

Projet SavSim : intégration d'un moteur de simulation
multi-agent dédié à l'épidémiologie dans un SIG et
application à deux maladies endémiques

Edouard Amouroux

Master IAD, agents adaptatifs, Université Pierre et Marie Curie,
Paris

Encadrants :

Alexis Drogoul, UR GeodesIRD (Hanoi)

Marc Souris, UR 178, IRD (Bangkok)

1er Septembre 2006

Résumé

Le stage présenté ici a été réalisé au sein de l'IRD (Bondy, Bangkok et Hanoi) sur un sujet de modélisation épidémiologique individu-centrée. Après une brève description des modèles mathématiques existants, qui permettra de mettre en exergue l'originalité des développements envisagés, nous présenterons le travail réalisé. Celui-ci comporte trois axes principaux

- Un important travail de recueil de données et d'extraction de connaissances sur une maladie à vecteur (la dengue), suivi par une modélisation de ces données sous une forme multi-agent.

- La conception d'un langage de description de ces agents et de leurs comportements permettant à la fois de formaliser les connaissances des thématiciens et de totalement paramétrer les simulations envisagées.

- Le développement logiciel complet d'un noyau de simulation multi-agent interfacé avec un système d'information géographique (SIG) et capable d'exécuter les simulation décrites dans le langage ci-dessus.

Nous terminerons par un bilan et une évaluation de ce qui a été mené à bien pendant la période du stage et par un exposé des perspectives de ce travail.

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Originalité du projet	3
1.2	Objectif de recherche	3
2	Etat de l'art	4
2.1	Modèles mathématiques	4
2.2	Modèles agents	5
3	Présentation du travail réalisé	5
3.1	Système multi-agent	6
3.1.1	Système d'information géographique : SavGIS	6
3.1.2	SavSim	6
3.1.3	Diagramme de classes	9
3.1.4	Diagramme de séquence	10
3.1.5	Configuration de la simulation et formalisation des comportements	11
3.2	Recueil de données	14
3.3	Modèle de l' <i>aedes aegypti</i>	14
3.3.1	Modèle général de l' <i>aedes aegypti</i>	15
3.3.2	Modèle de l' <i>aedes aegypti</i> femelle	16
4	Evaluation critique	17
4.1	Système multi-agent	17
4.1.1	Noyau	17
4.1.2	Environnement et classes	17
4.2	Interfaçage avec SavGIS	17
4.3	Formalisation de la description des comportements	18
4.4	Modélisation	18
5	Conclusion	18
5.1	Bilan	18
5.2	Travaux futurs	19
5.3	Perspectives	19
6	Annexes	21
6.1	Glossaire	21
6.2	Diagramme détaillé des classes environnementales	23
6.3	Questionnaire <i>aedes aegypti</i>	24
6.4	Code XML AEDES	35

1 Introduction

Ce stage s'est déroulé en deux parties, la première à Bondy encadrée par M. Alexis Drogoul, et la seconde à Bangkok par M. Marc Souris, tous les deux directeurs de recherches à l'IRD. L'objectif de ce stage était de réaliser un système multi-agent s'interfaçant avec un système d'information géographique pour la simulation épidémiologique. Il s'agissait en particulier de simuler la propagation de maladies à vecteurs telles que la trypanosomiase et la dengue. La modélisation concernant la trypanosomiase a été traitée par Guy Mbatchou, Université de Yaoundé 1, au Cameroun. J'ai étudié la dengue en de la Thaïlande, plus précisément la région de Bangkok en collaboration avec Mr Souris et un entomologiste en poste sur place.

La trypanosomiase [8][9] est une maladie parasitaire endémique en Afrique et en Amérique du sud. La forme africaine est plus connue sous le nom de "Maladie du sommeil". Cette maladie a pour vecteur la glossine, ou "Tsé-Tsé", et pour premiers symptômes des douleurs articulaires et des fièvres. Ensuite le système nerveux central est touché, des troubles sensoriels et de la coordination apparaissent. Sans traitement l'issue est toujours fatale. En 2004 17.420 personnes étaient infectées.

