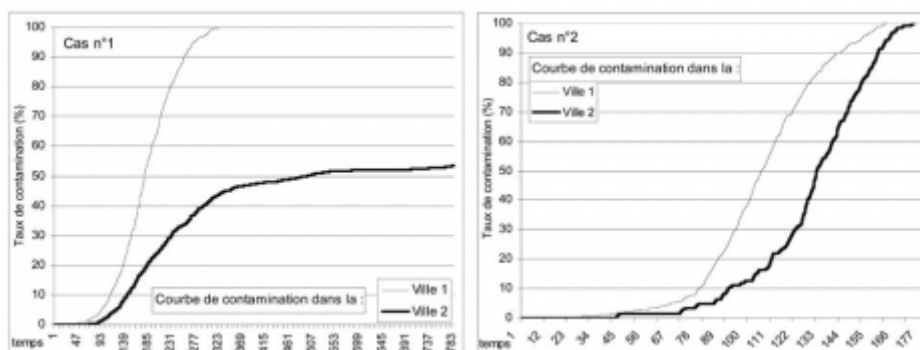
2.4. Principaux résultats des simulations

- 37 Avec une distribution homogène des agents dans les différents quartiers de la ville, les simulations montrent que la propagation de l'épidémie est beaucoup plus rapide dans la ville faiblement connectée. Ce résultat d'abord surprenant s'explique par le fait que globalement la probabilité pour un agent sain de rencontrer un agent infecté diminue avec l'augmentation du nombre de chemins possibles. L'autre résultat intéressant est dû à la possibilité qu'offre la simulation multi-agents de suivre individuellement ou par groupe les entités : la probabilité d'être contaminé est d'autant plus forte que l'agent est très mobile et qu'il vit dans un sous-espace, un quartier, très connecté. En d'autres termes, cela signifie que les agents ayant une capacité de déplacement élevée sont ceux qui contaminent le plus, et sont donc potentiellement ceux qui sont le plus contaminés [Daudé, Eliot, 2005b], ceci d'autant plus qu'ils circulent ou vivent dans des zones de transits importants. Ces résultats nous ont alors conduits à modifier l'équi-répartition initiale des agents dans les différents quartiers en étudiant deux cas. Le premier prend pour hypothèse que plus un quartier est connecté aux autres quartiers, plus il va accueillir des agents fortement mobiles. L'hypothèse première est donc que les agents se déplacent d'autant plus qu'ils vivent dans des

quartiers centraux (cas n° 1). Le second cas pose l'hypothèse inverse : Les quartiers périphériques, faiblement connectés, obligent les individus qui y habitent à une grande mobilité pour en sortir, ce sont donc ces zones qui accueillent une forte proportion d'agents mobiles (cas n° 2).

38 La figure 12 récapitule les résultats des simulations dans ces deux espaces aux topologies différenciées et selon les deux hypothèses précédentes. Le constat général que l'on peut tirer des simulations est que la diffusion est beaucoup plus lente dans le premier cadre d'analyse (plus de 300 itérations) que dans le second (180 itérations environ), et elle n'atteint pas l'ensemble de la population dans le cas où les individus les plus mobiles sont concentrés dans les quartiers centraux (seul 50 % de la population est infectée dans la ville 2). Ce dernier constat s'explique à la fois par la faible connectivité des quartiers périphériques, sous-espaces en partie isolés, et par la faible mobilité de leurs résidents, ceux-ci n'ayant alors pas ou peu de contacts avec des individus contaminés. On trouve ainsi une explication locale à ce faible taux de contamination globale. Cette faible connectivité des lieux est en revanche largement compensée par la mobilité des agents dans le second cadre d'analyse. Lorsque la proportion d'agents à mobilité étendue augmente avec la faible connectivité des quartiers, non seulement la contamination touche l'ensemble de la population de la ville, mais celle-ci se produit plus rapidement que dans le premier cas. Pour cette seconde hypothèse (cas n° 2), il existe un décalage temporel dans la propagation du virus entre la ville 1 et la ville 2. Plus précisément, si la phase de décollage est très rapide dans la ville 1, elle se réalise lentement dans la ville 2, et si la phase de saturation est progressive dans la ville 1, elle est rapidement atteinte dans la ville 2. Le réseau en étoile semble curieusement moins « efficace » pour la propagation du virus que le quadrillage de type « Manhattan », ceci lorsque les individus les plus mobiles se trouvent majoritairement concentrés dans les zones périphériques. L'explication de ce phénomène est finalement assez simple : lorsque le virus se propage dans une branche du réseau étoilé, le vecteur doit revenir au centre de la ville pour pouvoir atteindre d'autres zones, d'autres branches du réseau, ceci explique la lente phase de décollage par rapport à la propagation dans le cas du réseau de type « Manhattan ». En revanche, lorsque le virus se trouve dans une branche du réseau étoilé, l'existence de liens uniques entre une branche et un quartier favorise sa dissémination dans celui-ci, ce qui explique que globalement la phase de saturation se produit rapidement lorsque toutes les branches sont atteintes. Ainsi la structure spatiale de la ville a une forte incidence sur la dynamique de diffusion de l'épidémie, mais les comportements des individus, en termes de mobilité, peuvent modifier en profondeur notre appréciation du phénomène.

