



Dynamiques environnementales

Journal international de géosciences et de l'environnement

36 | 2015

Environnement et santé : où en est la géographie ?

Observatoire Scientifique en Appui à la GEstion de la Santé sur un territoire (OSAGE-S)

Scientific Observatory Support to Management Health on territory (OSAGE-S)

Mireille Fargette, Roger Frutos, Aurélie Merlin, Patrice Ravel, Tri Baskoro Tunggul Satoto, Eka Andayani, Susi Damayanti, Guilhem Kister, Ngu Duy Nghia, Yannick Bardie, Emmanuel Cornillot, Christian Devaux, Catherine Moulia, Laurent Gavotte, Laurence Briant, Nathalie Chazal et Thérèse Libourel



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/dynenviron/962>

DOI : 10.4000/dynenviron.962

ISSN : 2534-4358

Éditeur

Presses universitaires de Bordeaux

Édition imprimée

Date de publication : 1 juillet 2015

Pagination : 58-81

ISBN : 979-10-300-0107-5

ISSN : 1968-469X

Référence électronique

Mireille Fargette, Roger Frutos, Aurélie Merlin, Patrice Ravel, Tri Baskoro Tunggul Satoto, Eka Andayani, Susi Damayanti, Guilhem Kister, Ngu Duy Nghia, Yannick Bardie, Emmanuel Cornillot, Christian Devaux, Catherine Moulia, Laurent Gavotte, Laurence Briant, Nathalie Chazal et Thérèse Libourel, « Observatoire Scientifique en Appui à la GEstion de la Santé sur un territoire (OSAGE-S) », *Dynamiques environnementales* [En ligne], 36 | 2015, mis en ligne le 01 juillet 2016, consulté le 28 novembre 2019.

URL : <http://journals.openedition.org/dynenviron/962> ; DOI : 10.4000/dynenviron.962



La revue *Dynamiques environnementales* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.



Travail dans les rizières
du village de Nogosa-
ri, Boyolali en Indo-
nésie (cliché : CDC/
Evi Susanti Sinaga,
Indonesia, 2014).



Observatoire Scientifique en Appui à la Gestion de la Santé sur un territoire (OSAGE-S)

Mireille Fargette¹, Roger Frutos^{2,3}, Aurélie Merlin^{1,13}, Patrice Ravel⁴, Tri Baskoro Tunggal Satoto⁵, Eka Andayani⁶, Susi Damayanti⁵, Guilhem Kister⁴, Ngu Duy Nghia⁷, Yannick Bardie⁸, Emmanuel Cornillot⁴, Christian Devaux⁹, Catherine Mouliq¹⁰, Laurent Gavotte¹⁰, Laurence Briant¹¹, Nathalie Chazal¹¹, Thérèse Libourel¹²

Résumé/Abstract

Dans le contexte « environnement-santé », l'équipe interdisciplinaire (biologistes, médecins, épidémiologistes, modélisateurs, écologues, géographes, informaticiens) qui travaille sur la dynamique de maladies infectieuses dans le Sud-Est asiatique, propose de mettre en commun la connaissance qu'elle a des agents biologiques pathogènes et des processus qui interviennent dans les milieux et les sociétés et de partager expériences de terrain, de laboratoire, clinique pour aborder les questions de recherche, de suivi des maladies et de gestion de la santé. Pour ce faire, l'idée d'une plateforme intégrative a été avancée et nous a permis de décliner la proposition de mise en œuvre d'un Observatoire Scientifique en Appui à la Gestion de la Santé sur un territoire (OSAGE-S). Les prémices de ce travail sont d'une part d'ordre générique et épistémologique : ils explicitent formellement la formule « environnement - santé » pour y positionner le pathosystème, l'environnement et l'observatoire ; d'autre part d'ordre opérationnel par explicitation du concept d'observatoire en appui à la gestion de la Santé. Par la suite nous illustrerons nos propos autour d'OSAGE-S, à partir d'une étude de cas, la maladie du Chikungunya en Indonésie.

Scientific Observatory Support to Management Health on territory (OSAGE-S)

Within the "Health and Environment" framework, a group of scientists in disciplinary fields as diverse as biology, medical sciences, modelling, ecology, geography, computer sciences, are collaborating to study the dynamics of infectious diseases in Southeast Asia. In this paper they propose to pool their knowledge on biological pathogens, environment and societies and to share their field, laboratory and clinical expertise to address questions on research, disease monitoring and health management. An integrative platform has been suggested and organised in order to implement a Scientific Observatory (OSAGE-S), dedicated to supporting Health Management in a Territory. The first part of this work addresses generic and epistemological questions, formally explicits the formula "Health and Environment" in order to relate it to concepts such as « pathological system », « environment » and « observatory »; the second part relates to further operational issues for the observatory concept dedicated to the support of Health management. Thereafter we illustrate our proposition with a case study, the Chikungunya disease in Indonesia.

Mots clés/Key-words

Modélisation objet, systémique, pathosystème, environnement, système de santé.

Object models, systemics, pathological system, environment, health system.

Introduction

Les problématiques de santé qui ont toujours accompagné l'humanité sont devenues des enjeux majeurs dans le cadre de la mondialisation que nous vivons depuis quelques décennies. Quelles que soient les pathologies, transmissibles ou non transmissibles, l'environnement (depuis Hippocrate / IV^e siècle av. J.C.), notamment dans sa dimension spatiale, est

souvent au cœur des phénomènes et la prise en compte de cette dimension a revêtu des aspects divers au cours du temps, de la mise en place de mesures au niveau local (par exemple, la Charte de Mirepoix, 1303) à la volonté de coordination à l'échelle globale, par exemple, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Les populations humaines ont fait face à ces fléaux, avec plus ou moins d'efficacité et aussi d'intuition. Certains espaces étaient réputés malsains

1. IRD, UMR228 Espace-Dev (IRD-UM-UAG-ULR), Montpellier, France - mireille.fargette@ird.fr

2. Institut d'Electronique et des Systèmes – UMR 5214 (CNRS-UM), Montpellier, France - roger.frutos@umontpellier.fr

3. Intertryp, UMR 17, CIRAD, Montpellier, France

4. Institut de Recherche en Cancérologie de Montpellier (U1194), Montpellier, France

5. Center for Tropical Medicine, Faculty of Medicine, Gadjah Mada University, Yogyakarta, Indonesia

6. Sukoharjo Regency Health Center, Center of Java, Sukoharjo, Indonesia

7. National Institute of Hygiene and Epidemiology, 1 Pho Yersin, Hanoi, Vietnam

8. Voutes SAS – Intelligence in Life, Montpellier, France

9. IRD, Marseille, France

10. Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier - ISEM, UMR 5557 CNRS – UM, Montpellier, France

11. Centre d'études des agents pathogènes et biotechnologies pour la santé, CPBS, FRE 3689 CNRS-UM, Montpellier, France

12. UM, UMR228 Espace-Dev (IRD-UM-UAG-ULR), Montpellier, France - therese.libourel@umontpellier.fr

13. UMR INRA-Oniris Biologie, Epidémiologie et Analyse de Risque en santé animale (BioEpAR), Nantes, France

et le mal était alors souvent attribué à l'air et autres « vapeurs » ; ainsi les milieux palustres par exemple ont souvent occupé une place spéciale dans l'imaginaire collectif. On parlait de la fièvre des marais alors que ni le moustique et encore moins le *Plasmodium* n'étaient soupçonnés d'une quelconque intervention dans la « malaria ». Il ne fait pas bon non plus fréquenter certains marigots auxquels on associera peut-être confusément mais avec toutefois beaucoup de prescience, des affections sanitaires¹. Depuis les terribles épidémies de peste et choléra, les premiers « hommes de science » ainsi que les premiers « pouvoirs publics » ont pressenti l'importance des facteurs environnementaux sur la propagation de certaines maladies au sein des populations. Aux époques où les sciences médicales n'existaient pas (ou si peu), le positionnement des lazarets à l'extérieur des murs, celui des léproseries dans des lieux reculés, la mise en quarantaine des vaisseaux suspects, le contrôle des mouvements des populations (voire leur interdiction avec la construction de murs dont le franchissement était interdit) sont autant de témoignages, dans les mémoires et les écrits, de mesures et tentatives de contrôle. Tous ces exemples intègrent une certaine notion du « spatial », qu'il s'agisse de nuancer la qualité de certains lieux (en particulier ceux connus pour être insalubres) ou qu'il s'agisse de saisir la propagation (dissémination) de lieu en lieu. Par des mesures de confinement, il s'agissait bien d'intervenir sur la transmission, phénomène systémique mais vécu de façon éminemment spatiale. Dans le monde contemporain, les pays et organismes (nationaux et internationaux) actuels disposent de moyens bien plus élaborés, qui interviennent sur des spectres d'action beaucoup plus diversifiés, de la connaissance scientifique aux technologies de pointe; de la communication au large partage de l'information et de la connaissance. Dans un monde bien moins cloisonné qu'il ne l'était auparavant (rapidité des échanges et multiplicité des voies empruntées) les sociétés ont, de plus en plus, conscience des enjeux de santé et du besoin de coordination face aux risques sanitaires (épidémies, maladies émergentes) et mettent en œuvre diverses initiatives. Nous pouvons citer les données et statistiques de l'Observatoire Mondial de la Santé (GHO), les données et indicateurs fournis par la fédération nationale des observatoires régionaux de santé (FNORS) ainsi que l'initiative One Health (One Health).

Ces dernières années, en France, au niveau national, la notion de territoires de la santé a émergé, qui propose de greffer un nouveau zonage aux découpages administratifs classiques (nation, région, département, arrondissement, canton, commune). Partant de la définition de la géographie de la santé de Picheral (1985) i.e. « l'étude spatiale de la qualité de la santé des populations, de leurs comportements et des facteurs de leur environnement qui concourent à la promotion ou à la dégradation de leur santé », il s'agit d'être plus près des lieux de vie et de permettre la comparaison de ces territoires de santé entre eux. Il est fait référence aux territoires créés par une ordonnance du gouvernement (2003) en tant que zones géographiques définies à partir des besoins de

santé de la population (question orale au Sénat, 2005). Enfin, soulignons la parution, sous l'égide de l'OMS, de l'Atlas de la santé et du climat (ATLAS), fruit de la collaboration exceptionnelle entre les spécialistes de la météorologie et de la santé. Il renferme d'importantes informations scientifiques sur les rapports entre le temps, le climat et les grands problèmes sanitaires, les maladies liées à la pauvreté, aux situations d'urgence créées par les phénomènes météorologiques extrêmes ou les flambées épidémiques, sans oublier la détérioration de l'environnement, la progression des maladies non transmissibles et le vieillissement général de la population.

Etant donné l'enjeu, que l'on veuille le considérer au niveau global comme à des niveaux plus locaux ou régionaux, les observatoires d'analyse et de suivi des questions de santé ont un rôle à jouer dans le dispositif, pour certains au plus près de la prise de décision, pour d'autres plus détachés de celle-ci et délivrant leur lot d'information.

