

Un méta modèle agent sur les maladies à vecteurs : Etat d'avancement

Ahmed Tidjane Cissé, Zahia Guessoum, Mamadou Sangharé, Alassane Bah

1 Introduction

La modélisation autour des maladies à vecteurs est une discipline très complexe. L'historique de cette modélisation résume un ensemble d'approches très variées qui se heurtent souvent à la difficulté d'intégrer le maximum de facteurs important dans l'évolution et la propagation de la maladie. Le fond de la problématique est qu'un tel modèle fait appel à des connaissances qui sont très distribuée et assez mal partagée. De tels modèles nécessitent, vu la complexité du système, une collaboration des différentes thématiques dans son élaboration. D'ailleurs, l'idée d'une épidémiologie intégrative a été soulevée depuis le 19ième siècle et a évolué depuis. Cependant, jusqu'à aujourd'hui la problématique reste entière.

L'approche que nous proposons résume notre vision de la « co-construction » de modèles qui s'articule sur leur modularité et sur la réutilisabilité de leurs composants. L'approche se base sur la conception et l'implémentation d'un méta modèle agent construit suivant les préceptes normalisés du « *Domain Specific Modeling (DSM)* ». Sur ce point, nous partageons la vision d'Atkinson et Kühne (2003) qui associent à un méta modèle spécifique à un domaine deux points de vu orthogonaux : le premier est sémantique et le deuxième linguistique. Le premier serait destiné aux experts du domaine modélisé et le second s'adressant au développement d'un langage de modélisation. Nous axons, dans ce document, notre propos sur cette décomposition.

2 Analyse conceptuelle des connaissances du domaine des maladies à vecteurs

2.1 Des ontologies comme première abstraction sur le domaine

Pour les maladies à vecteurs, l'intérêt de concevoir et de simuler des modèles est important pour de multiples raisons. Dans ce cadre, les questions qui sont ici posées cadrent avec l'objectif d'une approche intégrative qui s'avère pour nous essentielle. Ainsi se pose la question de la compréhension des modèles et de la réutilisabilité des composants d'un modèle. Il serait ainsi important de pouvoir organiser les concepts du domaine mais aussi de pouvoir les classer du plus générique au plus spécifiques. Tels sont les objectifs que nous nous sommes fixés à travers nos ontologies.

2.1.1 Approche de construction

L'approche de capture des connaissances part du fait que le thématicien est un observateur qui voit le système suivant sa spécialité, son expérience et les besoins qu'il a par rapport à sa thématique. Ceci définit ainsi un point de vue. Selon H. Maturana (Maturana, 1988), un point de vue est issu d'un domaine de l'expérience. Muller (Muller, 2011) dit de ce dernier qu'il identifie une catégorie de systèmes, leurs composants, leurs relations et éventuellement leurs dynamiques. Notre étude sur les différents modèles a mis en évidence un grand nombre d'approches qui reflètent une diversité de points de vu. En effet, ces modèles sont les reflets des points de vu de chaque chercheur sur le système étudié. Un axe ontologique du méta modèle devra ainsi, selon nous, dans sa définition, passer par une caractérisation de ces points de vue. Fort de ce constat, nous procédons à une étude détaillée de ces points de vue en introduisant le concept de méta point de vue.

2.1.2 Les métras point de vue

Un méta point de vue est en quelques sortes un point de vue sur les différents points de vue que les chercheurs ont du domaine. Il constitue une conceptualisation du retour que nous avons de l'ensemble des études faites sur ce domaine qui part de la maladie jusqu'aux décisions des politiques en termes d'intervention. Il revient ainsi de cette observation, deux méta points de vue qui sont en quelques sortes une vision des études et actions sur le domaine suivant leurs objectifs et les thématiques qu'elles impliquent. Ainsi, nous avons :

- le méta point de vue fonctionnel qui peut être aussi perçu comme un méta point de vue concernant les niveaux d'échelles où le niveau micro représenterait les mécanismes d'infection (maladie) et le niveau

macro la propagation dans l'espace et les interventions (épidémie). Ce méta point de vue serait surtout caractéristique des objectif d'une étude ou dans un cadre global, des fonctions d'un composant ;

- le méta point de vue thématique qui est en réalité une décomposition du système suivant les thématiques qui s'intéresse à une connaissance ou à un objet de la réalité et l'interprétation qu'ils en donnent.