Figure 12 : Dynamique de diffusion dans deux configurations spatiales distinctes (d'après É. Daudé, E. Éliot, 2005b)



Conclusion

39 Dans l'étude de la diffusion des épidémies aux échelles urbaines, les théories de la complexité apportent une contribution importante d'une part, en reliant les phénomènes pour les comprendre dans leur ensemble et d'autre part, en les appréhendant de manière dynamique. La « complexité » permet ainsi de s'affranchir

des approches déterministes en interrogeant des trajectoires et des champs de possibles. Elle constitue ainsi un paradigme permettant de prendre en considération la cospatialité des sociétés, c'est-à-dire les actions spatiales structurant des agencements particuliers, ces derniers interagissant avec d'autres agencements spatiaux selon différentes combinaisons possibles. La « complexité » n'est donc pas simplement une théorie des systèmes revisitée bien qu'elle ne soit pas en rupture avec les approches précédentes : systémique, microsimulation [Orcutt, 1957] et Time Geography [Hägerstrand, 1975] notamment par le poids qu'elle concède aux acteurs, aux trajectoires individuelles et aux interactions dans la dynamique des systèmes.

Bibliographie

- BARABASI A-L. (2002), *Linked : The New Science of Networks*, Perseus Publishing, 256 p.
DOI : 10.1119/1.1538577
- BARRETT C. *et al.* (2000), *TRANSIMS : Transportation Analysis Simulation System*, Technical Report LA-UR-00-1725, Los Alamos Laboratory.
- BARRETT C., EUBANK S., SMITH J. (2005), Et si la variole frappait Paris, *Pour la science*, n° 330.
- BATTY M. (2003), "Agent-Based pedestrian modelling", in P. Longley, M. Batty, *Advanced Spatial Analysis, The CASA book of GIS*, Redlands, California, ESRI Press.
- BENENSON I., TORRENS P. (2004), *GeoSimulation : Automata-based modeling of urban phenomena*, John Wiley and Sons.
- BUCHANAN M. (2002), *Nexus : Small Worlds and the Groundbreaking Science of Networks*, Norton & Co., 256 p.
- BURA S., GUÉRIN-PACE F., MATHIAN H., PUMAIN D., SANDERS L. (1996), Multi-agents systems and the dynamics of a settlement system, *Geographical Analysis*, vol. 28, n° 2.
- DAUDÉ E. (2003), Apports de la simulation multi-agents à l'étude des processus de diffusion, *Cybergeog : Revue Européenne de Géographie*, n° 255, <http://193.55.107.45/eurogeo2.htm>.
DOI : 10.4000/cybergeog.3835
- DAUDÉ E. (2005), « Systèmes multi-agents pour la simulation en géographie : vers une Géographie Artificielle », in *Modélisation en géographie, Déterminisme et Complexité*, Paris, Hermès.
- DAUDÉ E., ÉLIOT E. (2005a), « Exploration de l'effet des types de mobilités sur la diffusion des épidémies », in *Actes du colloque ThéoQuant*, février 2005, Besançon, à paraître.
- DAUDÉ E., ÉLIOT E. (2005b), Integrating Mobility to Model the Spatial Diffusion of Epidemics : a Theoretical Approach, 11th International Medical Geography Symposium, 5-9 July, FortWorth, Texas, USA.
- DAUDÉ E., LANGLOIS P. (2006), « Les formes de la diffusion », in *Actes du Colloque GéoPoint'04*, Avignon.
- DAUDÉ E. (2006), « A Monte Carlo approach to diffusion : une étude « historique » revisitée par la modélisation multi-agents », in F. Amblard, D. Phan (dir.), *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société : une introduction*, Chap. 16, Paris, Hermès, pp. 353-377.
- DAUPHINÉ A. (2003), *Les théories de la complexité chez les géographes*, *Anthropos*, 248 p.
