



HAL
open science

Vers une approche individu-centrée pour modéliser et simuler l'expression spatiale d'une maladie transmissible : la peste à Madagascar

Dominique Badariotti, Arnaud Banos, Vincent Laperrière

► To cite this version:

Dominique Badariotti, Arnaud Banos, Vincent Laperrière. Vers une approche individu-centrée pour modéliser et simuler l'expression spatiale d'une maladie transmissible : la peste à Madagascar. *Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2007, pp.393. 10.4000/cybergeo.9052 . hal-01119127

HAL Id: hal-01119127

<https://hal.science/hal-01119127v1>

Submitted on 20 Feb 2015

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.



Cybergegeo : European Journal of Geography

Dossiers, Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2005

Dominique Badariotti, Arnaud Banos et Vincent Laperrière

Vers une approche individu-centrée pour modéliser et simuler l'expression spatiale d'une maladie transmissible : la peste à Madagascar

Avertissement

Le contenu de ce site relève de la législation française sur la propriété intellectuelle et est la propriété exclusive de l'éditeur.

Les œuvres figurant sur ce site peuvent être consultées et reproduites sur un support papier ou numérique sous réserve qu'elles soient strictement réservées à un usage soit personnel, soit scientifique ou pédagogique excluant toute exploitation commerciale. La reproduction devra obligatoirement mentionner l'éditeur, le nom de la revue, l'auteur et la référence du document.

Toute autre reproduction est interdite sauf accord préalable de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France.

revues.org

Revues.org est un portail de revues en sciences humaines et sociales développé par le Cléo, Centre pour l'édition électronique ouverte (CNRS, EHESS, UP, UAPV).

Référence électronique

Dominique Badariotti, Arnaud Banos et Vincent Laperrière, « Vers une approche individu-centrée pour modéliser et simuler l'expression spatiale d'une maladie transmissible : la peste à Madagascar », *Cybergegeo : European Journal of Geography* [En ligne], Dossiers, Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2005, document 393, mis en ligne le 16 juillet 2007, consulté le 29 mai 2013. URL : <http://cybergegeo.revues.org/9052> ; DOI : 10.4000/cybergegeo.9052

Éditeur : CNRS-UMR Géographie-cités 8504

<http://cybergegeo.revues.org>

<http://www.revues.org>

Document accessible en ligne sur :

<http://cybergegeo.revues.org/9052>

Document généré automatiquement le 29 mai 2013.

© CNRS-UMR Géographie-cités 8504

Dominique Badaritti, Arnaud Banos et Vincent Laperrière

Vers une approche individu-centrée pour modéliser et simuler l'expression spatiale d'une maladie transmissible : la peste à Madagascar

Introduction

- 1 Le monde est actuellement soumis à la réémergence de maladies qui semblaient contrôlées ou en voie de l'être. Des maladies transmissibles déjà connues comme la trypanosomiase humaine (maladie du sommeil), la fièvre jaune, la tuberculose, le choléra ou la peste réapparaissent dans des espaces qu'elles avaient laissés pour compte depuis longtemps, parfois même sous des aspects nouveaux, comme la dengue. On parle également de maladies réémergentes pour désigner celles qui réapparaissent dans des espaces différents mais sous des aspects nouveaux, comme la dengue (Fassi Fehri, 2001).
- 2 Bien que les modes de transmission de ces maladies entre individus soient bien connus des épidémiologistes, leur contrôle et leur résorption posent de nombreux problèmes du fait de la complexité de leur expression dans l'espace et dans le temps, au niveau des populations. En effet, un aspect propre aux maladies transmissibles est qu'elles constituent des complexes pathogènes (Sorre, 1933) dont l'expression est conditionnée par la variabilité des interrelations entre les différents agents, hôtes ou vecteurs, et leur milieu. Les pratiques socio-spatiales des groupes humains, les caractéristiques du milieu géographique, les comportements éthologiques des principaux vecteurs et hôtes intermédiaires ainsi que les caractéristiques des agents pathogènes concernés se combinent, dessinent des zones à risque au sein desquelles peuvent émerger ou réémerger ces maladies.
- 3 Le contrôle de ces maladies est en outre tributaire de facteurs globaux, politiques et socio-économiques, qui déterminent le système de soins couvrant les foyers épidémiologiques. Or, en dépit des progrès réalisés dans les domaines biologique et médical, le contexte sanitaire reste plus que jamais précaire dans les pays en voie de développement. De nombreuses maladies pour lesquelles il existe pourtant des médicaments ou des vaccins très efficaces, se développent à nouveau ; c'est le cas de la peste à Madagascar.
- 4 L'objectif de cet article est double : il s'agit dans un premier temps de résumer l'évolution historique des recherches menées sur la peste à Madagascar, dans le cadre général de l'évolution des connaissances en épidémiologie, afin de présenter dans un deuxième temps, dans la lignée de ces travaux, les fondements théoriques et méthodologiques de notre projet, qui prône un nécessaire rapprochement entre géographie et épidémiologie, via un outil informatique de modélisation individu-centré.

Un vieux sujet : la peste à Madagascar

Description historique et géographique

- 5 La peste, maladie vieille de plus de quatorze siècles, n'est pas une maladie révolue. Des foyers épidémiologiques subsistent, apparaissent ou réapparaissent dans la zone tropicale ou subtropicale, où la maladie fait toujours des victimes, même si le nombre de cas a fortement décliné dans le monde après les dernières atteintes de la troisième pandémie des XIX^e-XX^e siècles (Audouin-Rouzeau, 2003). Entre 1987 et 2001, le nombre de cas de peste humaine déclarés à l'OMS n'a cessé d'augmenter, ce qui porte la maladie au rang des maladies réémergentes (OMS, 1996, Chanteau, 2004).