La dengue [8][9] est une infection virale endémique dans les pays tropicaux et résurgente en Amérique du sud. Il existe quatre sérotypes de cette maladie ne présentant pas d'immunité croisée. Cette maladie a pour vecteur le moustique *aedes aegypti* (et rarement *aedes albopictus*). Selon l'OMS, chaque année entre 50 et 100 millions de personnes sont affectées, 200.000 à 500.000 souffrent de la forme hémorragique qui entraînent la mort de 20 000 personnes par an.

1.1 Originalité du projet

Ce projet de simulation épidémiologique comporte plusieurs originalités comparé aux méthodes existantes. Tout d'abord, l'utilisation d'un système multi-agent pour la modélisation et la simulation en lieu et place des modèles mathématiques. Deuxièmement, la collaboration avec un système d'information géographique pour le stockage des données localisées permet une plus grande précision et ainsi un plus grand réalisme de l'environnement étudié. Troisièmement, ce projet a pour vocation de développer un logiciel ne requérant que peu l'intervention d'un informaticien afin que les spécialistes du domaine puissent l'utiliser de façon autonome : il a été prévu de permettre la définition du comportement des agents séparément de l'implémentation informatique.

1.2 Objectif de recherche

J'ai pu au cours de ce stage me familiariser avec le milieu et les problématiques propres à la recherche interdisciplinaire.

L'étude concrète d'un système multi-agent et de son développement m'a permis de prolonger et de dépasser l'étude théorique réalisée en cours lors du master

IAD. Mon objectif a donc été de cerner les besoins en fonction de l'application à développer tout en respectant certaines contraintes techniques comme la possibilité d'interfacer l'application avec un système d'information géographique. J'avais également pour fonction de jouer le rôle complexe de modélisateur, à l'interface entre informaticien, géographe et entomologiste.

2 Etat de l'art

A l'heure actuelle, les seuls modèles utilisés sur les maladies endémiques sont des modèles mathématiques. Ceux-ci ont pour objectif de prédire l'évolution de ces maladies à plus ou moins long terme. Bien que performants ils ont cependant plusieurs défauts.

2.1 Modèles mathématiques

Les modèles mathématiques sont uniquement réalisables ou exploitables par des mathématiciens et bien plus difficilement par des thématiciens. Ceci est particulièrement gênant pour leur réalisation qui nécessite la collaboration des deux spécialistes, avec les problèmes de vocabulaire et de compréhension que cela engendre. Le modèle ainsi créé par le mathématicien est rarement exploitable par le spécialiste du domaine.

En second lieu, les modèles mathématiques sont descriptifs - par opposition à explicatifs - et globaux. Concernant le premier point, ils n'ont pas pour objectif d'expliquer une situation à partir des connaissances disponibles, seulement d'en rendre compte et de prédire l'évolution. De nouvelles connaissances peuvent les remettre totalement en cause. Pour le second point, ils ne prennent pas en compte les interactions locales et doivent comporter des paramètres *ad hoc* ; en cas d'erreur de prédiction il faudra éventuellement revoir tout le modèle à cause d'un de ces paramètres. Puisqu'ils ne prennent pas en compte les interactions locales, ces modèles ne permettent donc pas d'expliquer les différences observées entre deux situations pourtant proches. Par exemple nous ne savons pas pourquoi la dengue est émergente en Bolivie alors qu'elle ne l'est pas au Cameroun, pays qui, à la vue des données intégrées dans les modèles mathématiques, semble avoir toute les conditions pour être touché. L'hypothèse centrale des thématiciens avec qui nous avons travaillé est que cet état de fait s'explique par des différences comportementales des multiples agents intervenants (vecteurs, animaux et humains). Ces comportements, à l'instar des spécificités locales, ne sont pas pris en compte (explicitement du moins) dans les modèles mathématiques existants.