2.1.3 Description des branches de nos ontologies

Notre état de l'art sur la modélisation épidémiologique nous a fait observer l'existence de deux branches fonctionnelles qui sont plus ou moins prises en compte dans les différents modèles. Ces points de vue sont liés à des objectifs de modèles et se basent sur des déterminants dans l'évolution de leur problématique. Suivant leur centre d'intérêt, ces branches identifiées sont :

- la branche concernant la description de la maladie qui, selon les définitions, se résume en quatre axes que sont les vecteurs, l'hôte, l'agent pathogène et l'environnement. Cette branche s'intéresse aux éléments primitifs du système infectieux ainsi que leurs comportements et leurs interactions ;
- la branche épidémiologique qui repose sur les déterminants d'une épidémie. Elle résume deux aspects que sont la veille épidémiologique avec la surveillance d'indices sur la population ou sur différents aspects de l'environnement et les interventions.

Nous avons pu grâce à ce travail recenser plus de 700 termes d'ontologies () et de thésaurus existant puis identifier des noeuds racines de nos concepts que sont :

- les objets de la géographie physique
- les organismes
- les processus
- les interactions
- les indicateurs

2.2 Des ontologies à l'axe sémantique du méta modèle

Notre étude sur les points de vue par les ontologies nous a permis ainsi de délimiter la structure sémantique du méta modèle. Nous avons choisit d'utiliser le protocole ODD (Grimm et al. 2006, Grimm et al., 2010) pour guider la description de ce dernier. Le protocole définit une démarche de modélisation qui débute par une description d'une vue d'ensemble du modèle (partie *Overview* du protocole). Cette description inclue

- la définition des objectifs du modèle,
- la délimitation de la structure du modèle (les éléments représentés, les niveaux de représentation, ...)

Les objectifs que nous avons pu identifier dans les modèles vont de la description de la maladie (vecteurs, hôtes, transmission,...) jusqu'aux aspects de l'épidémiologie (surveillance, intervention,...). Nous nous proposons dans cette partie de présenter notre étude sur ces deux niveaux d'objectifs.

2.2.1 Description du méta modèle de l'épidémiologie des maladies à vecteurs

La propagation du pathogène dans un milieu à grande échelle concerne surtout la branche épidémiologie qui regroupe deux aspects : la surveillance et les interventions. Nous proposons ici de redéfinir quelques termes essentiels de ce domaine suivant nos choix de modélisation.

Nous considérons que lorsque nous parlons d'épidémie, nous nous situons à un niveau d'échelle spatial assez large qui va d'une localité à un espace régional. L'espace ainsi délimité pour notre étude avec tous ces caractères descriptifs constitue le milieu d'étude.

Définition 1 :

Le milieu d'étude \mathcal{M} est un espace géographique \mathcal{E} délimité avec un ensemble d'éléments géographiquement situé \mathcal{G} positionnés à l'intérieur de cet espace et fixe durant la simulation.

$$\mathcal{M} = \langle \mathcal{E}, \mathcal{G} \rangle$$

Le milieu d'étude définit l'espace observé pendant la simulation. La délimitation de ce milieu définit un niveau d'échelle spatial où évoluent dans le temps et dans l'espace un ensemble d'éléments mesurable sous formes d'indicateur. La surveillance de ces indicateurs constitue un premier objet de l'épidémiologie. Ceci nous permet de proposer une première définition de ce terme.

Définition 2 :

L'épidémiologie observe l'évolution d'un phénomène étant ou traduisant une épidémie ou un risque au niveau d'un milieu d'étude.

La surveillance permet de définir une cartographie de zones à risques et un système d'alerte face à un risque dont l'aléa est mesuré par un indicateur. Concernant ces indicateurs, nous en définissons deux types :

- l'indicateur spatial \mathbf{Is} pour un milieu d'étude qui associe, à chaque instant \mathbf{t} de la simulation, à tout point de coordonnées spatiales (\mathbf{i}, \mathbf{j}) une valeur $\mathbf{Is}_{i,j}$, avec $(\mathbf{i}, \mathbf{j}) \in \mathcal{E}$ qui traduit un caractère du système qui est local au point. $\mathbf{Is}(\mathbf{t}) = (\mathbf{Is}_{i,j}, (\mathbf{i}, \mathbf{j}) \in \mathcal{E}(\mathbf{t}))$
- l'indicateur global \mathbf{Ig} associe au système à chaque instant \mathbf{t} une valeur qui traduit un caractère global du système.