Les cas notifiés à l'OMS sont selon les pays, soit des cas confirmés, soit des cas suspects

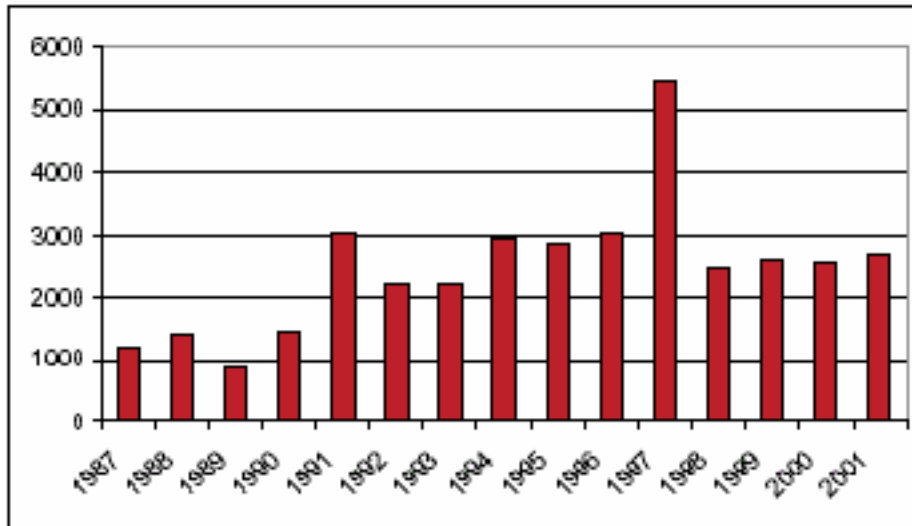


Figure 1 : Evolution du nombre de cas de peste dans le monde de 1987 à 2001 (source : Chanteau, 2004 d'après OMS, 2003)

- 6 Historiquement, la peste n'est pas une maladie endémique à Madagascar. Bien au contraire, cette maladie a été introduite sur l'île assez récemment, à la faveur des échanges commerciaux qui se sont développés avec la colonisation. Elle est apparue à Madagascar en 1898, dans le port de Tamatave, et s'est progressivement étendue à l'ensemble de l'île (Brygoo, 1966). Son hôte, un rat non indigène passager clandestin d'un des navires fréquentant ce port, a progressivement colonisé l'île en éliminant les variétés de rongeurs originelles (Goodman, 1995). A partir des années 1920, ce rat – habitué à des biotopes d'altitude – s'est répandu dans les hautes terres, y disséminant l'endémie, et a ainsi progressivement quitté les zones côtières moins favorables à sa reproduction.
- 7 Actuellement, la peste est en recrudescence dans les milieux ruraux mais également dans deux centres urbains principaux. L'espace endémique est constitué de deux très vastes foyers, au centre et au nord de l'île, situés sur les hautes terres à plus de 800 mètres d'altitude. Au sein de cette zone traditionnelle d'endémicité se trouve la première ville touchée, la capitale Tananarive. Mais à Majunga, au Nord-ouest de l'île – c'est-à-dire hors de la zone endémique - la peste a pourtant fait réapparition en 1991 après 63 ans d'absence. L'extension de l'espace endémique, notamment vers le sud des hauts plateaux, (Coulanges, 1978) s'accompagne d'une croissance importante du nombre de cas signalés depuis une dizaine d'années : ainsi, de 1988 à 1997, on passe de 93 cas suspects à plus de 1800 (Handschemacher et al., 2000) ! Même si une grande part de cette augmentation de cas suspects est à imputer à une amélioration du système de surveillance épidémiologique, à travers notamment une plus grande sensibilisation du personnel soignant à la maladie, et n'est pas confirmée bactériologiquement, il existe cependant une augmentation réelle des cas confirmés. Ainsi, les cas probables ou confirmés par le Laboratoire Central de la Peste sont passés d'une cinquantaine de cas en 1988 à plus de 250 en 1995 (Ratsifasoamanana et al., 1998).

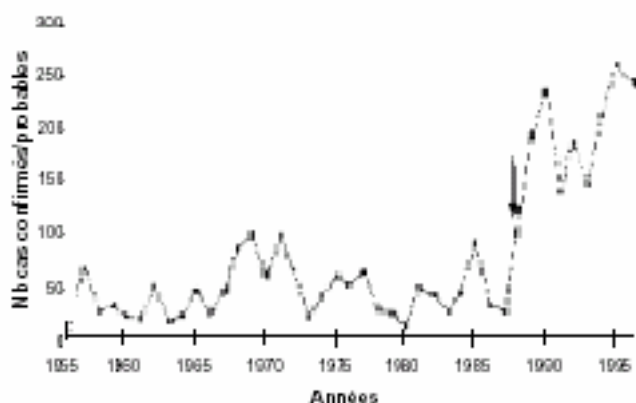


Figure 2 : Evolution de l'endémie pesteuse à Madagascar

(source : Ratsifasoamanana et al., 1998)