C'est le cas par exemple du modèle présenté dans le "A Stochastic Population Dynamics Model for *Aedes Aegypti* : Formulation and Application to a City with Temperate Climate" [4].

Il calcule la densité de population du moustique en Argentine, plus précisément à Buenos Aires, en fonction de la température (moyenne annuelle et

variations saisonnières) et de la présence de sites de ponte. Ce modèle stochastique s'appuie sur les différents stades de développement du moustique et les probabilités de transitions de l'un à l'autre (stagnation, évolution, mort). Bien que s'ancrant dans une réalité biologique et climatique, toutes les composantes, notamment comportementales aussi bien du moustique et de l'humain, ne sont pas prises en compte. Ainsi le modèle dans une forme peu remise en cause restera finalement limité à son environnement initial.

Concernant les améliorations à apporter, les auteurs présentent en premier lieu la prise en compte de la dispersion géographique (qui est certainement un paramètre critique pour la survie de l'espèce) ainsi qu'une plus grande importance de l'environnement climatique. De plus ils envisagent d'intégrer explicitement l'âge des moustiques à chacun des stades de développement. Ces éléments sont relativement difficiles à inclure pour les modèles mathématiques mais surtout ils ne peuvent l'être qu'à un niveau global. Comme nous le verrons, ces éléments sont par contre pris en compte de façon naturelle dans le modèle individu-centré que nous présentons, notamment grâce à l'utilisation d'un SIG.

2.2 Modèles agents

A notre connaissance il n'existe, à l'heure actuelle, aucun modèle individu-centré pour les maladies endémiques ou à vecteurs. Il existe cependant des outils de développement tel MadKit ou Swarm qui permettraient ce type de modélisation et de simulation. Ceux-ci ne sont, néanmoins, pas spécifiquement adaptés et obligerait le thématicien à se former à la programmation ce qui n'est pas envisageable à l'heure actuelle.

3 Présentation du travail réalisé

Le projet SavSim se propose d'utiliser conjointement un système multi-agent et un système d'information géographique. Le premier permet une représentation poussée des agents, de leurs comportements et de leurs interactions locales. Le second permet la localisation précise d'informations et contribue ainsi au réalisme de l'environnement modélisé. Ceci permet, contrairement aux modèles mathématiques, la prise en compte des spécificités locales.

L'objectif de ce stage était donc de développer un moteur multi-agents facilitant la représentation individu-centrée et de réaliser une interface entre ce moteur multi-agent et un système d'information géographique. Le troisième élément à mettre en oeuvre au cours de ce stage était la conception d'un formalisme de description des comportements. L'objectif final étant d'utiliser ces travaux sur deux problématiques concernant les maladies à vecteur, à savoir la trypanosomiase et la dengue.

Le développement a ainsi porté sur trois points distincts mais complémentaires :

- Une adaptation du SIG choisi aux requêtes générées par les agents du système multi-agent (SMA).

- Le développement d’un SMA qui gère toute la dynamique du système et qui puisse être interfacé avec le SIG.
- La conception d’un formalisme ouvert de description des comportements. Il a été choisi de séparer en deux ce travail, le comportement à proprement parler étant décrit sous forme de fichier XML et les actions de base des agents (utilisées dans les comportements) en C++.

3.1 Système multi-agent

3.1.1 Système d’information géographique : SavGIS

Le système d’information géographique SavGIS [6] est développé par Marc Souris. Il permet le stockage et la consultation dans différentes représentations de données géoréférencées. Celui-ci possède deux modes de fonctionnement, vecteur et raster. Le premier est en fait un codage continu de l’information géographique, et est le mode de travail interne du SIG. Le second est une approximation sous forme de grille, moins précis mais plus performant et plus facilement utilisable en coordination avec le SMA. Ce sera donc celui-ci qui sera employé.