L'indicateur au cours de la simulation prend des valeurs déduites de celles que prennent des attributs d'entités du système à chaque instant par le biais de calcul.

L'évolution de ces indicateurs est d'une importance particulière en épidémiologie et leur surveillance se fait afin de détecter des phénomènes qui sont définis par des conditions limites sur un indicateur.

Définition 3

Un phénomène est ainsi un événement spatialisé ou global du système dont l'existence est liée à un indicateur par une condition limite. Une condition limite Cl est défini par deux réels a, b tels que $a < b$. Ainsi, suivant l'indicateur, un phénomène est

- spatial si celui-ci est de type spatial d'indicateur \mathbf{Is}
il est égal dans ce cas à $Ps(\mathbf{t}) = \{(i,j) \in \mathcal{E} / a \leq \mathbf{Is}_{i,j}(\mathbf{t}) \leq b\}$ si $Ps(\mathbf{t}) \neq \emptyset$,
il n'existe pas sinon ;
- global si le phénomène est global d'indicateur \mathbf{Ig}
il existe si $a \leq \mathbf{Ig} \leq b$,
il n'existe pas sinon.

Pour l'environnement, les entités desquelles les valeurs des indicateurs sont déduites sont des objets et des variables spatiales. Nous définissons ainsi l'environnement comme un couple <physics, weather> où :

- physics est constitué d'objets situés avec une forme qui peut être de type polygone, ligne, point ..., d'un ensemble d'attributs mais aussi d'un comportement lié à son entourage et à ses attributs,
- weather constitué d'un ensemble de variables spatiales qui sont des informations réparties de manière uniforme ou non dans l'espace et associant, pour chaque variable et pour chaque point, une valeur.

Définition 4 : Une variable spatiale est une information, concernant tout le milieu étudié, découpée en une grille où on associe à chaque cellule de la grille une valeur

1. Description du méta modèle de la transmission des maladies à vecteurs.

Dans une échelle plus réduite, il y'a la maladie. Nous l'avons définie dans nos ontologies comme étant la combinaison de quatre éléments que sont le vecteur, l'hôte, le pathogène et l'environnement. Cependant, nous pensons que l'environnement est lié à la maladie que par l'influence qu'il a sur les dynamiques des trois autres entités de la définition. Nous la dissociions de cette définition afin de nous consacrer largement à cette influence.

Définition 5:

Une maladie à vecteurs est une maladie dû à un pathogène qui, pour un organisme considéré comme un hôte, la transmission se fait par l'intermédiaire d'un autre organisme considéré comme un vecteur.

Cette définition réduit contrairement à nos ontologies les termes "vecteurs" et "hôtes" à des considérations qui dépendent du modélisateur. Cependant ils sont liés car partageant la capacité concernant ces organismes d'abriter l'agent responsable de la maladie. D'ailleurs, l'agent pathogène responsable de la maladie détermine la maladie en fonction de l'organisme. Il existe ainsi une relation "infection" qui traduit la présence du pathogène dans l'organisme.

Une infection est ainsi la conséquence possible d'une transmission d'un agent pathogène d'un organisme vers un autre.

Définition 6 :

Une infection est un processus qui est déclenché par une transmission et qui est constitué d'un ensemble d'états infectieux dans un ordre fixe qui peut s'arrêter par une mort, une résistance ou une guérison simple.

L'infection traduit un état de l'organisme porteur de pathogène avec des sous états qui sont ici appelés états infectieux. En dehors de ceux-ci, il existe deux autres états possibles que sont les états "susceptible" et "résistant". Tous ces états sont dits pathologiques et sont soit de type sain ou des sous états de l'état infecté.

Les organismes, hôtes ou vecteurs, dans leur vie peuvent ainsi passer d'un état sain à un état infecté et vice versa suivant respectivement une transmission et une guérison.