Connaissances scientifiques : approches anciennes et récentes

Analyse des processus de transmission : le cycle épidémiologique

- 8 Le processus de transmission de la peste est connu depuis les travaux d'Alexandre Yersin et Paul-Louis Simond à la Commission des Indes entre 1894 et 1898. Le premier isole le bacille *Yersinia pestis* dans l'organisme des rats morts de peste, identifiant par là même le rongeur comme l'hôte principal du bacille, tandis que le second identifie peu après la puce comme l'insecte vecteur de la maladie, responsable de la transmission du bacille à son hôte par simple piqûre (Audouin-Rouzeau, 2003). Cette puce peut facilement – à condition de fréquenter les mêmes zones - passer du rat au rat, puis du rat à l'homme. Une fois transmise, la maladie prend chez l'homme la forme d'une peste bubonique qui cause le décès par septicémie. D'une manière générale, la transmission de proche en proche ne se fait pas par contagion interhumaine mais par piqûre des différentes personnes d'une communauté par les puces infectées à partir des rats pesteux morts sur les mêmes lieux. Cependant une pneumonie pesteuse secondaire peut résulter de la phase septicémique et dans ce cas le bacille sera beaucoup plus facilement transmis de personne à personne par les voies aériennes et les expectorations, transmission directe plus connue sous le nom de peste pulmonaire. Cette forme au pouvoir contagieux décuplé ne représente toutefois que très peu de cas.
- 9 Cependant, bien que le cycle épidémiologique de la peste soit désormais connu, les agents du complexe pathogène varient d'un foyer à l'autre et ne sont pas toujours clairement identifiés. En outre, plusieurs espèces de rat ou de puces peuvent se côtoyer au sein d'un même foyer épidémiologique et être impliquées différemment dans le cycle, à l'origine de plusieurs modes d'épidémisation, certains modes se révélant habituels et d'autres contingents (Baltazard, 1963).
- 10 Par la suite, aux interrogations concernant le mode de transmission de la peste ont succédé d'autres interrogations à propos de la conservation du bacille en période inter-épizootique. Là encore, les modes habituels de conservation varient d'un foyer à l'autre.
- 11 Les recherches épidémiologiques sur la peste du foyer malgache sont menées à l'Institut Pasteur de Madagascar, créé quelques mois avant l'arrivée de la pandémie à Tamatave. Les spécificités du cycle épidémiologique ont été mises en évidence au cours de la période 1920-1960, depuis la direction de l'IPM par G. Girard jusqu'à celle d'E.R. Brygoo. Ainsi la spécificité de la peste malgache repose sur le fait qu'une seule espèce de rongeur, le rat noir *Rattus rattus*, présent sur l'ensemble de l'île, est en même temps le réservoir et la principale victime de la peste (Brygoo, 1966, Duplantier, 1997). Deux espèces de puces présentes à Madagascar ont été reconnues vectrices du bacille, étant à la fois pestifères - capables de s'infecter sur le rat - et pestigènes - capables de transmettre le bacille à l'homme aussi bien qu'au rat. Elles semblent cependant ne pas jouer le même rôle : *Synopsyllus fonquernii* jouerait un rôle réduit par rapport à *Xenopsyllus cheopis* dans le processus d'épidémisation, cette dernière étant prédominante et exclusive par rapport à la première dans les habitations (Girard, 1942). En revanche, *Synopsyllus fonquernii*, mauvais vecteur de la peste en conditions de

laboratoire, qu'on ne trouve que dans les champs, favorise le développement de formes non mortelles de la maladie chez *Rattus rattus*. Sa participation au cycle épidémiologique réside donc plutôt dans la maintien de l'enzootie et la détermination des épizooties murines (Girard, 1942, Brygoo, 1966, 1968).

Analyse de l'expression spatiale de la maladie

- 12 Les travaux des épidémiologistes qui se sont succédés à l'Institut Pasteur de Madagascar ont donc, jusqu'aux années 1990, essentiellement été consacrés à l'élucidation des spécificités du processus de transmission, dans l'objectif de développer des moyens de lutte contre la peste : par une démarche expérimentale de laboratoire, ils ont mis en évidence les interactions, au sens des modalités de leurs associations, entre les différents agents du complexe pathogène. Des facteurs du milieu, d'ordre écologique, étaient testés afin de préciser les conditions de vie des agents. Ainsi la température et l'humidité jouent-elles un rôle sur l'activité des puces, tandis que le climat joue également un rôle sur la survie du bacille à l'air libre ou dans la puce (Audouin-Rouzeau, 2003).
- 13 Mais, dès lors qu'on pense l'évolution de la peste dans la durée, par un questionnement sur la conservation du bacille, ou sur les conditions d'apparition d'une épidémie toujours précédée d'une épizootie, on considère nécessairement des interactions spatialisées entre les agents d'une part, entre les agents et le milieu géographique d'autre part. Ainsi, les épidémiologistes ont développé des modèles mathématiques compartimentaux qui représentent la dynamique d'une maladie transmissible (Cliff, Haggett, Ord, 1986, Longini et al., 1989, Mollison, 1995). Or, ces modèles globalisent les interactions spatialisées entre individus dans leurs équations différentielles. Celles-ci décrivent en effet des flux d'individus d'une classe de population à l'autre, notamment des populations saines aux populations infectées. Ces flux sont contrôlés par un taux d'infection, qui peut être déterminé selon une probabilité de contact globalisant ainsi les interactions inter-individuelles.
- 14 Depuis les années 1990, les recherches se tournent vers l'analyse des processus d'expression spatiale de la peste : émergence, réémergence, diffusion et conservation et de la maladie. Les travaux du programme RAMSE (Recherche Appliquée à Madagascar sur la Santé et l'Environnement menés de 1996 à 2000) traduisent cette évolution vers des recherches situées dans le temps et dans l'espace, qui visent à intégrer les facteurs du milieu au sein duquel évolue la maladie. Besoin était, et demeure, de localiser exactement les problèmes et les besoins de santé et d'expliquer ces localisations. Cette évolution majeure qui consiste à situer la maladie dans son contexte général implique un glissement du concept de complexe pathogène, défini par le géographe Max Sorre en 1933 et très vite adopté par les épidémiologistes, à celui de système pathogène (Picheral, 1982). La notion de système vise en effet à rendre compte de l'agencement de l'ensemble des facteurs de risque épidémiologique, tant physiques qu'humains, alors que celle de complexe est entendue dans un sens restreint d'associations de parasitisme entre les agents hôtes et vecteurs de la maladie, en relation avec le milieu naturel et biologique (Sorre, 1933).
- 15 Dès lors, ce nouveau questionnement pousse à l'interdisciplinarité : dans le cadre du programme RAMSE, visant à mettre en évidence les indicateurs médicaux et non médicaux révélateurs des risques et déséquilibres sanitaires, un groupe de réflexion sur la peste s'est ainsi constitué, associant épidémiologistes, biologistes, rodontologues et géographes. Retraçons quelques résultats du programme, qui précisent les facteurs de risque épidémiologique, à différentes échelles de considération du système pathogène.
- 16 A l'échelle nationale interviennent des facteurs humains permettant d'expliquer la réémergence de la peste à Madagascar. Ces facteurs sont d'ordre
- politico-économique, liés à une offre de soins très inégale, dépendante des décisions politiques, qui expose différemment les populations au risque épidémiologique.
 - socio-culturel, notamment le faible recours aux structures de soins et la prégnance de la médecine traditionnelle.
 - spatial, en lien avec les facteurs précédents, relatif à l'isolement des populations rurales et à leur difficulté d'accès aux structures de soin (Handschumacher & al., 1997).