Il était prévu que toutes les données localisées du systèmes soient gérées par SavGIS mais, pour des raisons de performance, cela n’a pas été possible. Ainsi seules les données statiques, généralement issues du terrain, seront gérées par le SIG alors que les données dynamiques, notamment les stimuli, seront gérées par une couche “environnement” venant s’intercaler entre le SIG et les agents. Nous présenterons dans le point suivant la classe Environnement qui joue ce rôle.

3.1.2 SavSim

SavSim, co-développé avec Alexis Drogoul au cours de ce stage, largement basé sur EMF (Etho-Modelisation Framework)[2], est le moteur multi-agent utilisé dans ce projet.

Les agents dans SavSim possèdent des attributs sous forme, d’une part, de variables (ex : son âge), et d’autre part, de stimuli (ex : dégagement de CO2) qui sont propagés dans l’environnement et accessibles aux autres agents.

Leur comportement s’exprime sous la forme de réflexes (couple condition - action / mise à jour de variable, ex : fuir en présence d’un prédateur), et de tâches (triplet poids - condition - séquence d’actions / mise à jour de variable, ex : chercher de la nourriture, la consommer et déplacer ce qui reste). Les réflexes sont systématiquement exécutés dès que leur condition est vérifiée. Les tâches dont la condition est vérifiée sont triées par ordre décroissant de poids et la plus prioritaire est exécutée jusqu’à ce qu’une tâche plus prioritaire prenne la main.

La valeur des variables d’un agent, l’intensité de ses stimuli, les conditions et poids des réflexes et des tâches, sont exprimés sous la forme d’expressions évaluées à chaque cycle et s’appuyant sur la valeur des variables internes et l’intensité des stimuli perçus par l’agent.

Les actions (ex : un déplacement élémentaire) à exécuter par les réflexes et les tâches sont décrites dans le noyau sous la forme de primitives (qui sont attachées à des classes C++).

Dualité code C++, fichier de comportement

Pour une plus grande souplesse d'utilisation, et de réutilisation, il a été décidé de scinder les agents en deux parties.

Tout d'abord une classe d'implémentation qui, outre les mécanismes internes, permet un ensemble d'actions communes à plusieurs types d'agents proches. Par exemple une classe *Mosquito* intègre des déplacements paramétrables spécifiques aux moustiques et leurs actions de recherches de gîtes et d'hôtes.

Se basant sur cette classe d'implémentation, il est possible de définir plusieurs fichiers de comportement modélisant des types de moustiques différents. Par exemple un *aedes aegypti* sera attiré par de l'eau propre pour faire son gîte alors qu'un *aedes albopictus* sera attiré par les eaux sales. Il suffira pour cela de remplacer dans la tâche "pondre" le paramètre "nom du stimulus" de l'action "suivre stimulus" par "eau sale".

Enfin cela permet, directement dans le fichier de comportement, de spécialiser des groupes d'agents en changeant certaines valeurs de variables ou en leur rajoutant certaines tâches. Chaque agent possède une espèce (ou comportement), éventuellement une sous-espèce (spécialisation) et une classe d'implémentation qui implémente l'ensemble des actions utilisées dans le comportement.

Ainsi, une même classe d'implémentations permettra de modéliser aussi bien des *aedes albopictus* que des *aedes aegypti*.

Et, en ce qui concerne une simulation avec seulement *aedes aegypti*, il sera possible, au sein du fichier xml, de définir deux "sous espèces" *aedes* : *aedes* adultes mâles et femelles en s'appuyant sur la même classe d'implémentation. Le mâle a pour seules tâches de copuler et de subvenir à ses besoins énergétiques, et a pour seul réflexe de mourir une fois trop vieux. Alors que la femelle redéfinira la copulation (attraction par les mâles) et ajoutera des tâches comme rechercher un hôte ou pondre.