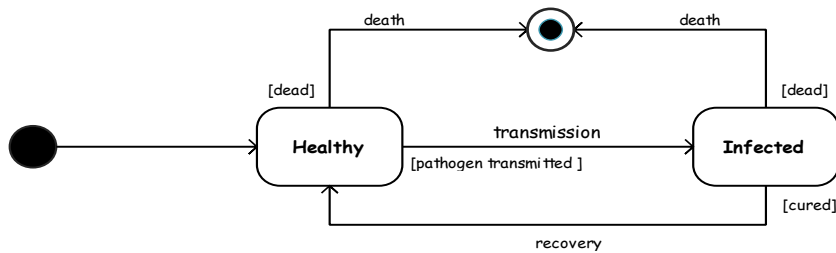


Figure 1 : Transitions et états pathologiques

Définition 7 :

Un état infectieux est un sous état d'une infection. Il est caractérisé par

- *son infectiosité qui est la capacité (probabilité) de l'organisme à transmettre le pathogène au cours d'une interaction à risque*
- *sa mortalité qui est la probabilité par pas de temps de décès de l'organisme dans cet état*
- *sa durée*
- *les facteurs de guérison qui sont un ensemble de probabilités exprimant respectivement*
 - *la probabilité de guérison naturelle,*
 - *la probabilité de guérison face à un événement interne ou externe (traitement médical, ...).*

L'infection vue comme processus est initialisée par une transmission au premier état infectieux suivant certaines conditions.

Les deux aspects soulignés que sont l'épidémiologie et la maladie sont de niveaux d'échelles différents mais sont liés. Nous avons vu que dans la partie épidémiologie, ce qui est proposé est axé sur la surveillance d'indicateur qui comme nous l'avons dit font l'état d'aléas de manière locale ou globale parmi ceux-ci nous pouvons citer la circulation virale qui est l'objet même de l'épidémiologie. Ainsi nous donnons une deuxième définition de l'épidémiologie.

Définition 8

L'épidémiologie d'une maladie à vecteur étudie la circulation du pathogène à travers les cas et les facteurs causant.

Cette définition parle de circulation pathogène donc de la transmission et de ce fait, des éléments que sont l'hôte et le vecteur. Le terme circulation de pathogène traduit une interaction individuelle que nous considérons situées à un niveau micro alors que l'épidémie traduit un facteur à un niveau d'échelle macro. Dans la première partie, nous parlons de phénomènes et d'indicateurs, ici nous parlons de la circulation, des cas et de facteurs causant. Le lien entre ces termes est qu'une forte circulation du pathogène est un phénomène qui s'exprime en termes d'indicateur par le nombre de cas recensé, leur répartition, le facteur R_0 ... Nous voyons que l'indicateur évalue les caractères individuels pour les transparaître à un niveau global. L'indicateur est ainsi un pont entre deux niveaux d'échelles.

En outre, nous constatons que l'organisme présente un rôle central. Ce dernier a une dynamique suivant ses dépendances à l'environnement. Cette dépendance est décrite suivant deux éléments :

- les ressources à travers leur utilisation dans différents comportements,
- les paramètres environnementaux qui déterminent la condition de vie d'un organisme dans un état donné, mais aussi peuvent contraindre un comportement.

L'organisme est ainsi une entité active qui évolue suivant une ou plusieurs dynamiques.