- DIBBLE C. (2004), The GeoGraph 3D Computational Laboratory : Network and Terrain Landscapes for RePast, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 7, n° 1. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/1/7.html>
- DURAND-DASTÈS F. (2003), Modèle des comptoirs : les comptoirs dans leur environnement, *Mappemonde*, n° 69, pp. 10-12.
- ÉLIOT E. (1998), « Changes in mortality in Mumbai (Bombay) », in P. Godwin (ed), *The looming epidemic : the impact of HIV / AIDS in India*, London, Hurst and Co. Publishers.
- ÉLIOT E. (1999), Les lieux du sida dans l'espace indien, Université de Rouen, Thèse nouveau régime, 475 p.
- ÉLIOT E. (2002), Éléments et propositions pour une géographie du VIH / Sida en Inde, *Espace Population et Sociétés*, numéro spécial « Maladies émergentes et re-emergentes » « Emerging and re-emerging diseases », A. Vaguet. (coord.), n° 2, pp. 179-194.
- EUBANK S., GUCLU H., ANIL KUMAR V., MARATHE M., SRINIVASAN A., TOROCZKAI Z., WANG N. (2004), Modelling disease outbreaks in realistic urban social networks, *Nature*, n° 429, pp. 180-184.
- FERBER J. (1995), *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*, InterEditions.

- GATRELL A. C. (2005), Complexity theory and geographies of health : a critical assessment, *Social Science & Medicine*, n° 60, pp. 2661-2671.
DOI : 10.1016/j.socscimed.2004.11.002
- GOULD P.R. (1993), *The Slow Plague : a geography of the AIDS pandemic*, Blackwell, 248 p.
- HÄGERSTRAND T. (1975), "Space, Time and Human Condition" in A. Karlqvist (ed.), *Dynamic Allocation of Urban Space*, Farnborough, Saxon House, pp. 2-12.
- HEUZÉ G. (2000), "Populism, Religion, and Nation in contemporary India : the evolution of the Shiv Sena in Maharashtra", in *Comparative Studies of South Asia, Africa and the Middle East*, vol. XX (1).
DOI : 10.1215/1089201X-20-1-2-1-a
- LÉVY J., LUSSAULT M. (eds) (2003), *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*, Belin, 1033 p.
- OMRAN A. R. (1971), The epidemiological transition : a theory of the epidemiology of population change, *Milbank Memorial Foundation Quarterly*, vol. 49, p. 509.
- ORCUTT G. (1957), A new type of socio-economic system, *Review of Economics and Statistics*, vol. 48, pp. 773-797.
DOI : 10.2307/1928528
- RAMASUBAN R., COOK N. (1996), "Spatial patterns of health and mortality" in S. Patel., A. Thorner (eds), *Bombay metaphor for modern India*, Oxford University Press, Oxford India Paperback, pp. 143-169.
- VANBERGUE D. (2000), « Modélisation de phénomènes urbains : Simulation des migrations intra-urbaines », in Sylvie Pesty, Claudette Sayettat-Fau (eds), *Systèmes multi-agents - Méthodologie, Technologie et Expériences*, Hermès.
- WALLACE R., WALLACE D., ULLMANN J.E., ANDREWS H. (1999), Deindustrialization, inner-city decay, and the hierarchical diffusion of AIDS in the USA : how neoliberal and cold war policies magnified the ecological niche for emerging infections and created a national security crisis, *Environment and Planning A*, vol. 31, pp. 113-139.
DOI : 10.1068/a310113
- WATTS D.J. (2004), *Small worlds : the dynamics of networks between order and randomness*, Princeton Paperbacks, 264 p.
DOI : 10.1063/1.1333299
- WENIGER B. G., TABEKE Y., OU C. Y., YAMAKAZI S. (2001), The molecular epidemiology of HIV in Asia, *AIDS*, Mar 9 ; vol. 15, n° 4, p. 545.