Notre propos, dans ce contexte, sera double :

- Tout d'abord, d'ordre épistémologique, il s'agit d'explicitier la formule « environnement - santé » qui, souvent utilisée de façon laconique et expéditive, recouvre forcément un champ polysémique.

- Ensuite nous proposons, à partir de l'analyse des concepts sous-jacents à la notion d'environnement-santé, la mise en place du concept d'observatoire scientifique en appui à la gestion sanitaire, basé sur une réflexion multidisciplinaire et systémique.

Dans la section 2, nous décrivons rapidement la posture adoptée : approche orientée objet et le formalisme Unified Modeling Language (section 2.1) puis, plus longuement, les prémices de nos travaux déclinées, d'une part en conceptualisation et formalisation du concept de pathosystème et de son environnement (section 2.2), d'autre part en conceptualisation et formalisation du concept général d'observatoire scientifique en appui à la gestion du territoire (section 2.3). La section 3 sera dédiée à la formalisation de OSAGE-S déclinée à partir de la représentation de l'observatoire OSAGE (Loireau et al., 2014). Nous proposerons ensuite (section 4) de passer le pas et d'entrer dans le dispositif scientifique de l'observatoire, en illustrant le cadre général à partir d'une étude de cas : mode d'organisation de la connaissance, de raisonnement et d'actions, d'acquisition ou d'analyse de données. La section 5 conclura notre propos.

I- Prémices et réflexions initiales

A- Approche modélisation objet : formalisme UML

Afin d'asseoir plus rigoureusement les diverses analyses, l'équipe pluridisciplinaire a décidé d'adopter l'approche modélisation objet ; celle-ci consiste à représenter les systèmes analysés grâce aux concepts d'objet, de classe et de relation. Les modèles sont alors traduits grâce au formalisme objet UML (Unified Modeling Language) que nous présentons brièvement.

¹. Par exemple, la bilharziose qui est directement inféodée aux eaux stagnantes et qui a eu des impacts connus depuis l'antiquité (Egypte).

UML est un formalisme de modélisation, résultat de la fusion de trois formalismes dédiés au génie logiciel et développés entre 1980 et 1995 par Booch, Rumbaugh et Jacobson (2005). Leur collaboration au sein de l'Object Management Group a abouti à un standard et un ensemble d'outils logiciels qui permettent d'analyser, de modéliser, et de représenter des systèmes suivant une approche objet.

L'usage d'UML s'est largement répandu car, de par sa polyvalence, il peut s'adapter à des domaines d'application très variés tout en restant aisément traduisible en code à des fins d'implantation informatique.

Dans sa version la plus récente, UML offre des notations graphiques spécifiques pour décliner les divers points de vue sous lesquels le système peut être analysé : point de vue fonctionnel, point de vue structurel, point de vue dynamique, point de vue architectural et point de vue implémentation.

Chaque point de vue peut être représenté par divers types de diagrammes. Pour notre propos, nous n'évoquerons que les modèles statiques. Les modèles statiques décrivent la structure du système, en termes de concepts et de relations (niveau abstrait diagrammes de classes) et d'objets et de liens (niveau concret diagramme d'objets).

Nous ne détaillons ici (**figure 1**) que la légende nécessaire à la compréhension des diagrammes de classes présentés ensuite au fil du développement.

B- Le pathosystème et son environnement

La formule « environnement - santé » est souvent utilisée en raison de sa brièveté ; le raccourci ainsi réalisé s'accompagne d'une simplification probablement abusive d'une réalité bien plus complexe et l'imprécision ainsi introduite peut ensuite induire biais, glissement de sens voire polysémie. Aussi explorerons-nous pour commencer l'expression et les concepts qui lui sont attachés (en quelque sorte encapsulés dans la formule), *via* les représentations des **figures 2a et 2b**. Ce faisant, nous déclinerons une description du pathosystème qui vaudra définition, par son environnement, son contenu avec un focus sur son interface interne-externe et enfin sa relation inhérente au Système de Santé.

Notre intérêt porte sur les maladies constatées chez l'homme (l'homme considéré ici en tant qu'être

Classe: abstraction d'objets qui partagent propriétés et comportements communs

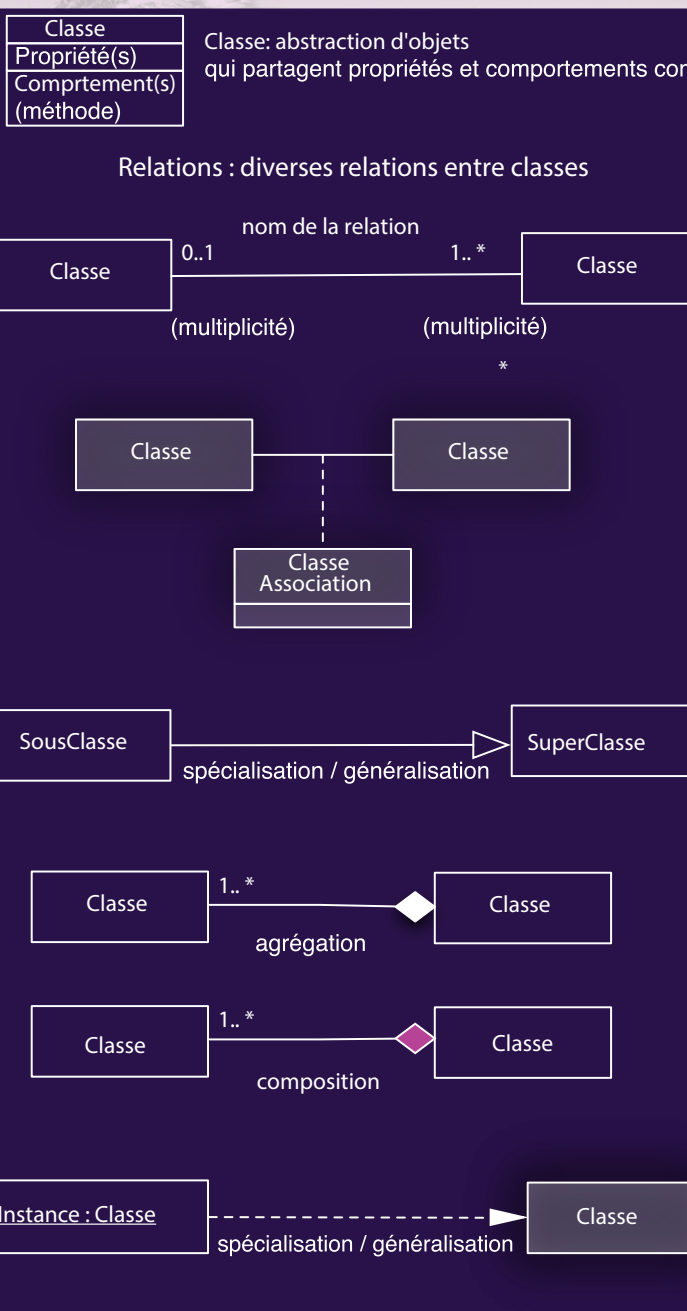


figure 1 : Légende des diagrammes de classes UML.

biologique et non agent sociétal), maladies qui affectent sa santé, et dont l'agent causal, biotique (*i.e.* agent infectieux ou parasite) ou abiotique (*e.g.* métaux lourds, etc.), se trouve initialement dans son environnement ; le terme environnement [a] est utilisé ici dans son acception la plus générique, *i.e.* tout ce qui est autour de l'homme, ce qui relève du monde qui l'entoure.

La notion d'environnement est polysémique ; elle peut être décrite comme ce qui est relatif au Système Terre, dans ses acceptions systémique, écologique, géographique. Au travers de ce prisme et en se référant au concept de système en général et à celui de pathosystème, les contenus des notions de pathosystème et d'environnement vont être précisés.

L'environnement

1) D'un point de vue systémique en général (**figure 2a**, partie en jaune), et dans une vision la plus générique possible, un système peut être simple ou complexe, un système complexe étant un agrégat de composants (systèmes simples ou complexes). Ce modèle induit une structure hiérarchique de composants. Au-delà de cette structure, le système a un fonctionnement et une dynamique qui décrit son historique.

Une définition systémique de l'environnement [b] d'un système lui attribue ce qui est à la fois extérieur au système-objet d'étude et en relation avec ce dernier.

Pour des besoins analytiques, on peut extraire d'un système, selon le point de vue [note : ce point de vue est porté par les humains et la question qu'ils se posent] de l'étude, deux compartiments, l'un relatif à l'entité analysée et l'autre à son complémentaire sur le Système (complémentaire en terme ensembliste.) Aucun des deux compartiments ainsi créé ne possède par obligation la propriété d'être système lui-même ; cependant, certains compartiments peuvent être reconnus comme tels.

2) Dans le cas qui nous intéresse, un pathosystème est un système. Le pathosystème, système objet d'étude est lui-même plongé dans un système englobant, le Système Terre précédemment évoqué. Il s'agit d'une instance (**figure 2b**) de système complexe (**figure 2a**).

De nouvelles interprétations de l'environnement peuvent être données à l'aide de la représentation de la **figure 2b**.

La vision par compartiments scinde l'instance Système Terre en deux instances de compartiments, le compartiment objet d'étude, – il s'agit de l'instance 1 de pathosystème (PS1), et son complément (EnvPS1), calculé en terme ensembliste, sur le Système Terre. Certains considéreront en tant qu'environnement [c] du pathosystème les seuls sous-compartiments de EnvPS1 en stricte relation (pression, régulation) avec le pathosystème.

Etant donné le niveau de complexité du Système Terre (et donc celui des interactions / rétroactions qui l'organisent et le parcourent), il est possible de considérer qu'aucun compartiment (en l'occurrence ici les sous-compartiments de EnvPS1) n'est réellement indépendant des autres (sans interaction) et qu'ils trouvent leur seule pertinence au niveau global ou quasi global (système quasi parfaitement intégré). Dans ce cas l'environnement du pathosystème est le compartiment complémentaire EnvPS1 (environnement [d]), voire le Système Terre lui-même (environnement [e]).

Aussi l'environnement est-il souvent vu comme un système complexe plus englobant. On peut aussi le voir comme un ensemble de systèmes complexes, interagissant entre eux de façon complexe avec des niveaux de connexion diversifiés, structurellement imbriqués ou non les uns aux autres, et *in fine* constitués, pour un niveau de complexité donné (correspondant à l'échelle d'étude), de systèmes dits

simples, i.e. formés d'éléments (abiotiques, biotiques et sociétaux) dans des combinaisons variables. De ces systèmes et en particulier de la diversité des modes d'organisation des sociétés, notre propos retiendra tout particulièrement a) le Système de Santé (celui-ci sera discuté dans le paragraphe Système de Santé, ci-dessous), quelle que soit la forme et la complexité qu'il revêt, b) les systèmes autres (ceux-ci seront discutés aux paragraphes Interface du pathosystème et Système de Santé), et ce seulement en ce qui relève de leur possible relation avec le pathosystème (définition [c] de l'environnement).