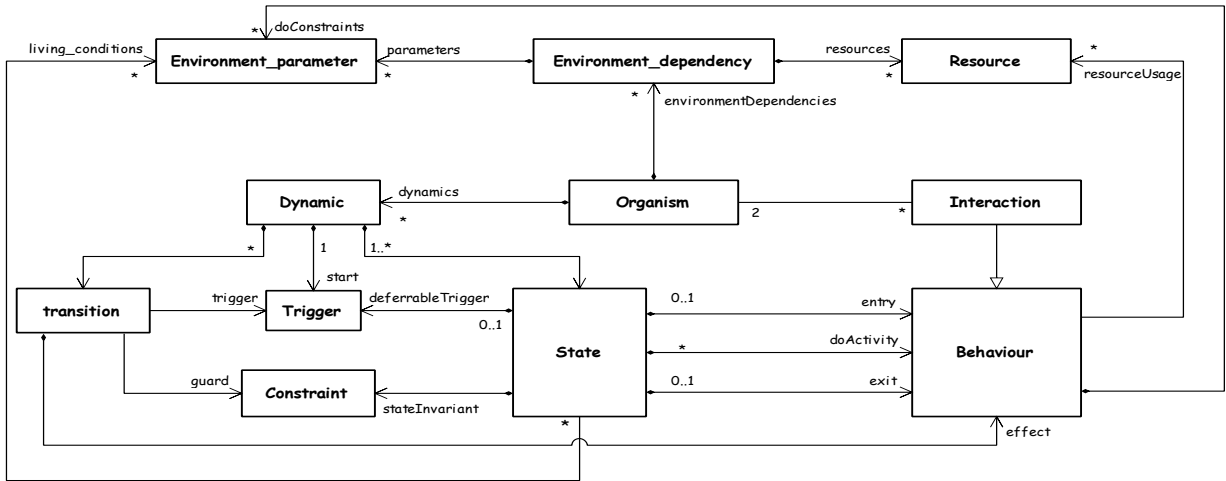


Figure 2 : méta modèle d'Organisme

La particularité des maladies à vecteurs est la spécification d'un ou de plusieurs organismes en vecteurs et d'autres en hôtes. Le processus de modélisation d'une maladie à vecteurs inclut nécessairement ces deux spécifications qui caractérisent de telles maladies (Figure 3). Ceci s'accompagne nécessairement de la définition d'une dynamique, respectivement pour les organismes hôtes et les organismes vecteurs, dénommée "*pathological_process*" mais aussi, concernant les organismes de vecteurs, d'un comportement de type interaction "*interactionAtRisk*". Ce comportement définit une interaction entre un organisme vecteur et un organisme hôte susceptible d'engendrer une transmission. Représentation de l'environnement : vers un SIG dynamique

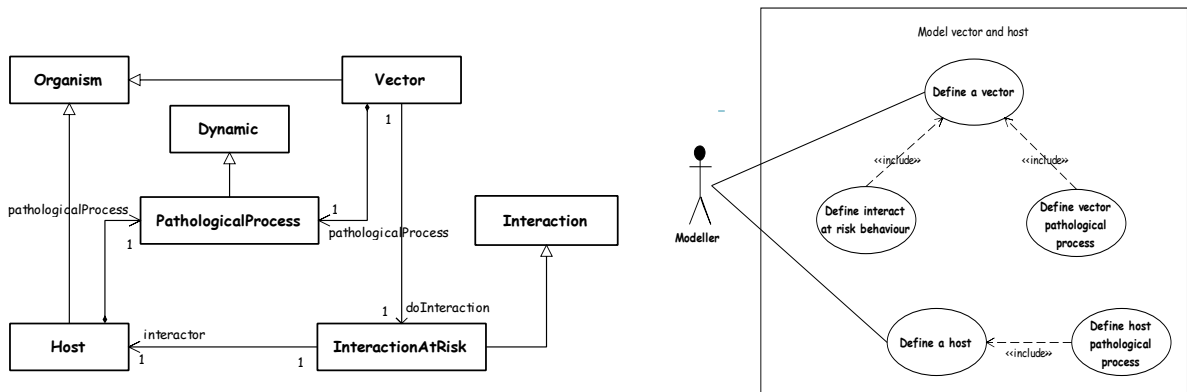


Figure 3 : contrainte de la définition d'un processus pathologique

Du point de vue de l'agent, le rapport avec l'environnement est d'abord défini par sa perception et son action. En effet, dans un système d'agents situés, les actions de l'agent sont conditionnées par son contexte : on parle ainsi, d'après L. Suchman (1987), d'une action située. Le contexte de l'agent est donc pris comme un ensemble d'informations qui résultent de la perception de l'agent et qui influencent son action. La gestion de ce contexte est de plus en plus attribuée à l'environnement dont le rôle a longtemps été restreint au transport d'information.

Nous partageons ce point de vue et prenons le choix de définir l'environnement comme une abstraction de premier ordre (Weyns et al, 2007).