Exemple xml

Voici à titre d'exemple le modèle XML d'agents simples émettant du CO2, fuyant des prédateurs par le type "prédateur" et se nourrissant de "nourriture"(comportement valable sous réserve que la classe d'implémentation définisse les primitives "fuirAgent", "manger" et "suivreStimulus")¹ :

```
<var type='int' name='@faim' init='0' value='@faim+1' />

<reflex name='fuirPrédateur'>
  <do action='fuirAgent'>
    <arg name='AgentType' value='Prédateur' />
  </do>
</reflex>
```

¹les éléments introduits seront présentés au paragraphe 3.1.5

```

</reflex>
<signal name='CO2' intensity='10' range=' 10 meters' />
<task name='SeNourrir' threshold='10'>
  <do action='SuivreStimulus>
    <arg name='nourriture' />
  </do>
  <repeat action='manger'>
    <arg name='@faim' />
  </do>
</task>

```

Boucle opérationnelle de l'agent

Les agents dans SavSim, lorsqu'ils sont activés, exécutent les actions suivantes :

1. Calcul des variables internes
2. Propagation des stimuli
3. Activation des réflexes éventuels
4. Filtrage des actions possibles (calcul des intensités des tâches possibles en fonction des stimuli perçus et des variables internes)
5. Si pas de nouvelle tâche plus importante que la tâche en cours, on continue celle-ci (on effectue la primitive suivante), sinon on effectue la première primitive de la nouvelle tâche déterminée

Ordonnancement

L'activation des agents est effectuée par le noyau de SavSim qui gère les agents de façon pseudo-parallèle par l'intermédiaire d'un ordonnanceur qui à chaque pas de temps leurs fait exécuter la boucle suivante :

1. Mise à jour des variables internes et externes puis blocage pour ne pas les recalculer avant le pas de temps suivant
2. Emission des stimuli
3. Exécution de chaque agent un par un (étape 3 à 5 de l'agent)

De plus l'ordonnanceur gère l'arrivée et le départ des agents de l'environnement pour qu'il n'y ait pas d'incohérence du type : A agit sur B mais B est mort et n'existe plus dans le système. Enfin, il faut préciser que l'ordonnancement des agents se fait de manière aléatoire afin de respecter un pseudo parallélisme. D'une exécution de la simulation à une autre, il est cependant possible de conserver (pour des raisons de validation expérimentale) le même ordonnancement des agents car le générateur aléatoire peut être initialisé par une variable globale définie dans le fichier XML.