- 17 A une échelle intermédiaire, il est avant tout nécessaire de distinguer la peste rurale de la peste urbaine. L'expression spatiale de la peste rurale a été étudiée comparativement dans le Moyen-Ouest malgache et la zone centrale des Hauts Plateaux (Handschumacher & al., 2000). Des travaux de terrain, visant à spatialiser le risque épidémiologique, ont précisé les principaux facteurs géographiques favorisant la recrudescence de la maladie, aux échelles régionales et locales :
- 18 A l'échelle régionale, la configuration spatiale du système de peuplement associé aux voies de communication, deux éléments en lien avec le relief et repérables par télédétection, donne des indications sur l'organisation socio-spatiale des populations rurales et leur mobilité, facteur de risque essentiel à considérer. A ce titre, J. P. Raison oppose les sociétés des Hautes Terres centrales, « à fort ancrage territorial, où l'attachement aux lieux (plus ou moins combiné à la parenté) fonde l'identité sociale et conduit à dessiner de véritables "pavages territoriaux" » à celles du Moyen-Ouest « qui, plus fluides, organisent l'espace en réseaux, sur la base de la parenté et de l'alliance matrimoniale ou politique » (Raison, 2000). Or, des enquêtes sérologiques dans ces deux régions ont permis de révéler deux schémas épidémiologiques spécifiques : les séroprévalences sont ainsi peu contrastées en Moyen-Ouest, modelé en vastes pénéplaines, alors qu'elles sont très contrastées d'un village à l'autre dans les Hautes Terres centrales du Vakinankaratra où le relief est très vallonné et les populations rurales sont très cloisonnées (Handschumacher et al., 2000).
- 19 A l'échelle locale, l'analyse détaillée des paysages épidémiologiques est réalisée à partir d'indicateurs de risque (Handschumacher et al., 2003) : type d'habitat (précaire sans étage *vs* en dur à étage), disposition du village, structuration et modes d'occupation du sol du système agraire (notamment proximité des haies de sisal par rapport à l'habitat humain), en lien avec la topographie. La combinaison de ces indicateurs définit des configurations spatiales qui permettent de repérer les zones potentiellement épidémiogènes. Cependant, au niveau local, les études manquent pour préciser la connaissance de ces configurations. Il est nécessaire d'affiner les analyses paysagères déjà réalisées afin de préciser davantage les modalités spatiales de la maladie au sein des ensembles à risque pesteux identifiés (Handschumacher et al., 2003, Hervouët et al., 2003, Laffly et al., 2002). Surtout, ces études doivent confronter les observations spatiales aux pratiques locales de mobilité des populations ainsi qu'aux comportements éthologiques du rat et de la puce. Pour analyser les processus d'expression spatiale de la maladie, une importance simultanée doit être accordée à l'étude des comportements spatiaux des agents du système pathogène. Le géographe doit ainsi dialoguer avec le rodontologue, l'entomologiste et l'épidémiologiste, pour mieux définir les espaces partagés entre le rat, la puce et l'homme.

L'expression spatiale de la peste à Madagascar : produit des interactions entre agents du système pathogène

- 20 Les travaux du programme RAMSE ont analysé les facteurs de risque épidémiologique conditionnant l'expression spatiale de la peste, en soulignant la nécessaire contextualisation de la maladie, mais n'ont pas traité la dynamique du système pathogène : ils ont étudié les facteurs qui conditionnent les processus, mais non le déploiement des processus eux-mêmes. Afin de les modéliser, nous proposons une approche individu-centrée tenant compte des interactions spatialisées entre agents du système pathogène.

Une approche de modélisation systémique

- 21 En combinant les dimensions spatiale et temporelle au sein de modèles appropriés, on devrait être à même de cerner non plus seulement les espaces à risque épidémiologique, où la maladie peut potentiellement se développer, mais également les aires d'expression effectives de la maladie. En effet, ainsi que remarquait déjà Max Sorre, « l'action du milieu ne crée point l'association pathogène. Une part d'accident difficile à évaluer intervient dans sa formation et dans son maintien » (Sorre, 1933). Cette part d'aléa réside dans les interactions entre hôtes et vecteurs de la maladie (deux individus doivent se trouver au même endroit au même moment) et le caractère non strictement systématique de la transmission.