La représentation de l'environnement de nos systèmes devrait ainsi se préoccuper de nos objectifs de modélisation dont le plus important est l'intégration des points de vue thématiques en mettant l'accent sur la géographie de la zone d'étude.

2.3 Un modèle multicouches pour représenter l'environnement

La problématique multi thématique autour des systèmes impose, comme nous le disions, de prendre en compte des contraintes qui sont liées à l'intégration des points de vue qui ne sont pas exprimés de la même manière et qui ne sont pas de même échelle spatiale et temporelle. La perception par une entité interne au système de ce système doit être régie par la nature de cette entité, sa position dans le système et de la perceptibilité de cette même information.

Une couche est une forme d'organisation de l'information dynamique constituée de :

- un modèle où la dynamique de cette couche est définie par un ensemble fini d'états,
- une échelle spatio-temporelle,
- une interface d'échange avec les agents et d'autres couches de l'environnement.

La structure d'une couche est très liée à la présentation de l'information gérée. Ainsi, on distingue deux types de présentation :

- une présentation continue où à chaque point de l'espace nous associons une valeur. Ici les informations traitées sont de type variable spatiale,
- une présentation discrète où nous avons un ensemble d'objets avec un ensemble d'attributs qui sont dotés chacun d'une dynamique.

Dans une présentation discrète d'une couche, il est nécessaire d'avoir pour chaque objet la même structure (des attributs, des entrées et des sorties similaires). Ceci, pour que l'interfaçage de ces objets et du reste du système soit plus commode. Ces objets sont donc des instances d'un même classificateur.

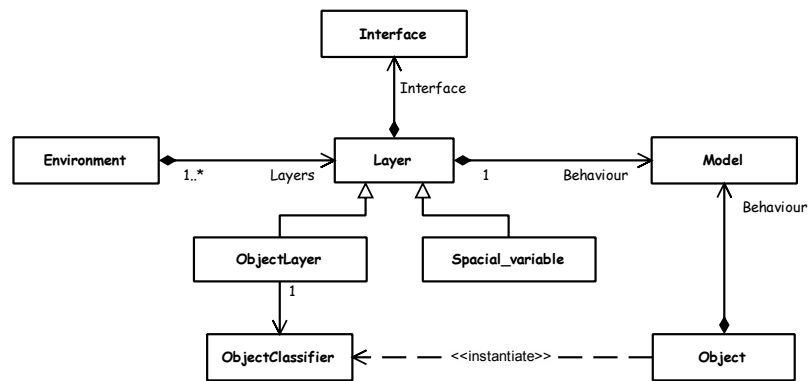


Figure 4 : Spécifications d'une couche

Nous faisons aussi le choix de séparer la dynamique de la couche de ses échanges avec le reste du système. En effet, les informations du modèle sont accessibles via une interface qui collecte les informations du reste du système et qui répond aux requêtes de ces mêmes entités suivant les contraintes définies pour l'accès à ces informations.

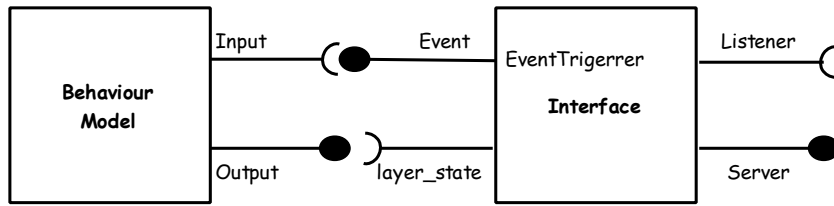


Figure 5 : composants d'une couche

Cette séparation nous offre en perspective la possibilité d'intégrer des échelles spatiales et temporelles différents par une gestion efficace du contexte des agents par le biais des interfaces.

2.4 Architecture

L'interface : Choix d'un artéfact

Pour implémenter cette interface notre choix est porté sur des artefacts. Le rôle de cette interface n'est pas juste de distribuer une information, mais il est d'être médiateur entre une source d'information et un demandeur d'information (gestion des autorisations, information transmise en fonction de l'agent et de sa position).