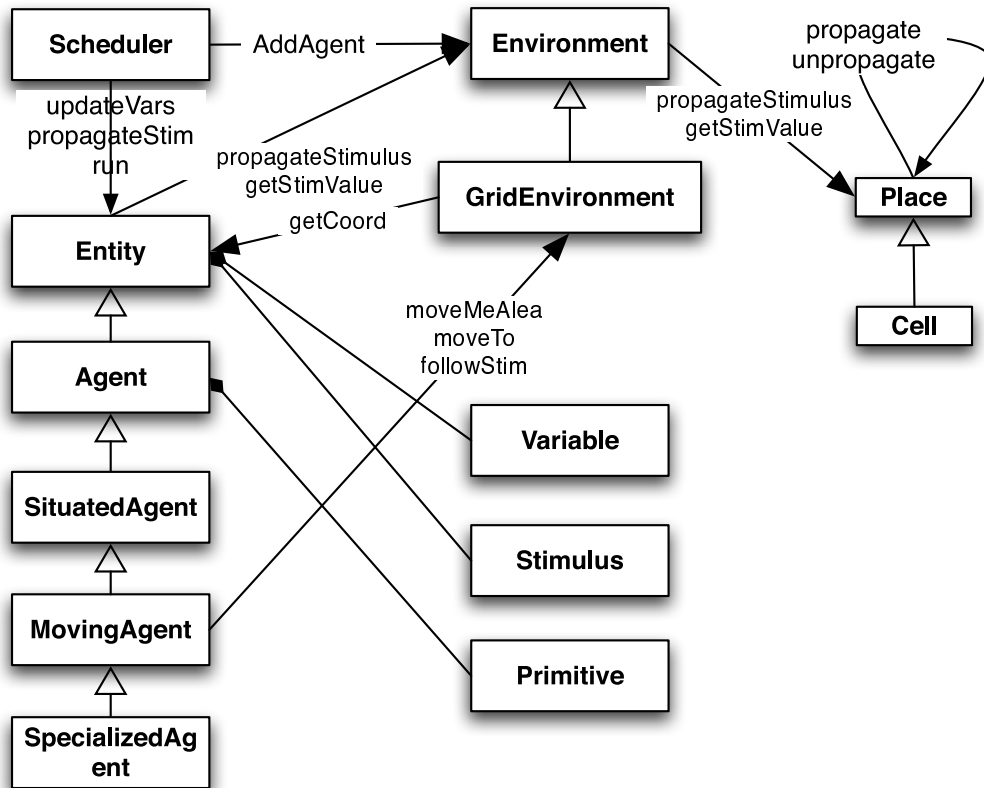
Environnement

L'environnement créé est pour le moment une grille hexagonale permettant le stockage et la lecture d'informations dynamiques, ainsi que la propagation des stimuli. L'environnement se compose d'une classe qui sert d'interface entre les agents d'une part et soit le SIG - dans le cas d'informations statiques - soit un ensemble de cellules - dans le cas d'informations dynamiques. Ces cellules permettent de stocker et propager les stimuli émis dans l'environnement et, évidemment, leurs lectures par les agents.

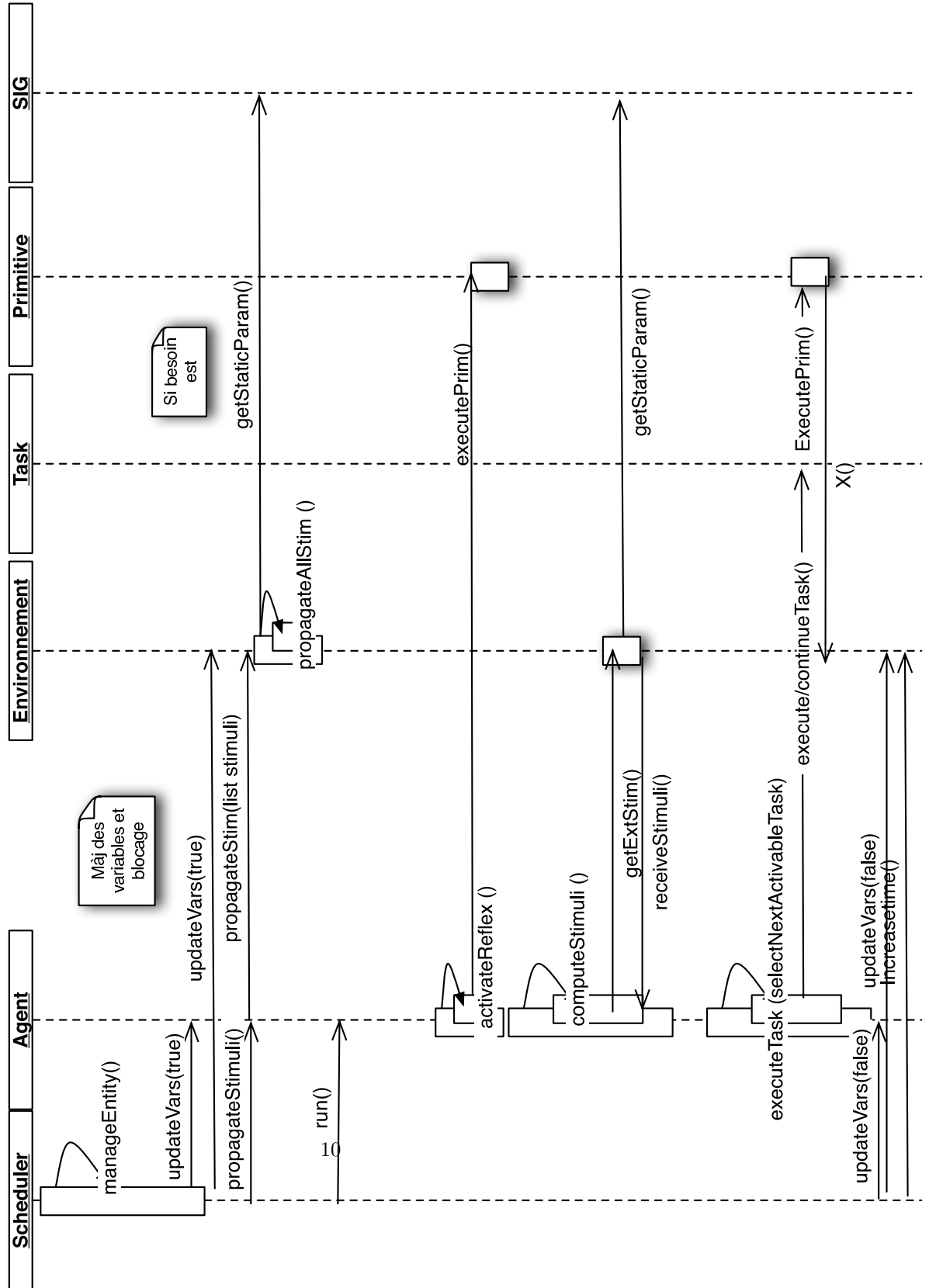
Pour les informations statiques, le SIG se comportera alors comme une "simple" base de donnée géographique en lecture. A terme, il devrait également permettre tout un ensemble de calcul géométrique (distance, appartenance à une zone, etc).