Notes

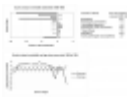




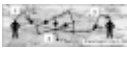




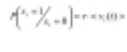

- 1 D. Pumain, « Système », *Hypergéométrie*, http://hypergeo.free.fr/article.php?id_article=5
- 2 « La coprésence se caractérise par le rassemblement et l'agrégation en un même lieu de réalités sociales distinctes ». « Coprésence » in J. Lévy, M. Lussault (2004), *Dictionnaire de géographie et de l'espace des sociétés*, Belin, pp. 211-213.
- 3 « Dans un système dynamique, changement qualitatif de la structure qui peut être produit par l'amplification d'une petite fluctuation interne ou par une perturbation externe, lorsque le système est en situation instable », D. Pumain, « Bifurcation », *Hypergéométrie*, <http://hypergeo.free.fr/>
- 4 Pour une analyse critique de ces données voir : E. Éliot (1999), *Les lieux du sida dans l'espace indien*, Thèse nouveau régime, Université de Rouen, 475 p.
- 5 Le calcul présenté mesure les différences des taux standardisés de mortalité entre 1986 et 1994.
- 6 Ce modèle désigne le changement de la nature des maladies par le passage progressif des maladies infectieuses, parasitaires et de carence à des maladies chroniques et dégénératives. Le moteur de cette modification des causes de décès est le développement socio-économique. Le passage d'une étape à l'autre s'effectue toutefois à des rythmes différents selon les régions et les sociétés.
- 7 À Mumbai, le découpage administratif est le suivant : wards (arrondissements), sections, blocks (îlots).
- 8 Parti extrémiste hindou au pouvoir à Mumbai et au Maharashtra au cours des années 1990.
- 9 Gilada I. S., 1994, « The IHO relief story » in *AIDS Asia*, 2, February, pp. 6-8.
- 10 Antimonde : terme proposé par R. Brunet pour définir les espaces du secret, les « mondes parallèles », qui sont produits par le Système-Monde. C'est « la partie du monde mal connue et qui tient à le rester, qui se présente à la fois comme le négatif du monde et comme son double indispensable ». (R. Brunet, R. Ferras H. Théry (1993), *Les mots de la géographie : un dictionnaire critique*, Belin-Reclus).

11 Selon D. J. Watts, deux propriétés caractérisent les réseaux « petits mondes » : une longueur moyenne faible des chemins dans un graphe et un indice de clustering élevé [Watts, 2004]. En d'autres termes, tout individu dans le monde peut en théorie être en relation avec un autre à travers une courte chaîne de relations sociales.

12 L'indice de connectivité b (Nombre d'arcs / Nombre de nœuds) est égal à 1,96 pour la première et à 0,96 pour la seconde : forte contre faible connectivité.