Par ailleurs, sans détailler plus ici, nous retiendrons de cette complexité :

- que l'environnement est vaste et ouvert,

- qu'il peut être aussi considéré comme une hiérarchie de systèmes (**figure 2a**) ou l'agrégation de nombre de compartiments (**figure 2b**), plus ou moins complexes et composites, d'ordre « socio-éco-systémique »,

- que la définition [c], la plus stricte, ne retient que les seuls composants interagissant avec le pathosystème ; il s'agit alors de sa définition fonctionnelle.

De ce point de vue fonctionnel et pour le pathosystème, ces composants environnementaux (parfois nommés aussi facteurs environnementaux), externes au pathosystème, exercent pression et régulation, qu'il s'agisse dans un premier temps de constater les atteintes d'une maladie sur une population, ou bien ensuite d'envisager sa gestion (nous verrons ceci plus précisément en **figures 3 et 7**).

3) D'un point de vue géographique (**figures 2 a et b**, couleur verte), les éco-socio-systèmes complexes, parties prenantes tels que précédemment décrits dans le Système Terre, s'implantent sur des espaces du globe. De la projection de l'activité systémique (fonctionnement de type écologique, de type organisation de société et de tous les niveaux d'imbrication des interactions adaptatives ou stabilisatrices des relations Société-Milieu) sur un espace géographique, naissent des zones géographiques occupées par des milieux plus ou moins anthropisés et des zones organisées en espaces territoriaux.

De même, l'environnement du pathosystème se matérialise aussi en espaces géographiques, sites et lieux pertinents pour le pathosystème, à la fois par les objets géographiques et l'organisation spatiale qu'ils présentent et par les propriétés systémiques de fonctionnement des systèmes auxquels ils se réfèrent. Il s'agit là encore d'une définition de l'environnement [f].

Dans ce contexte foisonnant, nous tentons une synthèse en proposant la définition suivante de l'environnement [g] : l'environnement du pathosystème (le pathosystème étant en gris dans les **figures 2a et b**) est constitué d'un agrégat de compartiments du Système Terre (**figure 2a**, en jaune) exerçant forçages, pressions et régulations sur le pathosystème. A cet environnement correspond aussi

un agrégat de compartiments (zones géographiques, en vert) selon le point de vue alliant spatial et sociétal.

Le pathosystème

La complexité d'un système se constate à la fois par la complexité des niveaux d'organisation systémique (**figure 2a**, structure d'un système complexe) et par le nombre des disciplines auxquelles il fait appel pour en comprendre les mécanismes. En retour, la multidisciplinarité a pour effet la diffraction sémantique, ce que l'on constate par exemple pour les concepts d'environnement (ci-dessus) et de réservoir (ci-dessous), concepts se trouvant à la croisée de disciplines. Pour les mêmes raisons, en systémique le périmètre systémique de l'objet d'étude (i.e. la délimitation du système lui-même et de son environnement) pourra être questionné et discuté (cf. section Interface du pathosystème, ci-dessous).

Dans ce contexte, la **figure 2a** présente le pathosystème (en grisé) comme un système complexe, spécialisation d'écosystème. Ci-dessous sont mis en relation un certain nombre de concepts qui sont contenus dans son périmètre.

Le contact homme/agent pathogène peut conduire à l'acquisition par l'homme de l'agent pathogène. Autrement dit l'agent causal passe d'une source-réservoir (humaine ou non-humaine) à un homme ; autrement dit encore, il y a transmission de l'agent causal (que celui-ci se transmette ou soit transmis) ; on dira que l'homme est infecté ou infesté par un agent biologique ou contaminé par un agent abiotique. La maladie peut apparaître à la suite de la transmission ; le concept est relatif à l'expression, au syndrome (ensemble des manifestations ou symptômes) causés, chez l'homme malade, par la contamination (qui induit intoxication, empoisonnement), ou l'infection (qui induit maladie infectieuse) et les développements qui s'en suivent. La maladie affecte la santé. Cependant, la maladie peut ne pas prendre place la suite de la transmission selon la dose infectante, les réactions immunitaires de l'organisme infecté ou la virulence du pathogène. Le porteur asymptomatique est cependant alors réservoir d'agent causal.

La transmission directe, à partir d'une source-réservoir vers l'humain, est :

- de type contamination (contact ou ingestion) par un agent abiotique (e.g. métaux lourds à proximité de mines ou dans des cours d'eau) ;

- de type infection par un agent biotique (e.g. bactéries causant la leptospirose, dans les eaux ou sols insalubres) ; on peut utiliser le terme « contagion », terme de médecine, pour qualifier certaines infections (e.g. grippe et virus grippal).

La transmission indirecte fait intervenir non seulement la notion de réservoir mais aussi celle de vecteur, celui-ci assurant une transmission active (e.g. la piqûre par le moustique *Aedes aegypti* pour l'unicellulaire *Plasmodium falciparum*, un agent causal de paludisme chez l'homme).

Dans le cas des maladies dites vectorielles, les sources-réservoirs sont constituées à la fois des populations humaines-porteuses, non-humaines-porteuses et vecteurs-porteurs, le vecteur jouant en règle générale mais pas systématique (par exemple la fièvre Zika) le rôle d'intermédiaire entre deux humains.

Dans le cas des maladies à transmission directe, une phase libre de l'agent causal peut exister, lors de la transmission, même si elle peut être très réduite dans le temps et l'espace.

Pour l'ensemble de ces maladies, la notion de réservoir, tout en appartenant à l'environnement de l'homme au sens large (environnement [a]), revêt des acceptions multiples :

- dans le cadre du pathosystème c'est la source-réservoir de l'agent causal : selon la maladie, il peut s'agir de l'homme lui-même, ou d'autres organismes appartenant au pathosystème et jouant un rôle dans le cycle de vie de l'agent causal, vecteurs et réservoirs animaux (hébergeant et souvent multipliant l'agent causal) ou encore des éléments biophysiques qui le contiennent (sol, eau par exemple) ;

- fonctionnellement parlant, c'est par exemple la niche : celle de l'agent causal, de ses vecteurs ou réservoirs biologiques ; il s'agit de l'ensemble des conditions favorables au maintien et développement de l'agent causal (dans le cas où celui-ci est de nature biotique), que ces conditions soient « naturelles » ou bien le fait d'activités humaines qui induisent des conditions « propices » ;

- dans le domaine de la géographie, c'est le lieu-réservoir : le concept de niche se matérialise dans le milieu selon le concept de lieu-réservoir ; il correspond à des zones de l'espace géographique, que celles-ci soient vues comme hébergeant un milieu plus ou moins anthropisé, ou considérées comme des compartiments d'ordre territorial et plus ou moins naturels ou anthropisés. Ainsi la composante sociétale a plus ou moins d'emprise sur lui ;

- par suite, dans une acception socio-écologique (fonctionnement de société sur un territoire), des sites (appartenant à des compartiments territoriaux) peuvent gagner ce statut de lieu-réservoir du fait d'activités « contaminantes » (agent causal de nature abiotique). Par ailleurs, une maladie émergente provient souvent, au moins pour commencer, de la part non encore identifiée, encore inconnue en tant que source-réservoir, de l'environnement [a]². Elle correspond à une pathologie nouvellement caractérisée chez l'homme. Un compartiment où sévissent un ensemble de conditions favorables pourra être ensuite associé au nouvel agent causal, ou à son vecteur, ou son réservoir.

En résumé, lieu-réservoir, source-réservoir et niche sont autant d'interprétations du concept de réservoir entre le pathosystème au sens strict et son environnement.

2. Il peut ensuite aussi exister des maladies dites re-émergentes.

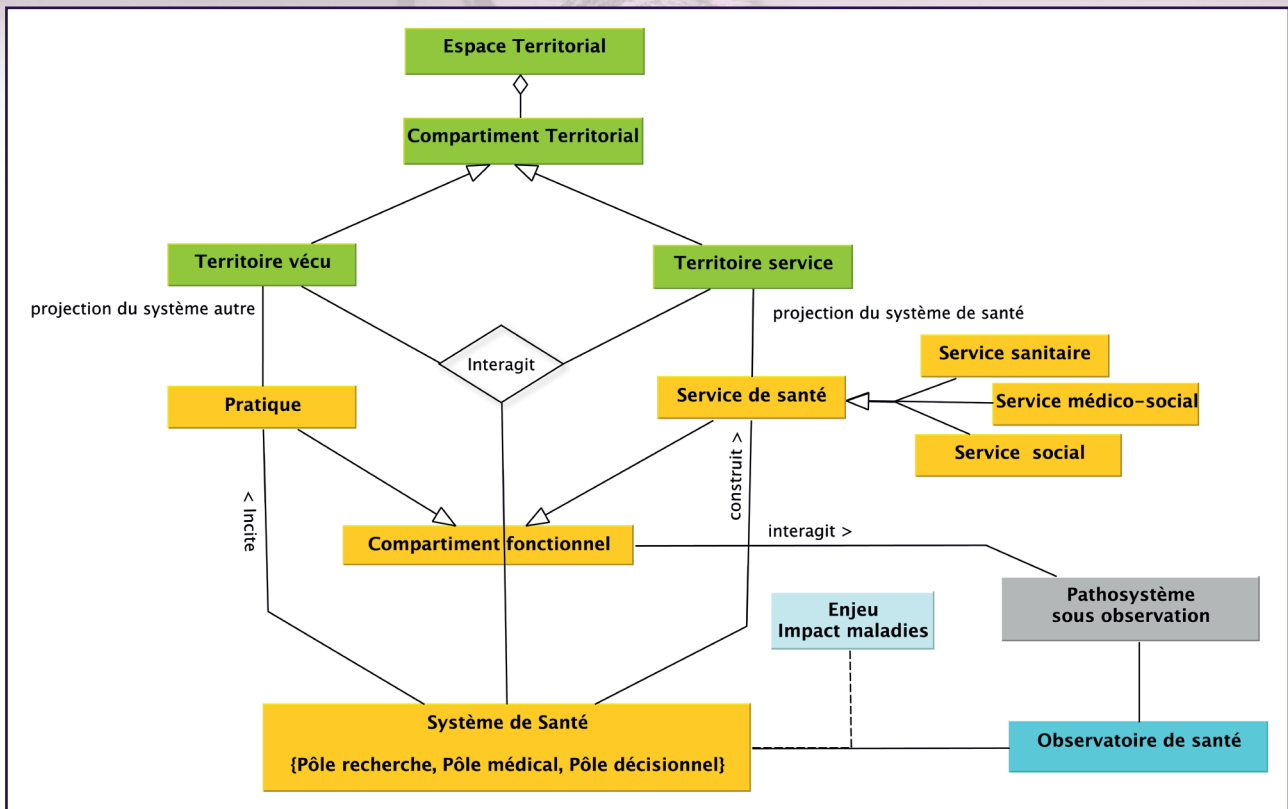


figure 3 : Système de Santé et positionnement de l'Observatoire de Santé.