Bien que cette interface soit terminée, l'interfaçage avec le SIG n'a pas été réalisé pour des raisons que j'évoquerai dans l'évaluation critique.

3.1.3 Diagramme de classes



3.1.4 Diagramme de séquence



3.1.5 Configuration de la simulation et formalisation des comportements

Pour permettre l'utilisation du système par des spécialistes du domaine d'étude, il a été décidé de décrire les agents, l'environnement et tout ce qui a trait à la simulation à l'aide de fichiers de description respectant le format XML. Ces fichiers sont bien plus aisément manipulables que les programmes C++. De plus, ils permettent une bonne réutilisation des agents déjà modélisés et sont facilement adaptables en cas de différences peu importantes. Enfin, le format XML permet d'envisager la création d'une interface de saisie, en se basant sur des outils déjà disponibles (XMLBuddy pro par exemple).

Le fichier de configuration a été défini, en collaboration avec Guy Mbatchou, de la manière suivante : il se compose de trois sections, "global", "entities" et "simulation". Dans la section "global" sont regroupées des définitions partagées par toutes les entités du fichier. Dans la section "entities" sont décrites les prototypes d'agents intervenants dans la simulation, dont la configuration est détaillée dans la section "simulation". Chacune de ces sections permet de définir les entités suivantes :

– global

alias permet d'utiliser un raccourci pour la désignation de primitives, de variables, etc.

exemple : `<alias name="goTo" value="goToNearestWater"/>`

default définit une valeur par défaut pour le paramètre d'une entité XML

exemple : `<default name="else" value="0">`

var variable globale de la simulation, elle possède un nom, un type (int / float / string / bool), une valeur (si c'est une expression celle-ci sera évaluée à chaque cycle) comportant une unité de mesure et éventuellement une initialisation, un minimum et un maximum.

exemple : `<var name="MosquitoSpeeddefault" type="int" value="1 meter / second"/>`

conversion les agents peuvent avoir différentes échelles temporelles, spatiales, etc., les conversions permettent alors de les définir toutes dans une même échelle de base de manière récursive

exemples : `<conversion name="km" value="1000 meters"/>`
`<conversion name="meter" value="100 centimeters"/>`