22 Notre projet est alors de concevoir un système pathogène "peste" à la convergence de trois systèmes dynamiques : le système du couple hôte principal (rat) / vecteur (puce), le système des pratiques sociales, collectives et individuelles de l'hôte secondaire (l'homme) et le système espace géographique, support et aire de contact des deux précédents. Une méthode de modélisation systémique à partir des concepts, méthodes et outils des systèmes complexes nous semble à même de faire avancer la compréhension des processus d'expression de la peste et de proposer des actions de prévention susceptibles de conduire à leur maîtrise. En effet, en opposition avec la modélisation analytique qui étudie les éléments d'un objet d'étude sans se soucier de leurs interrelations, la modélisation systémique étudie un processus, qui peut être enchevêtrement de processus. Elle se fonde sur une logique conjonctive, « *qui propose de tenir pour inséparable le fonctionnement et la transformation d'un phénomène, des environnements actifs dans lesquels il s'exerce et des projets par rapport auxquels il est identifiable* » (Le Moigne, 1999).

La peste : un système pathogène complexe

23 Notre projet consiste donc à analyser à une échelle fine la configuration spatiale du système pathogène et sa dynamique à travers les processus d'émergence, de réémergence, de conservation endémique et de diffusion épidémique. Comme pour toutes les maladies transmissibles, les agents du système pathogène à considérer sont nombreux, hétérogènes, mobiles et interagissent localement. Dans un contexte général d'absence de maîtrise sanitaire de l'environnement malgache depuis la fin des années 1970, les dynamiques comportementales des rats et des puces, les dynamiques socio-spatiales humaines (type d'habitat, activités, formes de mobilités quotidiennes, pratiques gestionnaires), ainsi que les caractéristiques du milieu écologique expliquent conjointement la multiplication des cas dans les milieux ruraux et dans la capitale malgache, ainsi que leur réapparition dans une ville côtière, Majunga. Le comportement complexe du système, qui résulte de la conjonction des différents aspects concourants à la maladie, est l'objet de notre analyse. Nous présumons en effet que les ingrédients de la complexité sont réunis au niveau des interactions locales entre les agents du système pour observer une dynamique globale de la maladie imprédictible, nous réservant des surprises, telles l'apparition de régularités, ou au contraire nous paraissant totalement chaotique (Batty, Torrens, 2001). La complexité repose sur deux notions principales : la non-réductibilité et la récursivité.

La notion de non réductibilité

24 Une bonne connaissance des éléments des trois systèmes considérés (le système « espace géographique », le système des pratiques sociales humaines et le système hôte/vecteur) n'est pas suffisante pour penser la globalité de la circulation de l'endémie. En effet, la réémergence d'une maladie est rarement imputable à un fait isolé. Elle est davantage liée aux interactions à l'intérieur et entre ces trois systèmes qu'à l'action précise et isolée d'un seul. De même, toute tentative de lutte contre la peste par une action sur les conditions locales d'apparition - par exemple en cherchant à supprimer les biotopes du rat ou en incitant les habitants à développer d'autres modes de vie moins contaminants - n'est absolument pas assurée du succès en raison de l'adaptabilité du couple hôte-vecteur.

La notion de récursivité

25 La configuration spatiale (forme) prise par le système pathogène est à la fois facteur et produit des processus d'expression (fonctionnement) de la maladie. A chaque instant, la distribution spatiale du bacille, à travers les positions relatives des hôtes / vecteurs de la maladie, réoriente les processus d'expression, qui, ce faisant, transforment le système étudié. Il faut donc considérer conjointement forme et fonctionnement, l'opération et son produit, le produit étant producteur de lui-même (Morin, 1990, Le Moigne, 1999).

Une démarche expérimentale par la modélisation Multi-Agents

26 Il serait difficile, voire impossible, d'accumuler et de mettre en relation suffisamment d'observations sur la dynamique des trois systèmes convergents pour comprendre la dynamique globale du système pathogène. Aussi, la modélisation informatique présente-t-

elle un intérêt heuristique fort : une architecture de type multi-agents nous offre la possibilité d'observer à un niveau global les effets des interactions simulées entre les éléments des trois systèmes, et à en dégager une meilleure intelligence de la complexité du système pathogène. Ainsi, par la modélisation multi-agents, nous entreprenons une démarche d'expérimentation *in silico* (Lerbet-Sereni (dir.), 2004).

27 L'hypothèse générale que nous formulons est qu'en dépit de la complexité avérée des mécanismes de transmission en jeu, l'expression globale du système doit pouvoir être approchée à partir de règles individuelles relativement simples, mais intégrées dans un réseau d'interactions en évolution permanente. L'objectif est clairement de créer un environnement virtuel par une sélection des objets géographiques jugés significatifs et un travail sur leur agencement, grâce aux fonctionnalités des systèmes d'information géographique, et de le peupler d'agents autonomes (puces, rats et humains), animés par des motifs propres et réagissant aux modifications de leur environnement.

28 Cette approche distribuée, constructiviste et susceptible de favoriser l'observation de propriétés globales émergentes à partir d'interactions locales simples mais nombreuses, permet d'intégrer la spatialité et la mobilité des agents, afin d'évaluer cette « part d'accident » qu'évoquait Max Sorre. La transmission du bacille pesteux entre deux individus est un phénomène localisé. Pour comprendre, par la modélisation, les processus d'expression spatiale de la maladie, on se doit de prendre en compte cette localisation, tandis que les mécanismes de transmission sont désormais bien connus par les épidémiologistes et formalisables en règles simples.

29 La figure 3 présente les entités de base du modèle SIMPEST que nous développons actuellement sur la plate-forme multi-agents Netlogo. Des agents rats, puces et humains artificiels évoluent dans un environnement spatial, constituant ainsi un monde artificiel simplifié, bien qu'observable au même titre que le monde réel. Ainsi, nous ne focalisons pas nos observations uniquement sur les résultats de la simulation, mais également sur les processus par lesquels ces résultats ont été obtenus, ce qui est une composante expérimentale novatrice dans l'étude des phénomènes socio-spatiaux (Gilbert, 1995, Epstein, 1999). Ainsi que l'a montré A. Drogoul (2000), « *observer un monde artificiel offre de grands avantages du point de vue de la simulation : tous les paramètres, depuis les lois physiques de l'environnement jusqu'à la définition des acteurs qui le peuplent, peuvent en effet être modifiés, simplifiés ou compliqués¹. Tout en lui permettant de conserver sa méthode de travail, l'environnement expérimental va donc permettre au chercheur d'adopter une démarche spéculative, fondée sur la constitution d'hypothèses difficilement vérifiables en nature, cette possibilité jouant un rôle heuristique considérable dans la sélection des expérimentations à réaliser* ».