Interface interne - externe du pathosystème

Pour le pathosystème tel que nous le concevons, les mécanismes (internes au pathosystème) à observer et comprendre, s'adressent plus particulièrement aux pathologistes, aux biologistes, immunologistes, généticiens, épidémiologistes, aux évolutionnistes (spécificité et co-évolution)... L'entomologie et autres disciplines de la zoologie s'intéressent aux vecteurs et réservoirs biologiques ; elles sont à l'interface (interne-externe) du pathosystème et partagent avec les écologues le concept de niche et la dimension spatiale de l'expression des pressions et régulations avec les géographes. Les médecins cliniciens contribuent à ce vaste champ systémique et interdisciplinaire par le diagnostic qu'ils posent sur les sujets (patients) atteints.

Les sciences humaines et géographiques apportent l'incontournable dimension des sociétés. En effet, il a été noté en début que l'homme, dans le pathosystème est considéré comme un agent biologique affecté par le développement d'une maladie. Si les autres dimensions humaines ne sont en aucun cas négligées, elles ne sont pas situées à l'intérieur du pathosystème mais dans son environnement. Ainsi par exemple, le système de santé, qui s'intéresse, prend en charge, gère les questions de santé est-il considéré ici comme relevant de l'environnement du pathosystème. Il en est de même des systèmes dits autres en figures 2a et 2b ; ils seront discutés ci-dessous, dans le texte relatif à la figure 3.

Ainsi donc, l'homme, acteur de société, dans ses usages et pratiques, dans la connaissance qu'il construit et les sociétés qu'il organise, participe à d'autres systèmes complexes. Distingués ici pour

leur capacité à agir (pression, régulation) sur le pathosystème, ces systèmes, à partir du domaine fonctionnel qui est le leur, rejoignent ce que Salem (1995) appelle, dans le domaine de la géographie de la santé, les faits de santé (« tout facteur jouant en un lieu sur l'état de santé de sa population »).

Système de santé

En tant que compartiments territoriaux (relevant donc de la vision géographique), territoire de service et territoire vécu en figure 3, correspondent respectivement à la projection du système de santé et des systèmes autres de la vision systémique (figure 2a, en jaune). En un même lieu, peuvent donc se superposer les projections de plusieurs systèmes.

De l'ensemble des pratiques (systèmes autres), exercées par la société humaine dans ce compartiment territorial, on retiendra essentiellement celles qui impactent l'acquisition (contact suivi du succès de la transmission, cf. figure 2a) de l'agent et par suite le développement de la maladie. Au-delà des pratiques existantes, de nouvelles relations / interactions / pratiques peuvent se construire au sein des éco-socio-systèmes au sens large, qui en venant perturber un « ordre » pré-existant peuvent induire des changements systémiques et des modifications dans la configuration des territoires concernés. A la faveur de tels événements, de nouveaux contacts entre compartiments auparavant isolés les uns des autres, peuvent être rendus possibles. De tels mécanismes sont parfois à l'origine de l'émergence de nouvelles maladies, ou de la re-émergence de maladies connues mais qui n'étaient plus recensées en un lieu.

Dans le cas de maladies endémiques, des pratiques peuvent faciliter ce contact de façon récurrente et augmenter, voire représenter en soi, des facteurs propices ou au contraire entravant le contact.

Une dialectique (interaction) s'instaure, du point de vue fonctionnel, entre les pratiques (qu'elles soient à risque ou au contraire à des fins de prévention) et les services sanitaires, médicaux et médico-sociaux (proposés par la société au regard de ce pathosystème), que ceux-ci travaillent en amont (prévention) de l'acquisition d'une maladie ou en aval de sa déclaration (soins). Conséquence de cette dialectique, les décisions/actions de la société peuvent jouer un rôle de pression/régulation sur le pathosystème quand elles ont pour intention de jouer un rôle de levier en des points de l'acquisition. Ceux-ci sont plus ou moins bien identifiés et parfois très ciblés. Les choix, les décisions relèvent du système de santé.

Ces facteurs environnementaux [i.e. conditions extérieures au pathosystème, créées par l'homme, résultant en pression, régulation] deviennent des faits de santé au sens de Salem (1995, textuellement cité plus haut) et sont aussi compris comme les « conditions conservées, générées ou entretenues par les pratiques spatiales et les modalités de gestion des espaces » de Handschumacher (2004). A ceci près qu'à l'action fortuite (positive ou négative pour l'acquisition) s'ajoutent l'action réfléchie, celle qui répond à un objectif de prévention de l'acquisition, puis celle qui prodigue/organise les soins aux patients atteints.

Du point de vue de la santé, il résulte des effets de cette dialectique l'impact résiduel de la maladie (c'est-à-dire celui subi par la population et que les services de santé n'ont pas pu/su prendre en charge).

Les **figures 2a et 3** rejoignent la vision « territoire de la santé » de Bourdillon (2005) selon laquelle la construction des territoires de santé s'appuie sur les territoires de service (desserte de la population) et les territoires vécus (les pratiques de la population, naissance, recours à l'hôpital, habitudes de vie, etc.). Dans ce contexte, nous pouvons situer non seulement le système de santé, mais aussi ce que nous désignons par observatoire en appui à la gestion de la santé.

La mission du système de santé est de mettre en adéquation (interaction) les deux compartiments territoriaux. La gouvernance (pôle décisionnel du système de santé) a pour objectif de contrôler / de minimiser au mieux l'impact de la maladie, que cela soit, du point de vue fonctionnel, en incitant de « bonnes » pratiques (prévention) ou en construisant les services utiles au soin et à l'accompagnement des malades. Dans le système de santé peuvent exister divers « pôles », chacun comptant du personnel et comportant une organisation : le pôle médical, le pôle recherche et le pôle décisionnel. Là où Salem (1998) précise que pour les géographes de la santé, le terme de territoire devrait être restreint aux formes de contrôle social d'un espace, le système de santé tel que présenté en **figure 3** est l'organe de contrôle de l'espace territorial en ce qui concerne une question de santé.

Une nouvelle fois l'environnement, tel que nous le proposons sous cette autre configuration (environnement [h]), est en capacité d'intervenir sur le pathosystème ; il s'agit là de l'intervention de la société, telle qu'elle est organisée, sur l'environnement du pathosystème : l'environnement systémique et l'espace territorial (**figure 3**, en jaune et en vert, respectivement).

Nous répondons donc à notre premier objectif, par les représentations des **figures 2a, 2b et 3** et leurs explicitations textuelles, où la formule « environnement - santé », souvent utilisée de façon un peu lapidaire, est analysée.

De plus, l'enjeu sur l'intensité de l'impact de la maladie, justifie et peut engendrer la création d'un observatoire en appui à la gestion de la santé. Les trois concepts protagonistes dans ce travail, environnement, santé, observatoire, sont ainsi campés.

C- Les réflexions initiales autour d'Observatoire Scientifique en Appui à la Gestion du territoire (OSAGE)

Dans un contexte de gestion territoriale, des réflexions que nous avons déjà menées (Loireau *et al.*, 2014) définissent ce que nous attendons d'un dispositif que nous avons dénommé OSAGE (Observatoire Scientifique en Appui à la Gestion du Territoire). Ce dispositif se différencie de la notion initiale de Système d'Information³ (Reix, 2002) et de la forme canonique Observation, Information, Décision (Le Moigne, 1999).

Comme cela a déjà été souligné, aborder un problème complexe nécessite une approche globale, pluridisciplinaire et intégrée. Cet aspect intégratif se décline en recherche par une approche pluridisciplinaire mais aussi en abordant la problématique à différents niveaux, biologiques, sociologiques, géographiques de complexité et d'interaction (compartiments d'échelles et d'ordre de complexité divers : génome, populations, écosystèmes, etc.). D'autre part, il est aussi important de développer des outils informatiques dédiés, capables de réaliser l'intégration de ces différents types de concepts et de données dans des analyses globales.

Il s'agit donc, en fait, de mettre à disposition de scientifiques, issus de domaines différents et convaincus de l'apport de leur interdisciplinarité, un dispositif sous-jacent au cycle traditionnel de l'approche expérimentale, dans ses deux volets, recherche et suivi (**figure 4**).

Autour d'une question d'intérêt sociétal, les membres du dispositif, en collaboration, retranscrivent grâce à leur connaissance, la problématique posée en questions scientifiques, émettent des hypothèses et proposent des modèles théoriques qui déterminent les protocoles d'observation⁴ (modèle d'observation) à partir desquels les vérifications stabilisent ou infirment

3. « Un ensemble organisé de ressources (personnel, données, procédures, matériel, logiciel, ...) permettant d'acquérir, de stocker, de structurer et de communiquer des informations ... au sein d'organisations ».

4. « C'est la théorie qui décide de ce que nous devons observer ». Albert Einstein.

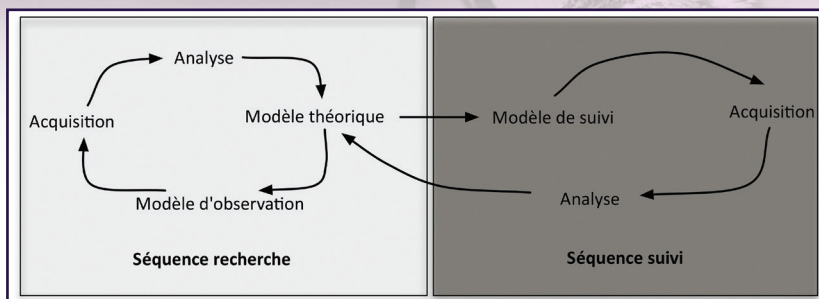


figure 4 : Séquences recherche et suivi dans le cycle de vie de l'observatoire OSAGE.

les hypothèses. Le (ou les) modèles retenus après cette phase recherche produise(nt) des indicateurs, qui sont alors soumis à suivi (selon un modèle de suivi) toujours dans l'optique de valider ou d'infléchir les modèles théoriques initiaux. La rigueur du formalisme UML seconde la rigueur de la démarche scientifique interdisciplinaire et anticipe/facilite la phase d'implémentation et d'automatisation qui finalise un « observatoire OSAGE opérationnel ».

La figure 5 présente la vision globale d'un observatoire de type OSAGE, la figure 6, une description détaillée de son dispositif scientifique.

Non seulement la démarche en interdisciplinarité est clarifiée pour chacun des points de vue disciplinaires mais le formalisme d'une part, le potentiel des outils informatiques d'autre part, peuvent conduire, à terme (finalisation opérationnelle), à certaines automatisations de tâches/actions ainsi discutées et établies.

Tout naturellement, nous avons pensé que ce genre de dispositif pouvait être adapté au contexte « environnement-santé ».

II- OSAGE-S : Observatoire Scientifique en Appui à la GEstion de la Santé sur un territoire

En revisitant les figures 4, 5 et 6, nous présentons comment OSAGE se décline en OSAGE-S tout en gardant ses termes de genericité.