L'information gérée par une couche a une structure interne, mais sa présentation doit être indépendante de la couche et uniforme quelque soit le demandeur. Aussi, la disponibilité de cette dernière doit être garantie en prenant en compte de manière continue les changements. Ainsi, l'artéfact définit un canal pour un demandeur qui est une donnée partagée entre un demandeur (qui demande en continue) et lui-même. Cette donnée est ainsi un tuple inspirés de TuCSon (Cabri, Leonardi and Zambonelli ; 2002) stocké et géré par l'artéfact et partagé ici exclusivement par l'artéfact et le demandeur.

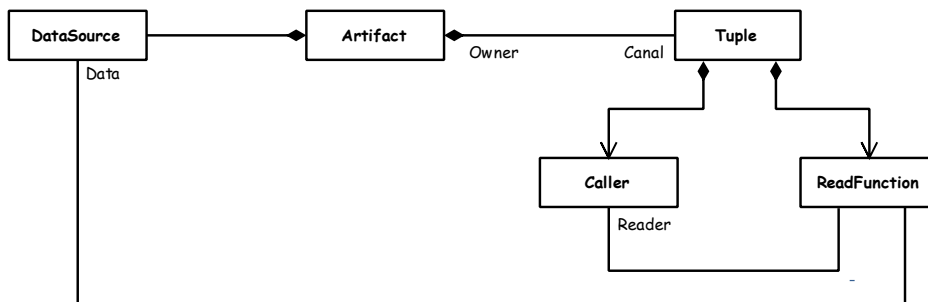


Figure 6 : la partie "server" du métamodèle de l'interface

Aussi, par le biais de l'artéfact, une couche perçoit le reste de son environnement grâce à des capteurs. Il peut ainsi au besoin déclenché un événement au modèle pour que ce dernier puisse modifier l'état de la couche.

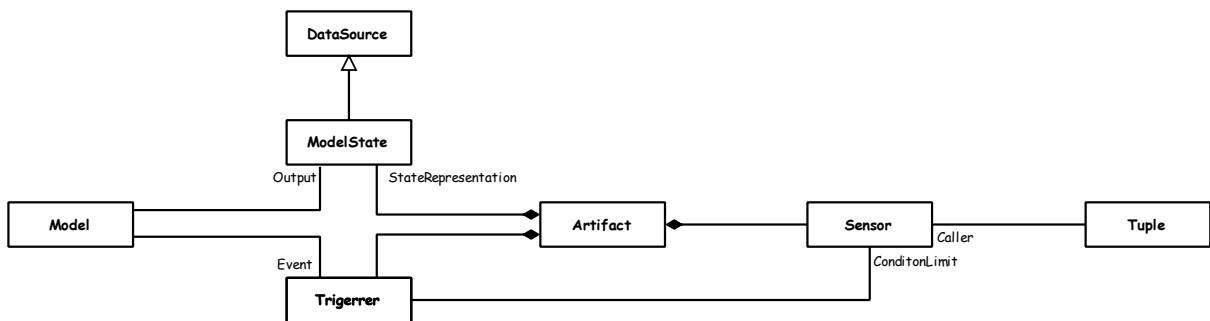


Figure 7 : la partie "listener" du métamodèle de l'interface

3 Conclusion

Dans la perspective d'un méta modèle agent sur les maladies à vecteurs, nous avons pu finaliser la description l'axe sémantique du modèle et avons bien avancé dans la description du formalisme. Sur ce dernier axe, nous nous sommes inspirés de l'existant pour proposer des concepts qui selon nous apporteraient beaucoup dans la perspective d'une multi modélisation et qui se fixe pour défi de relever certaines carences de formalisme comme DEVS (Ziegler, 1988)

Il s'agit ainsi de compléter cette description puis d'implémenter notre plateforme de simulation. Nous nous sommes confrontés, dans ce travail, à plusieurs défis que nous essayons de relever. Nous sommes, par le biais de la représentation de l'environnement, entraînés de mettre en œuvre des moyens de répondre à certaines questions de la modélisation multidisciplinaire mais à aussi à certaines de la modélisation multi-échelles. Nous les confirmerons à travers de cas réels implémentés durant la dernière partie du travail.