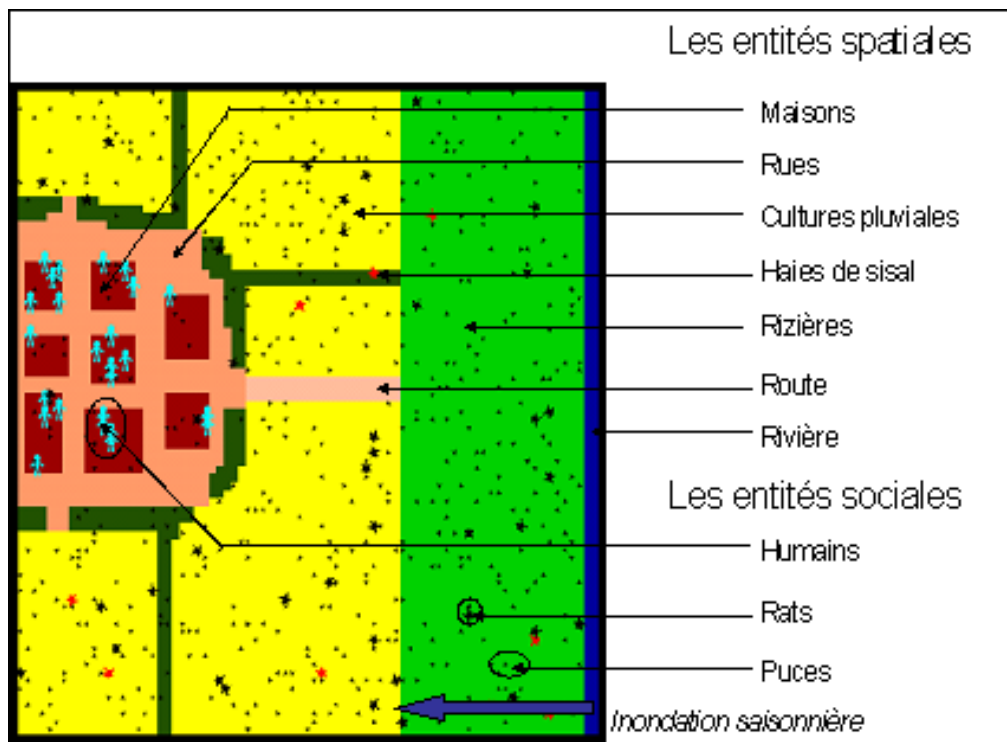


Figure 3 : Entités de base du modèle SIMPEST

Conclusion

- 30 Nous avons présenté, à travers le cas des recherches entreprises sur la peste à Madagascar, l'évolution des rapports entre épidémiologie et géographie autour d'un même objet d'étude, celui des maladies transmissibles. Le glissement du concept de complexe pathogène à celui de système pathogène permet de retracer cette évolution. Le premier, défini par le géographe Max Sorre (1933) au sens d'association entre espèces hôtes et vecteurs de la maladie en relation avec le milieu naturel, est très vite adopté par les épidémiologistes mais finalement délaissé par les géographes (Picheral, 1982). Aujourd'hui, l'approche systémique fait se rapprocher les deux disciplines autour du concept unificateur de système pathogène. Ce fait est largement permis par un élargissement du champ d'étude de l'épidémiologie, de l'analyse des processus de transmission à l'analyse des "patterns" ou processus d'expression de la maladie, à la convergence des écosystèmes et des systèmes sociaux.
- 31 En effet, traditionnellement, l'épidémiologie identifie les facteurs de risque d'infection et de transmission de la maladie au niveau des individus (Koopman, 1996, Susser, 1996). A cette épidémiologie analytique, la géographie ne saurait participer, restant alors cantonnée dans un rôle de cartographie descriptive d'indicateurs spatiaux mis au point à partir des facteurs de risque. Cependant, des études récentes (Huang et al., 2004, Gouteux et al., 2004, Mauny et al., 2004) associent épidémiologistes, écologues, sociologues et géographes dans un objectif commun d'analyser l'expression spatio-temporelle de systèmes pathogènes complexes. Dans ces études, l'organisation socio-spatiale constitue le creuset duquel émerge ou réémerge la maladie : elle est alors pleinement intégrée dans l'analyse des processus épidémiologiques.
- 32 Ces travaux récents, de même que notre projet de modélisation, dans un formalisme multi-agents, du système "peste" à Madagascar, s'inscrivent dans le cadre théorique des systèmes complexes et en adoptent la démarche de modélisation expérimentale. Cette démarche, fondée sur la formalisation à un niveau local de règles d'interactions entre les agents du système -le rat, la puce et l'homme- et l'observation, au niveau global, de la dynamique du système, doit nous permettre de mieux penser la complexité du système pathogène et de tester l'efficacité de mesures de luttes entreprises ou entreprenables, afin de contrecarrer la tendance à l'augmentation des cas observés.