La société peut faire face à des problèmes de santé, qui nécessitent l'acquisition de nouvelles connaissances ou la recherche d'une meilleure adéquation des actions envisagées au niveau décisionnel et de la connaissance scientifique, ou à des problèmes d'ordre sanitaire, qui se situent au niveau de l'implémentation des décisions et des difficultés que cela peut éventuellement soulever. Etant donnée la question de santé (figure 5, point 1 en rouge), que la société, via son système de santé, entend mieux documenter pour se donner les moyens d'une gestion plus efficace, l'observatoire de santé répond au contexte sociétal en enrichissant et structurant la connaissance, celle existant au préalable et celle acquise lors des activités de l'observatoire (activité de recherche ou de suivi spatio-temporel). Par l'éclairage ainsi apporté, il orientera la décision dont l'enjeu est, pour une maladie donnée, d'en minorer l'impact sur les populations humaines. Toutefois, ni la décision, ni les actions de gestion ne prennent place au sein de l'observatoire ; le système de santé, tel que décrit plus haut, avec lequel l'observatoire communique directement à propos de l'enjeu, est à la fois le lieu de société (point 2) où sont formulées les questions et le lieu de prise de décision. L'enjeu (point 3) est donc vu de deux points de vue différents :

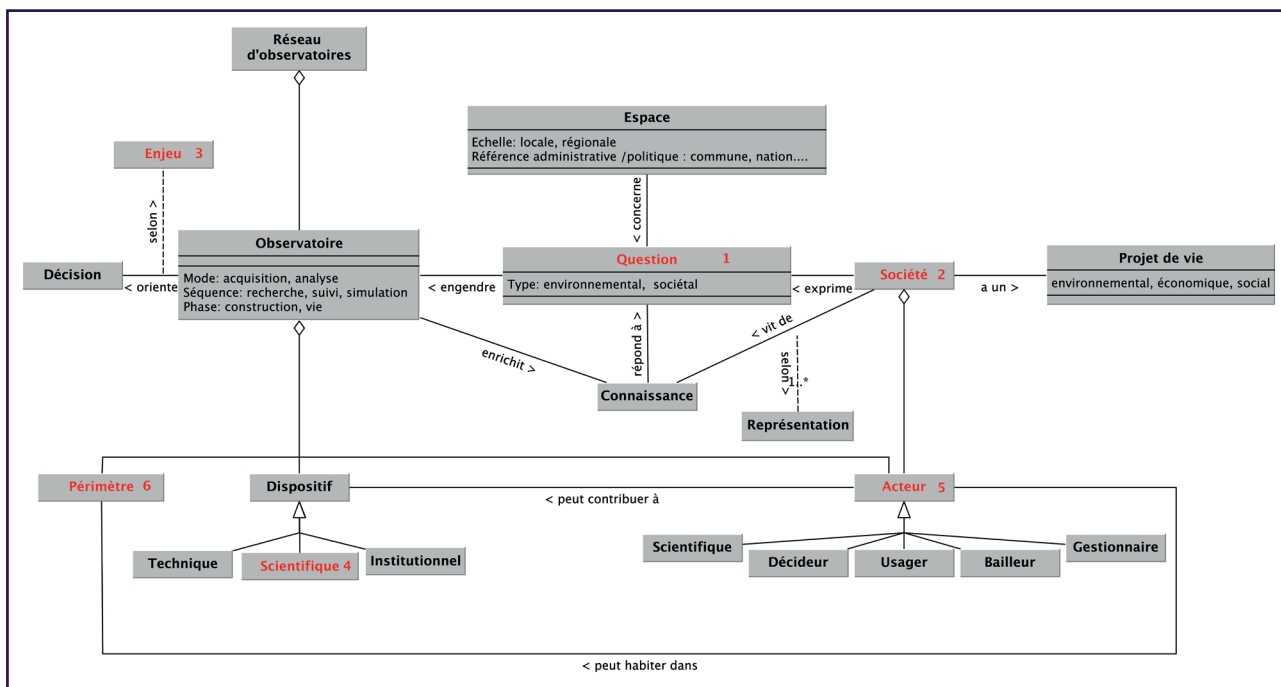


figure 5 : Structure générale de l'Observatoire Scientifique en Appui à la GEstion des territoires (OSAGE) - formalisme UML (Les notes en rouge seront rediscutées en section 3).

- celui du système de santé : enjeu décisionnel ; à propos d'une maladie dont on souhaite minimiser l'impact, il s'agit d'avoir accès aux données permettant d'opter pour les décisions les mieux adaptées à la situation ;

- celui de l'observatoire : enjeu scientifique (point 4) ; à propos d'un pathosystème, il s'agit d'acquérir données et connaissance pour documenter au mieux, selon une interprétation fonctionnelle, les contextes biologique, pathologique, épidémiologique, écologique, géographique et « environnemental ». L'interdisciplinarité y est de mise ; outre les sciences biologiques et médicales, les sciences de la terre et de la vie, les sciences humaines et sociales, les statisticiens, modélisateurs et informaticiens sont aussi de la partie.

Si le contenu de la notion même de système de santé est variable avec les pays (selon les exigences des politiques publiques et les moyens alloués) et selon les types d'affection à gérer, le concept de l'observatoire en appui à la gestion de la santé relève, quant à lui, d'un modèle générique (valable pour tous) relatif à la qualité de ses critères d'acquisition de connaissance, de raisonnement, aux circonstances / raisons / motifs qui induisent l'alternance de ses activités au long de son cycle de vie (Loireau *et al.*, 2014 et **figure 4**) : recherche, suivi, voire simulation. En s'appuyant sur les mêmes modèles de protocoles et de raisonnements, il est générique tout en restant modulable, ce qui le rend applicable en des situations très diverses. Ce faisant, l'observatoire pourra répondre de façon adaptée au système de santé avec lequel il dialogue. Ainsi, le système de santé reste libre de ses décisions et actions, l'observatoire ayant pour vocation de lui fournir la meilleure connaissance de la situation (état et évolution). Réciproquement, en ce qui concerne ses actions, l'observatoire est indépendant du système de santé sauf pour l'énoncé de la question de santé qui engendre l'observatoire. Celle-ci, au moment où elle « passe le pas » de l'observatoire est d'ailleurs revisitée pour en faire une question de recherche/suivi, conforme aux raisonnements et protocoles mis en place dans les dispositifs scientifique (**figure 4**) et technique de l'observatoire. Ainsi, même si des représentants des pôles (scientifique, médical et décisionnel) du système de santé sont bien évidemment présents en tant qu'acteurs de l'observatoire (**figure 5**, point 5) leur double appartenance ne peut pas modifier le fonctionnement de l'observatoire et sa gouvernance, ou du moins le peut dans le seul cadre des statuts de l'observatoire (un travail spécifique doit approfondir la réflexion sur le mode de fonctionnement de la gouvernance de l'observatoire OSAGE). Une particularité, même si elle n'est pas strictement spécifique au seul domaine de la santé, peut être la présence d'un comité d'éthique reconnu à part entière dans le dispositif institutionnel (**figure 5**, point 6) qui veillera, au moment de l'élaboration de l'ensemble des protocoles mis en œuvre dans l'observatoire, au respect de la déontologie, des réglementations et déclarations internationales relevant du domaine de la santé (justice, confidentialité et respect de la vie privée, ...).

La mission (en interne) de l'observatoire de santé est donc avant tout, particulièrement dans

le cas d'enjeux complexes, de mettre en relation les connaissances de champs disciplinaires divers pour rendre possible ensuite ses actions scientifiques (recherche, suivi, **figure 4**). Elle se situe aux confins de la recherche et de la « recherche-action » où alternent séquences de recherche et séquences de suivi à propos d'une question évolutive (changements globaux, suivi des effets des politiques publiques). Les activités de l'observatoire s'adaptent : le nombre et les interactions entre les disciplines impliquées dans la démarche pourront changer au long de la vie de l'observatoire ; de même l'objet d'étude s'adaptera et le modèle théorique de référence pourra voir sa composition modifiée.

Le propre de l'observatoire est donc avant tout de coordonner les différentes visions de l'environnement précédemment détaillées quant au pathosystème, tout spécialement :

- celle campant (**figures 2a et 2b**) le pathosystème dans son environnement et concevant, par sa projection théorique sur un espace géographique, la zone concernée par le système à l'œuvre : il s'agit des contextes fonctionnels (*i.e.* d'ordre systémique) et géographiques ;

- celle qualifiant les lieux en analysant (**figure 3**) non seulement la salubrité des milieux mais aussi la qualité, en terme sanitaire, des conditions de vie et pratiques dans ces milieux de vie, celles-ci pouvant avoir un effet direct, positif ou négatif, sur l'état de santé des populations : il s'agit du contexte territorial mais aussi des contextes opérationnel et décisionnel (sur le fond de propriétés fonctionnelle et géographique détaillées plus haut).

La question posée est rapportée à un espace initial, caractérisé par une extension plus ou moins réduite. Cependant le système qui lui est attaché peut faire appel à un espace bien plus large. L'observatoire opère sur un périmètre (**figure 5**, point 7) donné qui doit être cohérent avec la problématique. Aussi peut-il être parfois nécessaire d'appeler la contribution d'un réseau d'observatoires.

De plus, il doit être tenu compte, dans l'observatoire, des échelles propres à chacun des points de vue et opérer les changements d'échelle nécessaires ; et ce tout particulièrement au moment d'un changement de séquences ou d'activité dans le cycle de vie de l'observatoire et du transfert de connaissance de la recherche à la prise de décision. Il est certain qu'une attention particulière doit être portée au jeu d'échelle des processus (par exemple la propagation d'une maladie vectorielle s'appréhende tantôt au niveau global, tantôt au niveau local) au moment d'une prise de décision (organismes internationaux de santé, politique de santé régionale ou nationale). De façon pragmatique, au moment de la définition des espaces, il semble important de tenir compte certes du pathosystème mais aussi de la réalité de la vie quotidienne des populations. De façon pragmatique toujours, il faudra s'interroger sur la coïncidence spatiale des territoires « vécus » (espaces occupés où sont développées l'ensemble des us et pratiques) et « de service » (où s'appliquent les conseils de



figure 7 (A, B, C) : Environnement périurbain (RT42 de Yogyakarta).





figure 8 (A, B) : Environnement rural (RT03 de Sukoharjo).



figure 9 : Enquête épidémiologique.

d'outils de modélisation pour éviter une virtualisation non souhaitable du modèle.

(b) : modèle théorique représentant le pathosystème spécifique

Le modèle théorique sous-jacent aux objectifs précédents est décrit selon l'approche objet. Le diagramme d'interactions (figure 10) décrit le pathosystème d'un point de vue fonctionnel, i.e. la capacité de circulation de l'agent pathogène entre compartiments et sa capacité de multiplication. C'est là que sont aussi identifiées les interactions sujettes aux pressions / régulations de l'environnement (y compris les actions du système de santé), telles qu'on les a posées en I-2. Les classes d'objets (dont le triptyque fondamental du pathosystème, sans lequel il n'y a pas maladie : l'homme, le moustique, le virus) y sont représentées en rouge et celles réifiant les interactions, en bleu.