13 Ce taux est ici égal à 10% ($r = 0.1$), la probabilité augmente donc avec le nombre de voisins infectés.

Table des illustrations

	Titre	Figure 1 : Variation de la mortalité à Mumbai (1986-1994) et des causes de décès
	Crédits	Eliot E., 1999
	URL	http://journals.openedition.org/eps/docannexe/image/1867/img-1.jpg
	Fichier	image/jpeg, 60k
	Titre	Figure 2 : Évolution de la mortalité par sexe et par ward à Mumbai (1986-1994)
	URL	http://journals.openedition.org/eps/docannexe/image/1867/img-2.jpg
	Fichier	image/jpeg, 80k
	Titre	Figure 3 : Changement de la part des maladies en synergie avec le sida
	URL	http://journals.openedition.org/eps/docannexe/image/1867/img-3.jpg
	Fichier	image/jpeg, 32k
	Titre	Figure 4 : Émergence et diffusion de l'épidémie : une synergie d'acteurs
	Crédits	E. Eliot, Université du Havre, 2005
	URL	http://journals.openedition.org/eps/docannexe/image/1867/img-4.jpg
	Fichier	image/jpeg, 52k
	Titre	Figure 5 : Schéma général d'un système complexe
	URL	http://journals.openedition.org/eps/docannexe/image/1867/img-5.jpg
	Fichier	image/jpeg, 40k
	Titre	Figure 6 : Schéma d'un modèle formel de diffusion
	URL	http://journals.openedition.org/eps/docannexe/image/1867/img-6.jpg
	Fichier	image/jpeg, 64k
	Titre	Figure 7 : Topologie de réseau social de type « Petit Monde » (d'après S. Eubank, 2004)
	URL	http://journals.openedition.org/eps/docannexe/image/1867/img-7.jpg
	Fichier	image/jpeg, 60k
	Titre	Figure 8 : Schéma de formalisation de la mobilité (d'après É. Daudé, E. Eliot, 2005a)
	URL	http://journals.openedition.org/eps/docannexe/image/1867/img-8.jpg
	Fichier	image/jpeg, 36k
	Titre	Figure 9 : Topologies d'une « ville artificielle » (d'après É. Daudé, E. Eliot, 2005b).
	URL	http://journals.openedition.org/eps/docannexe/image/1867/img-9.jpg
	Fichier	image/jpeg, 40k
	Titre	Figure 10 : Exemples d'activités virtuelles de quelques habitants de la ville
	URL	http://journals.openedition.org/eps/docannexe/image/1867/img-10.jpg
	Fichier	image/jpeg, 72k
	Titre	Figure 11 : Formalisation mathématique du modèle de contamination
	URL	http://journals.openedition.org/eps/docannexe/image/1867/img-11.jpg
	Fichier	image/jpeg, 8,0k
	Titre	Figure 12 : Dynamique de diffusion dans deux configurations spatiales distinctes (d'après É. Daudé, E. Eliot, 2005b)
	URL	http://journals.openedition.org/eps/docannexe/image/1867/img-12.jpg

Pour citer cet article

Référence papier

Emmanuel Eliot et Éric Daudé, « Diffusion des épidémies et complexités géographiques », *Espace populations sociétés*, 2006/2-3 | 2006, 403-416.

Référence électronique

Emmanuel Eliot et Éric Daudé, « Diffusion des épidémies et complexités géographiques », *Espace populations sociétés* [En ligne], 2006/2-3 | 2006, mis en ligne le 17 novembre 2016, consulté le 15 mars 2020. URL : <http://journals.openedition.org/eps/1867> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/eps.1867>

Cet article est cité par

- Social network analysis in epidemiology: Current trends and perspectives(2011) . DOI: 10.1109/RCIS.2011.6006866
-

Auteurs

Emmanuel Eliot

Université du Havre
UFR Lettres et Sciences Humaines
25, rue P. Lebon
76086 Le Havre Cedex
emmanuel.eliot@univ-lehavre.fr

Éric Daudé

Université de Rouen
UFR de Lettres
Département de Géographie
1, rue T. Beckett
76821 Mont-Saint-Aignan Cedex
eric.daude@univ-rouen.fr

Droits d'auteur



Espace Populations Sociétés est mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant.

Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre politique de confidentialité (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies.Fermer