Bibliographie

- Audouin-Rouzeau F., 2003, *Les chemins de la peste : Le rat, la puce et l'homme*, Presses Universitaires de Rennes, 371 p.
- Badariotti D., Weber C., 2002, « Automates cellulaires et multi-agents. Deux prototypes de modélisation de la mobilité résidentielle intra-urbaine », *L'espace géographique*, n° 2, pp. 97-108.
- Baltazard M. *et al.*, 1963, « Sur la résistance à la peste de certaines espèces de rongeurs sauvages ». *Bull. Soc. Path. Exo.*, t. 56, pp. 1102-1128.
- Baltazard M., 1963, « Etude systématique d'un « mésofoyer » de peste sauvage au Kurdistan iranien », *Bull. Soc. Path. Exo.*, t. 56, pp. 1129-1168.
- Banos A., Chardonnel S., Lang C., Marilleau N., Thevenin T., 2005, « Approche multi-agents de la ville en mouvement. Réflexions autour du projet MIRO (Modélisation Intra-urbaine des Rythmes qu'Otidiens) », In *procs. of the joint Conf. on Multi-Agent Modeling for Environment Management, CABM-HEMA-SMAGET 2005*, Bourg St Maurice-Les Arcs, France, 21 – 25 mars 2005, à paraître.
- Banos A., Chardonnel S., Lang C., Marilleau N., Thévenin T., 2005, « Modéliser et simuler la « fourmière » urbaine par les systèmes multi-agents », soumis au colloque SAGEO 2005, Avignon, France, 20 – 23 juin 2005.
- Batty M., Torrens P. M., 2001, « Modeling complexity : the limits to prediction », London, *CASA-UCL Papers*, n° 36, 36 p.
- Brygoo E. R., 1966, « Epidémiologie de la peste à Madagascar », *Archives de l'Institut Pasteur de Madagascar*, n° 35, pp. 9-147.
- Brygoo E. R., 1968, « Intérêt du foyer malgache pour une meilleure compréhension de l'épidémiologie de la peste et de sa permanence », *Bull. Soc. Path. Exo.* t. 61 pp 695-699.
- Chanteau S. (dir.), 2004, *Atlas de la peste à Madagascar*, IRD/Institut Pasteur de Madagascar, 58 p.
- Cliff A. D., Haggett P., Ord J. K., 1986, *Spatial aspects of influenza epidemics*, London, Pion limited, 280 p.
- Coulanges P., 1978, « La peste à Madagascar 1956-1976, répartition géographique, données épidémiologiques », *Archives de l'Institut Pasteur de Madagascar*, n° 46, pp. 397-426.
- Drogoul A., 2000, *Systèmes multi-agents distribués*, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Paris 6, 117 p.
- Duplantier J. M., 1997, « Rongeurs et santé à Madagascar : Principales maladies concernées, particularités de la lutte dans les foyers de peste », in *Rongeurs et lutte antimurine à Madagascar*, recueil des exposés lors du Symposium tenu à Antananarivo du 1^{er} au 5 décembre 1997, tome II.
- Epstein J. M., 1999, « Agent-based computational models and generative social science », *Complexity*, John Wiley and Sons, vol. 4, n° 5, pp. 41-60.
- Fassi-Fehri M. M., 2001, *Les maladies émergentes, dérives des rapports de l'homme avec la nature*, éd. Scriptura, 168 p.
- Gatrell A. C., 2005, « Complexity theory and geographies of health : a critical assessment », *Social Science and Medicine*, n° 60, pp. 2661-2671.
- Gilbert N., 1995, « Simulation : an emergent perspective », *conference on New Technologies in the Social Sciences*, 27-29th October, 1995, Bournemouth, 13 p.
- Girard G., 1942, « Le comportement de la puce *Synopsyllus fonquernii* et son rôle dans la transmission de la peste », *Bull. Soc. Path. Exo.* t. 35 pp. 177-181.
- Goodman S. M., 1995, « *Rattus* on Madagascar and the dilemma of protecting the endemic rodent fauna », *Conservation biology*, 9(2) : 450-453.
- Goûteux J. P., Muller I., Grébaud P., 2004, « An agent-based model of sleeping sickness: Simulation trials of a forest focus in southern Cameroon », *Comptes Rendus Biologies*, vol. 327, n° 1, janvier 2004, pp. 1-11.
- Handschumacher P. *et al.*, 1997, « Des îles dans la grande île : isolement et risque sanitaire dans le Moyen-Ouest malgache », in *Sociétés et espaces littoraux et insulaires dans les pays tropicaux*, pp. 533-546.
- Handschumacher P. *et al.*, 2000, « La résurgence de la peste à Madagascar : une maladie centenaire à l'épreuve de l'histoire et de l'écologie » in Vaguet A. (éd.), *n° thématique Maladies émergentes et reviviscentes, Espaces, Populations, Sociétés*, 2, pp. 195-208.
- Handschumacher P., Laffly D., Duplantier J. M., 2003. « De l'image à la perception du risque pesteux sur les hautes terres malgaches : informations géographiques multiscalaires et indicateurs environnementaux

pour la santé publique », *actes du colloque AFRICAGIS 2003*, Dakar, novembre 2003, communication orale.

Hervouët J. P., Laffly D., Handschumacher P., 2003, « De l'écologie des maladies à la mise en évidence d'indicateurs de risques sanitaires : pour une géographie appliquée à la santé publique en Afrique Subsaharienne », *Historiens et Géographes*, n°382.

Huang C.Y. *et al.*, 2004, « Simulating SRAS : Small-world epidemiological modeling and public health policy assessments », *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 7, n° 4., np.

Koopman J. S., 1996, « Emerging objectives and methods in epidemiology », *American Journal of Public Health*, n° 86, pp. 630-632.

Laffly D., Hervouët J. P., 2002. « La mouche Tsé-Tsé sous haute surveillance : cartographie des paysages épidémiologiques par télédétection et analyse spatiale », *XYZ*, Paris, oct. 2002, pp. 40-47.

Le Moigne J.-L., 1999, *La modélisation des systèmes complexes*, Paris, Dunod, 178 p.