La première étape obligatoire dans la dissémination d'une maladie est le contact. Un moustique, essentiellement *Aedes aegypti* ou *Aedes albopictus*, naïf peut acquérir le virus du chikungunya (agent causal) à partir d'un humain infecté (il s'agit en ce cas d'une première source de dissémination de l'agent causal, telle que présentée en figure 2a), ou bien à partir d'un hôte primate non-humain (e.g. singe). Il s'agit là d'une émergence primaire, c'est-à-dire une zoonose, le passage d'un hôte non-humain à un hôte humain. Un moustique infecté (en général dénommé vecteur mais qui est en fait l'hôte invertébré) peut transmettre le virus à un humain naïf (il s'agit là d'une

deuxième source de dissémination de l'agent causal). Du point de vue biologique, le vecteur n'existe pas. Il y a simplement des hôtes vertébrés (humain et non-humain) et des hôtes invertébrés. La transmission est d'une part liée au comportement alimentaire de l'hôte invertébré qui est hématophage et va donc activement rechercher des hôtes vertébrés et permettre une transmission directe de l'agent causal dans la circulation sanguine de l'hôte vertébré. Il s'agit là d'une première dimension de la dynamique générale de la maladie. La seconde dimension de cette dynamique générale est liée directement ou indirectement à l'hôte humain qui par son comportement va : 1) faciliter la présence de moustiques (création d'habitats favorables, résistance aux insecticides), 2) permettre le transport de moustiques sur de longues distances (transport de marchandises), 3) amener des patients en phase virémique, c'est à dire infectieuse, au contact de moustiques (comportement sociétal et médical), 4) favoriser la proximité d'hôtes humains et non-humains (déforestation, urbanisation, tourisme). Le facteur climatique (changement climatique, réchauffement, aléas climatiques) contribue également à cette dynamique générale en augmentant ou en restreignant l'aire de distribution de certaines populations/espèces de moustiques. Les facteurs écologiques interviennent également de façon fort logique. Lorsque qu'une niche écologique est occupée par des populations autochtones de moustiques, il est plus difficile pour des populations exogènes d'occuper cette niche. A l'inverse, une niche écologique vide du fait de l'action humaine facilite l'installation de populations exogènes de moustiques et l'importation de nouvelles maladies. Le

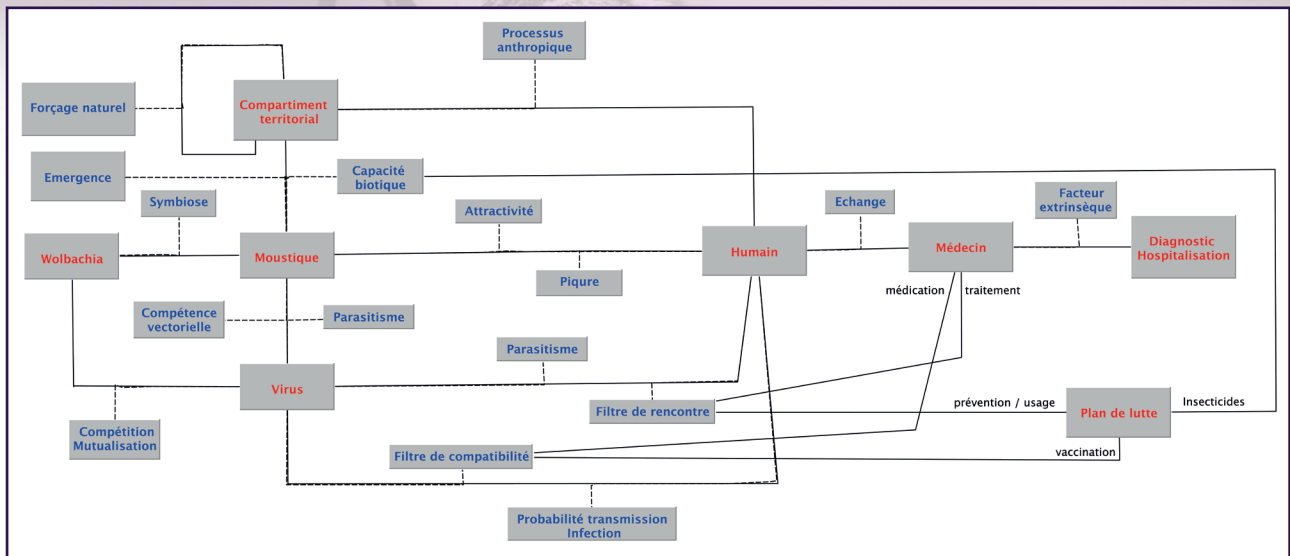


figure 10 : Diagramme d'interactions.

meilleur exemple de ce cas de figure est l'émergence rapide de la dengue en Amérique Latine suite aux campagnes de démoustication pour éradiquer la fièvre jaune. Ces différents éléments concourent, de façon variable en fonction du contexte, à l'établissement du contact. S'il est primordial, le contact ne permet pas à lui seul l'émergence ou la diffusion d'une maladie. Il faut également qu'il y ait une compatibilité, c'est-à-dire que la physiologie des hôtes permette à l'agent causal de s'installer, se multiplier et se diffuser à d'autres hôtes (cycle infectieux). C'est ce que Combes (1995) a qualifié d'ouverture du filtre de compatibilité. Ce deuxième élément clé est de nature purement biologique. Il faut enfin un troisième élément déterminant : l'établissement. Il faut que la maladie puisse rapidement se diffuser à un nombre important d'hôtes pour dépasser le simple stade d'émergence sporadique qui est par nature stochastique et éphémère. Ce troisième élément est de nature purement sociétale et est directement lié au comportement humain et au fonctionnement des sociétés humaines. Cette action humaine (processus anthropiques), qu'elle soit fortuite ou au contraire délibérée, induit directement ou indirectement des pressions qui, en modulant certaines interactions modifient *in fine* la dynamique d'une maladie et son impact sur les populations et la société. Par exemple le corps médical pourra traiter, voire hospitaliser et isoler les malades pendant la phase virémique ou au contraire renvoyer les personnes virémiques dans leurs foyers. L'impact d'une telle décision peut être majeur sur la dynamique de diffusion de la maladie. Les autorités peuvent décider, ou pas, de conduire des campagnes de démoustication dont l'effet dépend directement de la façon dont elle est conduite. Une campagne de démoustication massive peut se révéler au moins aussi néfaste qu'une absence de démoustication. Enfin, des facteurs extrinsèques (extérieurs au système) peuvent également intervenir comme par exemple la diffusion d'informations par les médias (alertant la population sur l'épidémie en cours, rendant éventuellement les individus plus vigilants). Tous ces éléments indiquent qu'une réaction efficace à une maladie émergente relève de la gestion et non de la lutte et de la tentative d'éradication du fait

de l'existence de nombreux effets pervers d'actions *a priori* positivement orientées. Tout cela pointe vers la nécessité d'une approche holistique et d'une modélisation du système en préalable à l'action. Ce premier diagramme descriptif est en conséquence essentiel mais il demeure encore statique du fait de son haut niveau d'abstraction ; il peut être complété si nécessaire par des diagrammes plus représentatifs de la dynamique comme un diagramme d'états ou un diagramme de séquences, ces diagrammes aidant à la mise au point d'un modèle mathématique prenant en compte la dynamique de fonctionnement du pathosystème.

(c) Modèle d'observation :

Une étape cruciale est celle de l'entraînement et de la validation du modèle à partir des données réelles. Dans le cas d'étude présenté ici, il était nécessaire de

- collecter et structurer des données (GPS, géographiques, démographiques, épidémiologiques, cliniques, environnementales, entomologiques),

- collecter des échantillons (moustiques, sang) en zone d'épidémie sur l'île de Java (Indonésie), sur lesquels mener *a posteriori* un ensemble d'analyses et collectes de données.

L'acquisition a été planifiée et exécutée en suivant le modèle d'observation (ensemble de protocoles d'échantillonnage et de collecte, cf. **figure 6**) en se référant au standard préconisé pour les observations scientifiques environnementales : OBOE (Madin *et al.* 2007) (**figure 11**).

Plusieurs types de données ont été collectés selon ces préconisations.

Par exemple, la classe objet d'intérêt « moustique du genre *Aedes* » est représentée par un échantillon d'individus de moustique [c'est-à-dire un jeu d'instances], sur chacun desquels sont effectuées, selon les protocoles et standards établis, capture, observations et mesures : date de la capture [jour/mois/année/heure/minute] ; géo-référencement

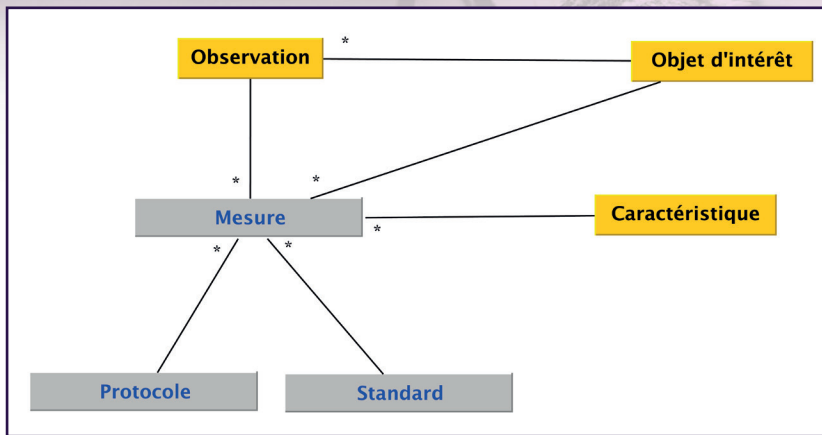


figure 11 : Standard OBOE pour les observations scientifiques environnementales.

du point de capture par mesure GPS [latitude et longitude selon le référentiel WGS84] ; mode de capture et donc stade [larve, adulte] capturé ; nom de genre *Aedes* [travail d'entomologie, se référant aux caractéristiques morphologiques, à la description du genre et à la systématique de cette famille d'insectes] ; identification de l'espèce *A. aegypti* ou *A. albopictus* et sous-espèces (populations) [test effectué sur le stade femelle, par génotypage (PCR avec amorces spécifiques, séquençage et comparaison à des séquences références)] ; présence ou absence et typage de souche virale [test effectué sur stade femelle par analyse moléculaire (PCR avec amorces spécifiques, séquençage et comparaison à séquences références)].

L'objet d'intérêt « zone d'étude », dans ses caractéristiques environnementales au sens large et spatiales, a été renseigné à la fois par des observations de terrain et via des images aériennes au sens large (de la photographie aérienne à l'image satellitaire ; ici, une source Google Earth).