4 Références

- Concepcion, A.I., and B.P. Zeigler. "DEVS Formalism: a Framework for Hierarchical Model Development." *IEEE Transactions on Software Engineering* 14, no. 2 (February 1988): 228–241. doi:10.1109/32.4640.
- Grimm, Volker, Uta Berger, Finn Bastiansen, Sigrunn Eliassen, Vincent Ginot, Jarl Giske, John Goss-Custard, et al. "A Standard Protocol for Describing Individual-based and Agent-based Models." *Ecological Modelling* 198, no. 1–2 (September 15, 2006): 115–126. doi:10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023.
- Grimm, Volker, Uta Berger, Donald L. DeAngelis, J. Gary Polhill, Jarl Giske, and Steven F. Railsback. "The ODD Protocol: A Review and First Update." *Ecological Modelling* 221, no. 23 (November 24, 2010): 2760–2768. doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019.
- Guégan, Jean-François, and Marc Choisy. *Introduction à l'épidémiologie intégrative*. De Boeck Supérieur, 2008.
- Lawson, D., P. Arensburger, P. Atkinson, N. J. Besansky, R. V. Bruggner, R. Butler, K. S. Campbell, et al. "VectorBase: a Data Resource for Invertebrate Vector Genomics." *Nucleic Acids Research* 37, no. Database (January 1, 2009): D583–D587. doi:10.1093/nar/gkn857.
- Müller, Jean-Pierre. "Towards a Formal Semantics of Event-Based Multi-agent Simulations." In *Multi-Agent-Based Simulation IX*, edited by Nuno David and Jaime Simão Sichman, 110–126. Lecture Notes in Computer Science 5269. Springer Berlin Heidelberg, 2009. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-01991-3_9.
- OMG. "UML, OMG. 2.4. 1 Superstructure Specification. Document Formal/2011-08-06. Technical Report," February 7, 2013. <http://www.omg.org/spec/UML/2.4/>.
- Omicini, Andrea, Alessandro Ricci, and Mirko Viroli. "Artifacts in the A&A Meta-model for Multi-agent Systems." *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 17, no. 3 (December 1, 2008): 432–456. doi:10.1007/s10458-008-9053-x.
- Rivière, Myriam, and Rose Dieng. "Introduction of Viewpoints in Conceptual Graph Formalism." In *Conceptual Structures: Fulfilling Peirce's Dream*, edited by Dickson Lukose, Harry Delugach, Mary Keeler, Leroy Searle, and John Sowa, 168–182. Lecture Notes in Computer Science 1257. Springer Berlin Heidelberg, 1997. <http://link.springer.com/chapter/10.1007/BFb0027869>.
- Rivière, Myriam, and Rose Dieng-Kuntz. "A Viewpoint Model for Cooperative Building of an Ontology." In *Conceptual Structures: Integration and Interfaces*, edited by Uta Priss, Dan Corbett, and Galia Angelova, 220–234. Lecture Notes in Computer Science 2393. Springer Berlin Heidelberg, 2002. http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-45483-7_17.
- Topalis, Pantelis, Elvira Mitra, Ioana Bujila, Elena Deligianni, Emmanuel Dialynas, Inga Siden-Kiamos, Marita Troye-Blomberg, and Christos Louis. "IDOMAL: An Ontology for Malaria." *Malaria Journal* 9, no. 1 (August 10, 2010): 230. doi:10.1186/1475-2875-9-230.
- Treuil, Jean-Pierre, Alexis Drogoul, and Jean-Daniel Zucker. *Modélisation et simulation à base d'agents: Exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Dunod, 2008.
- "UNESCO THESAURUS," December 3, 2012. <http://databases.unesco.org/thesaurus/>.
- Weyns, Danny, Andrea Omicini, and James Odell. "Environment as a First Class Abstraction in Multiagent Systems." *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 14, no. 1 (February 1, 2007): 5–30. doi:10.1007/s10458-006-0012-0.
- Wooldridge, Michael, Nicholas R. Jennings, and David Kinny. "The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design." *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 3, no. 3 (September 1, 2000): 285–312. doi:10.1023/A:1010071910869.
- . "The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design." *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 3, no. 3 (September 1, 2000): 285–312. doi:10.1023/A:1010071910869.

ZEIGLER, BERNARD P. AUTHOR, Herbert Praehofer, and Tag Gon Kim. *Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*. Academic Press, 2000.