Lerbet-Sereni F. (dir.), 2004, *Expériences de la modélisation, modélisation de l'expérience*, Paris, éd. L'Harmattan, coll. Ingenium, 174 p.

Longini I. M., Haber M., Koopman J. S., 1989, « Use of modeling in infectious disease epidemiology », *Am. J. Epidemiol.*, n° 130 pp. 619-620.

Manson S. M., 2001, « Simplifying complexity : a review of complexity theory », *Geoforum* 32(3) : 405-414.

Mauny F., Viel J., Handschumacher P., Sellin B., 2004, « Multilevel modelling and malaria : a new method for an old disease », *Int. J. Epidemiol.*, 33(6): 1337-1344.

Mollison D. (dir.), 1995, *Epidemic models : their structure and relation to data*, Cambridge University Press, 442 p.

Morin E., 1990, *Introduction à la pensée complexe*, Paris, éd. ESF, 158 p.

Organisation Mondiale de la Santé, 1994, « La peste humaine en 1994 », *Relevé Epid. Hebd.* n° 71, pp. 165-172.

Picheral H., 1982, « Complexes et Systèmes Pathogènes : approche géographique » in Doumenge J. P., *De l'épidémiologie à la géographie humaine*, CEGET-CNRS, Coll. Travaux et documents de géographie tropicale, n° 48, pp. 259-269.

Picheral H., 2001, *Dictionnaire raisonné de géographie de la santé*, GEOS, Montpellier III, 308 p.

Raison J. P., 1984, *Les Hautes Terres de Madagascar et leurs confins occidentaux, enracinement et mobilité des populations rurales*, thèse d'Etat, 2 tomes, éd. ORSTOM-Khartala, 1255 p.

Raison J. P., 2000, « Madagascar: vers une nouvelle géographie régionale », *L'information géographique*, n°1, pp. 1-19.

Ratsifasoamanana L. *et al.*, 1998, « La peste : maladie réémergente à Madagascar », *Arch. Inst. Pasteur Madagascar*, n° 64 (1&2), pp. 12-24.

Sorre M., 1933, « Complexes pathogènes et géographie médicale », *Annales de Géographie*, 42 (235), pp. 1-18.

Susser M. S., 1996, « Choosing a future for epidemiology : Part I : Eras and paradigms ; Part II : From black-box to chinese boxes and eco-epidemiology », *American Journal of Public Health*, n° 86 pp. 668-677.

Notes

1 Les prototypes SAMU (<http://www.univ-pau.fr/~banos/sma.html>), MIRO (Banos, 2005) et SIMSMA (<http://www.mgm.fr/libergeo/details.php?id=19> ; Badariotti, Weber, 2002), développés par deux des auteurs, illustrent cet aspect fondamental.

Pour citer cet article

Référence électronique

Dominique Badariotti, Arnaud Banos et Vincent Laperrière, « Vers une approche individu-centrée pour modéliser et simuler l'expression spatiale d'une maladie transmissible : la peste à Madagascar », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Dossiers, Sélection des meilleurs articles de

SAGEO 2005, document 393, mis en ligne le 16 juillet 2007, consulté le 29 mai 2013. URL : <http://cybergeog.org/9052> ; DOI : 10.4000/cybergeog.9052

À propos des auteurs

Dominique Badariotti

Laboratoire Sociétés Environnement Territoires, UMR 5603 CNRS / UPPA, IRSAM, Avenue du Doyen Poplawski, 64000 Pau
dominique.badariotti@univ-pau.fr

Arnaud Banos

Laboratoire Sociétés Environnement Territoires, UMR 5603 CNRS / UPPA, IRSAM, Avenue du Doyen Poplawski, 64000 Pau

Vincent Laperrière

Laboratoire Sociétés Environnement Territoires, UMR 5603 CNRS / UPPA, IRSAM, Avenue du Doyen Poplawski, 64000 Pau

Droits d'auteur

© CNRS-UMR Géographie-cités 8504

Résumés

Depuis l'introduction de la peste à Madagascar par les colons européens, les recherches sur le cycle épidémiologique du foyer malgache se sont concentrées sur les processus de transmission du bacille pesteux entre les hôtes principaux -les rats- et secondaires -les hommes- via un vecteur, les puces. Ces mécanismes sont désormais bien connus grâce à la démarche expérimentale de laboratoire. L'enjeu actuel des recherches porte davantage sur l'analyse des processus d'émergence, de réémergence, de diffusion et de conservation de la peste, ce qui suppose de replacer la maladie dans son environnement, dans l'objectif de mieux la contrôler. L'objet de cet article est de montrer, tout en retraçant l'évolution des recherches entreprises sur la peste à Madagascar, l'intérêt heuristique d'une approche récente de modélisation informatique dérivée de l'intelligence artificielle distribuée et fondée sur le paradigme de la complexité : les multi-agents.

Towards an individual-based approach to modelise and simulate spatial patterns of a communicable disease : the plague in Madagascar

Since the introduction of plague in Madagascar by europeans settlers, research on the Madagascar epidemiologic cycle has been focussing upon the comprehension of the transmission process between the main host, rats, and the secondary one, humans, via a vector, fleas. This process is now well known, thanks to the experimental method. Nowadays, research integrates a new approach, derived from artificial intelligence techniques and founded upon sciences of complexity, to analyse emergence, reemergence, conservation and diffusion of plague in its environment, in order to improve its control. The aim of our paper is to present this new approach of plague, replaced in its historical context, and based on multi-agent modeling.

Entrées d'index

Mots-clés : complexe, système pathogène, peste, Madagascar, modélisation multi-agents

Keywords : pathogenic system, complex, plague, Madagascar, multi-agent modelling

Notes de l'auteur Cette recherche est soutenue par l'ACI Systèmes Complexes en SHS 2004 – 2007.