(d) Modèle de simulation

A partir des étapes de modélisation de la propagation du virus décrits précédemment (figure 10), les principaux aspects relatifs à la dynamique d'émergence et de propagation du Chikungunya ont été pris en compte pour construire un modèle multi-agents. Ce modèle a été développé sur la plateforme Netlogo. Ce logiciel permet de réaliser via le paradigme multi-agents des simulations de systèmes complexes où l'hétérogénéité d'une population, les interactions locales et les interactions adaptatives sont prises en compte pour décrire le système (Thièle et al., 2011). Dans notre cas, Netlogo offre la possibilité de générer des simulations numériques de la dynamique vectorielle du virus en fonction des paramètres décrits dans la formalisation UML (figures 2, 3 et 10). L'approche multi-agents est bien adaptée au problème traité à différentes échelles environnementales. En effet les données éthologiques des vecteurs et réservoirs (moustiques, hommes, ...), les informations relatives au virus, à la zone géographique étudiée, les aspects socio-écologiques... ont été intégrés dans ce modèle.

A partir d'un langage de scripts propre à Netlogo, il est possible de définir des agents (virus, humains, larves, animaux, milieux...) vus comme des entités ayant leurs règles de fonctionnement propre. Les relations existantes entre ces objets (figure 10) obéissent aussi à des règles que l'utilisateur peut définir. Ces règles peuvent prendre la forme de lois de probabilités ou de règles déterministes.

Par exemple, elles sont ici implémentées :

- pour la composition de la population initiale de l'agent moustique (son aire d'extension, son espèce ou sous-espèce (population), le statut infecté [oui, non] au temps origine),

- pour les aspects biologiques de la vection (les modalités de déplacement du moustique, les règles de contamination et de transmission du virus par le moustique, la durée de vie du moustique, le nombre de repas sanguins...).

- ou encore pour la composante épidémiologique. Cette composante, complexe, nécessite d'analyser en détail la progression réelle de la maladie dans les zones étudiées afin d'apporter au modèle les éléments d'entraînement nécessaires. Ceci est réalisé à partir d'enquêtes de terrain, d'entretiens avec les habitants et de relevés topographiques précis. L'objectif est de recréer la dynamique réelle à partir du cas index (le patient zéro ou premier cas de l'épidémie), des dates et localisation GPS des cas suivants mais aussi en prenant en compte la topographie du lieu, la localisation exacte des habitations et des points d'eau et conteneurs, localisation des jardins et des rues, la démographie, les activités sociales et professionnelles déplacements, les lieux d'infection potentiels, les « souvenirs » de piqûres (la piqûre d'un moustique exogène induit en général une réaction plus violente que celles des populations locales), localisation des personnes virémiques, etc. Toutes ces données seront entrées dans le modèle pour ensuite recréer par simulation la dynamique qui a été observée sur le terrain (phase d'entraînement du modèle).

La plateforme Netlogo autorise également la prise en compte de données géomatiques (figure 12).

Différentes métriques ou variables de contrôle sont introduites afin de suivre au cours du temps l'évolution de l'épidémie : (nombre et localisation des humains infectés, nombres de moustiques infectés...). Par exemple, deux scénarii sont présentés en figure 12 et figure 13, sur deux zones d'études : l'une rurale et la seconde périurbaine. Ces scénarii ont été réalisés après avoir entraîné le modèle en recréant la dynamique réellement observée. Sous leurs aspects socio-écologiques et géographiques, ces zones réelles de 4 km² ont été modélisées sur la plateforme de simulation. Par exemple, en introduisant de manière aléatoire un nombre N de moustiques infectés

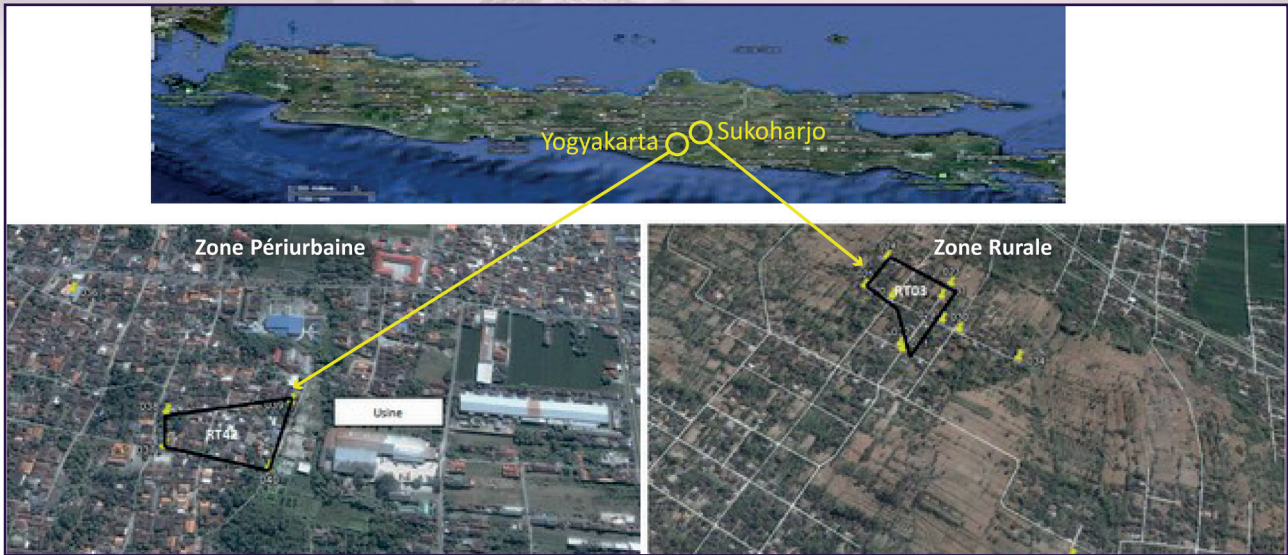


figure 12 : Simulation Netlogo, localisation géographique des sites étudiés.

exogènes, la simulation montre que le nombre de personnes infectées est significativement supérieur pour un environnement périurbain.

Les nombreuses simulations ont aidé à déterminer les variables pertinentes et leurs valeurs critiques intervenant dans la modélisation de la propagation de l'épidémie, puis ont permis de comparer ces résultats aux données observées sur le terrain. Il a été également possible de simuler l'impact de la politique de lutte contre les réservoirs de moustiques sur l'intensité de l'épidémie.

Le virus n'est pas présent de façon permanente dans la région d'étude. Contrairement au virus de la dengue, la transmission verticale du virus du chikungunya n'a jamais été démontrée et en conséquence toute nouvelle épidémie de chikungunya apparaissant après la période de virémie du dernier cas humain chronologique résulte d'une nouvelle introduction. A l'issue de cette période de virémie estimée à un maximum d'un mois, les individus sont immunologiquement protégés et résistants. L'allure sporadique et migrante constatée des épidémies résulte de ce processus d'introduction répétée du virus et de résistance acquise. Cette introduction peut prendre plusieurs formes. Un moustique exogène peut être introduit passivement dans la zone et piquer des hommes ; puis une population locale de moustiques peut acquérir et diffuser le virus. Cette introduction du virus peut également se faire par contamination d'humains à l'extérieur de la zone comme cela a pu être établi pour une des zones rurales que nous avons étudiées. Nous avons pu observer que le nombre de moustiques infectés présents dans les zones étudiées doit dépasser un seuil pour que l'épidémie démarre. Il est intéressant de noter que le seuil de déclenchement de l'épidémie était supérieur en zone périurbaine. Ceci suggère que la densité de population humaine est moins importante pour le déclenchement de l'épidémie que les conditions d'habitat optimales des moustiques et donc de densité de population de moustiques. En zone rurale, la plus faible densité de population humaine est compensée par l'augmentation du nombre de gîtes

pour les moustiques. Nous avons également retrouvé les impacts attendus des différentes stratégies de lutte en fonction des territoires.

Des solutions concrètes peuvent être envisagées au regard de cette étude. En effet, il apparaît de façon très claire que l'absence de prise en charge de la maladie par le système de santé peut être vue comme un facteur aggravant de l'épidémie. Cette absence de prise en charge est due au fait qu'elle est considérée comme non-prioritaire, car non-mortelle, par les autorités de santé. Les patients virémiques sont directement renvoyés chez eux et peuvent donc transmettre le virus. Par ailleurs, nous avons pu établir une dynamique d'importation de moustiques liée à la présence, à proximité des zones d'études, d'usines de meubles et de vêtements impliquées dans l'importation et la transformation de bois et de textiles. Ces fabriques sont donc en lien avec une circulation intense de conteneurs. Ces usines sont aussi des zones d'échange de personnes qui favorisent la venue de personnes infectées dans les zones étudiées. Une partie des habitants travaillent dans ces usines comme ouvriers ou, en zone rurale, vendent des produits alimentaires, plats préparés, fruits et légumes, aux employés des usines et se trouvent donc à proximité des zones de transit des conteneurs pendant la période d'activité des moustiques *Aedes* qui sont diurnes. Dans le cas des objets en bois, un flux intense de conteneurs existe entre Sukoharjo, Bali, l'ouest de Kalimantan (Bornéo) et le nord des Sulawesi (Manado) qui sont tous des points majeurs de prévalence du Chikungunya. Ce flux intense est à même d'apporter un nombre suffisant de moustiques infectés. Les personnes infectées peuvent ensuite rapporter le virus au village où des populations locales de moustiques peuvent prendre le relai de transmission. La situation décrite ici est celle correspondant au cas index dans le RT03 de Sukoharjo, telle que montrée par l'enquête épidémiologique. Des mesures ciblées peuvent donc être envisagées pour maîtriser l'épidémie à partir de ces outils de simulation mais à condition 1) de limiter l'étude, la simulation et l'application au niveau de la communauté (village, quartier). Le système est trop complexe au-delà et un pays ou une province n'est autre, de ce point de vue,

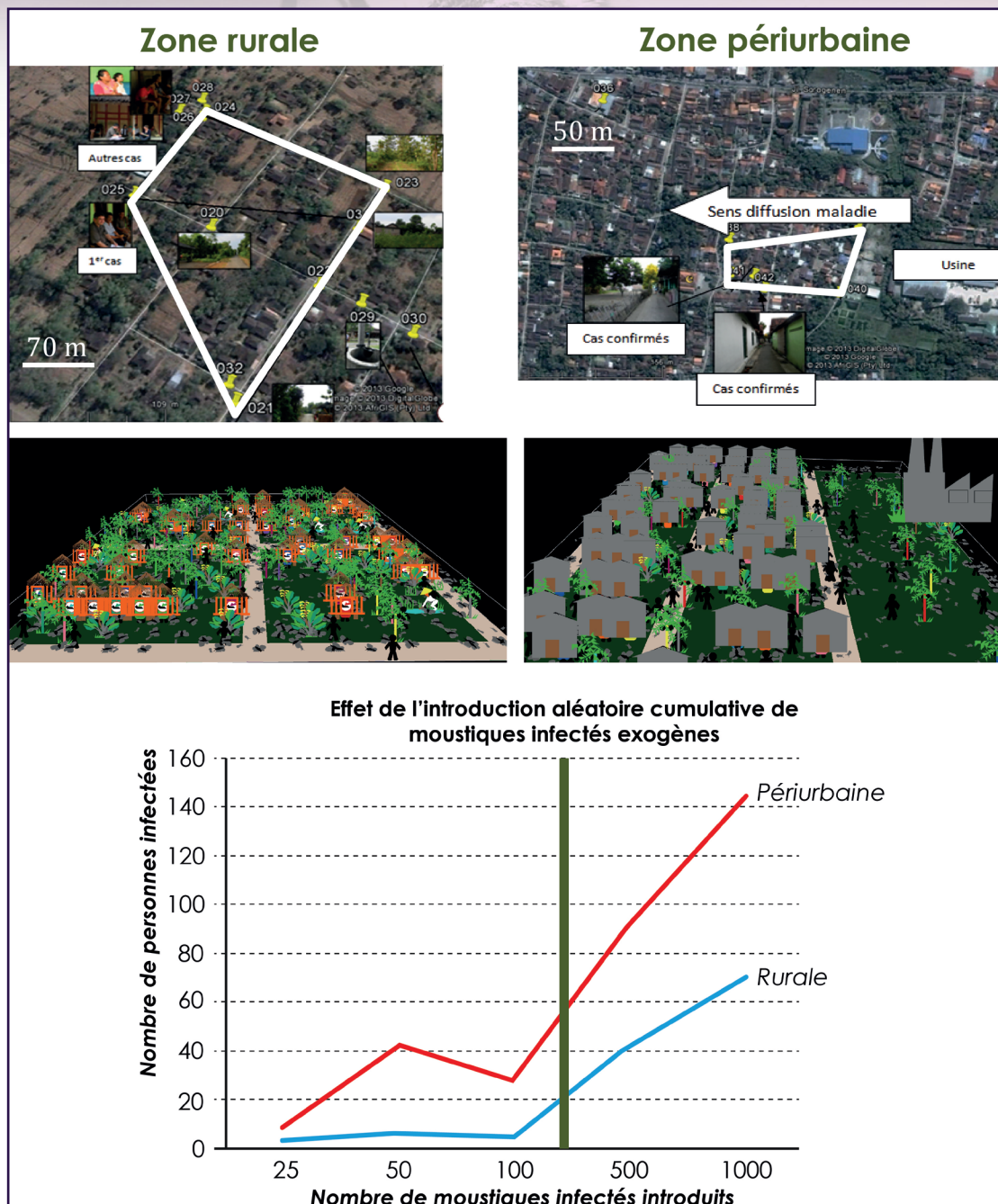


figure 13 : Simulation Netlogo, interface et exemple de résultats en zone rurale et urbaine.

qu'une somme de communautés. Le changement d'échelle peut se faire ensuite. La communauté est également le niveau auquel toute application de directives ou recommandations se fera. 2) d'impliquer les différents acteurs de la société ce qui là aussi est beaucoup plus réaliste au niveau de la communauté.

Conclusion et perspectives

La proposition que nous venons de développer et de partiellement illustrer ici s'appuie sur une réflexion déjà existante en sciences environnementales et gestion de territoire.

Notre intérêt porte tout particulièrement sur la généralité, elle-même parfois rendue difficile par la

nature fortement interdisciplinaire du travail mais dans le même temps condition *sine qua non* de son succès ; intégration interdisciplinaire et généralité représentent une valeur ajoutée. Un cadre générique pour le concept d'observatoire comme pour les dispositifs scientifique, technique ou institutionnel n'interdit en rien la spécialisation du modèle afin de répondre au mieux à la situation et au questionnement scientifique. La réflexion sur le lien « environnement - espace », doublée ici de celle sur le lien « environnement - santé » est en ce sens nécessaire pour passer des aspects fonctionnels aux situations de terrain et contextes géographiques qui sont les objets d'étude des observatoires. La projection spatiale des systèmes est une façon de passer de leur fonctionnement théorique à leur implémentation concrète ; réciproquement, les caractéristiques spatiales sont des composantes/facteurs (contraintes ou facilitateurs)

du fonctionnement des systèmes de type écologique ou biologique.

La généralité du contexte environnemental et de la notion d'observatoire OSAGE-S développés ci-dessus est effective pour les pathologies liées directement à l'environnement, qu'elles aient une origine biotique (maladies transmissibles) ou abiotique (contamination). La proposition semble généralisable non seulement à toute maladie humaine comportant une composante environnementale mais aussi aux maladies vétérinaires de même type. L'approche d'OSAGE-S s'inscrit pleinement dans le concept One Health. De plus, certaines maladies humaines, d'ordre physiologique, psychologique, génétique pourraient aussi être prises en compte car l'environnement sociétal y joue un rôle important. D'ailleurs certains observatoires (par exemple les ORS en France) s'intéressent d'ores et déjà à de telles maladies (maladies physiologiques et qualité de l'eau, pollutions de l'air, les maladies professionnelles, les déterminants sociaux de certaines maladies...). En tant que déclinaison du concept générique OSAGE, OSAGE-S est en capacité de s'intéresser aux questions d'environnement social. Dans ce contexte d'environnement social, les divers aspects intervenant dans la notion de bien-être (Stiglitz *et al.*, 2008), peuvent être considérés : conditions de vie matérielle, santé au sens strict, éducation, participation à la vie politique et à la gouvernance, activités individuelles, travail, rapports sociaux, insécurité économique ou physique et bien entendu l'environnement. En matière de gestion de l'espace et des territoires, la proposition OSAGE-S offre un cadre théorique et méthodologique. Il peut contribuer dans le même temps à la mise en place de réseaux d'observatoires partageant à la fois l'assise théorique et le type de dispositif technique (plateforme informatique) (Loireau *et al.*, 2014) utilisant des protocoles et des services standardisés.

Le propre d'un observatoire est avant tout d'être un dispositif à la fois pérenne et flexible, capable de

s'adapter rapidement à une nouvelle problématique. La généralité permet de mettre en place les outils et approches qui sont communs à toutes les problématiques, tout en acceptant une adaptation de l'activité d'observation au long du « cycle de vie » : l'alternance est possible entre des phases de suivi au sens strict et des phases de recherche, celle-ci permettant l'enrichissement de la connaissance et l'amélioration de l'information produite. Cette adaptabilité doit aussi permettre de répondre à l'actualité et aux nouveaux besoins ou enjeux tels que la société les perçoit ou les vit :

- le cas des maladies émergentes et de nouveaux risques potentiels est un phénomène récurrent. L'épidémie de fièvre Zika en est une nouvelle preuve si besoin était ;

- les changements de pratiques au sein des sociétés, qu'il s'agisse de modifications des conditions de vie locales ou globales comme par exemple la mondialisation des échanges, de l'économie ou le changement climatique, induisent aussi de nouveaux contextes et risques.

De plus, dans un travail encore en cours sur la gouvernance de l'observatoire, il est conçu une participation plus active des acteurs de l'aide à la décision, avec des échanges scientifiques – décideurs plus harmonisés.

Enfin, cette notion d'observatoire s'accorde bien avec, soit une approche « bottom up » qui, à partir de la vision parcellaire locale, peut servir à une vision nationale, internationale voire mondiale, soit une approche « top down », et donc à une meilleure intégration, seule réponse à la complexité des systèmes.

Références bibliographiques

- ATLAS ; Atlas de la santé et du climat.** <http://www.who.int/globalchange/publications/atals/report/fr>
- Booch G., Rumbaugh J. & Jacobson I., (2005).** *Unified Modeling Language User Guide*, The, 2nd Edition. Addison-Wesley Professional. Object Technology Series.
- Bourdillon F., (2005).** Les territoires de la santé, maillon clé de l'organisation sanitaire. *Revue française d'administration publique*, 2005/1 (n°113): 139 – 145. <http://www.cairn.info/revue-francaise-d-administration-publique-2005-1-page-139.htm>
- Charte de Mirepoix (1303).** <http://www.histoire-pour-tous.fr/dossiers/95-moyen-age/4538-les-regles-sanitaires-de-la-viande-au-moyen-age.html> ; <http://belcikowski.org/ladormeuseblogue/?p=2067>
- Combes C., (1995).** *Interactions durables: écologie et évolution du parasitisme*. Masson, Paris, 524 p.
- FNORS : Fédération Nationale des Observatoires Régionaux de Santé.** <http://www.fnors.org>
- GHO : Observatoire Mondial de la Santé.** <http://www.who.int/gho/fr/>
- Handschumacher P. et Hervouët J-P., (2004).** Des systèmes pathogènes à la santé publique : une nouvelle dimension pour la géographie de la santé tropicale. *Autrepart* (29) : 47-63.
- Le Moigne J.L., (1999).** *La modélisation des systèmes complexes*. Dunod, Paris, 1999. 177pp.
- Loireau M., Fargeffe M., Desconnets J-C., Mougouet I. et Libourel T., (2014).** Observatoire Scientifique en Appui à la Gestion du territoire (OSAGE) : entre espaces, temps, milieux, sociétés et informatique. *Actes du colloque SAGEO*, 27-29 nov 2014, 14 p.
- Madin J., Bowers S., Shildhauer M., Krivov S., Pennington D., Villa F., (2007).** An ontology for describing and synthesizing ecological observation data. *Ecological Informatics*, 2: 279-296, 2007.OMS (1946). *Actes officiels de l'Organisation mondiale de la Santé*, n°2, p.100
- OMS : Organisation Mondiale de la Santé.** <http://www.who.int/>
- One Health :** <http://www.onehealthinitiative.com/index.php>
- Peste :** <http://www.biusante.parisdescartes.fr/histmed/medica/peste.htm>
- Picheral H., (1985).** *Mots et concepts de la géographie de la santé*. Cah. Géos.2.
- Salem G., (1995).** Géographie de la santé, santé de la géographie. *Espaces, populations, sociétés*, 1995-1. La géographie de la santé en question : 25-30. doi : 10.3406/espos.1995.1667
- Salem G., (1998).** *La santé dans la ville. Géographie d'un petit espace dense : Pikine (Sénégal)*, Eds Karthala, ORSTOM.
- Thiele I., Hyduke D. R., Steeb B., Fankam G., Allen D. K., Bazzani S., ... & Bumann D., (2011).** A community effort towards a knowledge-base and mathematical model of the human pathogen *Salmonella Typhimurium* LT2. *BMC systems biology*, 5(1), 8.
- Reix R., (2002).** *Systèmes d'information et management des organisations*. In : *Faire de la recherche en Systèmes d'information*, chapitre 19, pp. 333- 349, Vuibert, 4^e édition, Paris.
- Stiglitz J.E., Sen A. & Fitoussi J.-P., (2008).** *Rapport de la Commission sur la mesure des performances économiques et du progrès social*. www.stiglitz-sen-fitoussi.fr



Latrine du village de Sei Baru en Indonésie au cours d'une enquête (octobre 2014) sur l'apparition d'une épidémie de diarrhée. Programme de formation en épidémiologie de terrain (IFETP, cliché : CDC/ Muhammad Amri Rambey, Indonesia).