– entities

breed	<p>permet de définir une espèce d'agent, son éventuelle "sur-espèce" (mécanisme d'héritage identique à celui utilisé dans les langages objets) et sa classe d'implémentation. Par exemple l'espèce <i>aedes aegypti</i> dérive d'<i>aedes</i> et a pour classe d'implémentation mosquito. Elle possède les sous-sections "var", "signal", "reflex", "Task"</p> <p>exemple : <code><breed name="AedesAegypti" parent="Aedes" base="mosquito"></code></p>
var	<p>variable interne à l'agent (définie comme les variables de simulation)</p> <p>exemple : <code><var name="@age" type="int" init="0" value="@age+1" min="0" max="100"/></code></p>
signal	<p>stimulus émis suivant éventuellement une condition (si celle n'est pas vérifiée l'intensité peut être définie par "else") avec une certaine intensité et une certaine portée</p> <p>exemple : <code><signal name="\$CO2" if="@état= vivant" intensity="10" else="0" range="rangeSignal"/></code></p>
reflex	<p>Les réflexes se composent d'une séquence de tag "do" :</p> <p><code><reflex if="@age>1000" every="day"></code></p> <p>do exécution unique d'une primitive avec un ensemble d'argument (nom + valeur)</p> <p>exemple : <code><do action="SeDeplacer"></code> <code><arg name="speed" value="MosquitoSpeeddefault"/></code> <code></do></code></p> <p>set mise à jour de variable (en cas de non respect d'un max ou d'un min la variable est mis à la valeur la plus proche possible)</p> <p>exemple : <code><set var="@peur" value="@peur +10"/></code></p>
task	<p>séquence de primitive et de mise à jour de variables, elle possède un seuil d'activité, une durée minimale (pendant laquelle elle est ininterrompible) et une maximale, un poids (expression) et un ensemble de paramètre. Elle peut inclure les sous section "do", "repeat", "set"</p> <p>exemple : <code><task name="SeNourrir" threshold="10"></code></p> <p>duration représente la durée minimale et maximale d'une tâche</p>

exemple : `<duration min="1 min" max="1 hour"/>`

repeat exécution répétée d'une action tant qu'elle n'a pas satisfait une condition définie en interne (dans la classe d'implémentation). Comme "do" elle possède un ensemble de paramètres

exemple : `<repeat action="manger">
<arg name="satiété" value="10"/>
</repeat>`

– simulation

population précise l'ensemble des agents par groupes (dans lequel il faudra spécifier les variables) qui seront instanciés dans la simulation, un sous groupe représentant une spécialisation (au niveau de l'instanciation des variables)

exemple : `<group breed="MaleAedes" size="1000">
<sub size="100">
<var name="@age" value="1 day
+ random * 10 days" />
</sub>
</group>`

environment ici on définit le fichier environnement utilisé pour le SIG et les caractéristiques de l'interface environnementale (grid seulement pour le moment)

exemple : `<environment type="GridEnvironment">
<file name="Bangkok"/>
</environment>`

time on spécifie ici la durée de la simulation

exemple : `<time duration=" 100 days" />`

Une fois le fichier XML décrit, il pourra être chargé par le noyau, qui prendra en charge l'instanciation des agents, la création des espèces définies, la compilation et l'interprétation des expressions, etc.

On voit ainsi qu'une fois un problème modélisé, il est facile de quelque peu modifier le fichier XML pour s'intéresser à une nouvelle situation. Si l'on prend le cas de la dengue et de la trypanosomiase, une classe d'implémentation moustique avec quelques primitives peut suffire : la définition du comportement des deux espèces d'insectes mis en jeu se ressemblera largement. Il sera aisé de passer de l'un à l'autre.

A noter qu'il est possible de définir des fichiers XML génériques qui pourront être inclus (mot-clé "include" de la section "global") dans les fichiers de la simulation, pour bénéficier de définitions soit réutilisables telles quelles (par exemple, les conversions) soit à spécialiser (par l'intermédiaire de l'héritage des "breed").

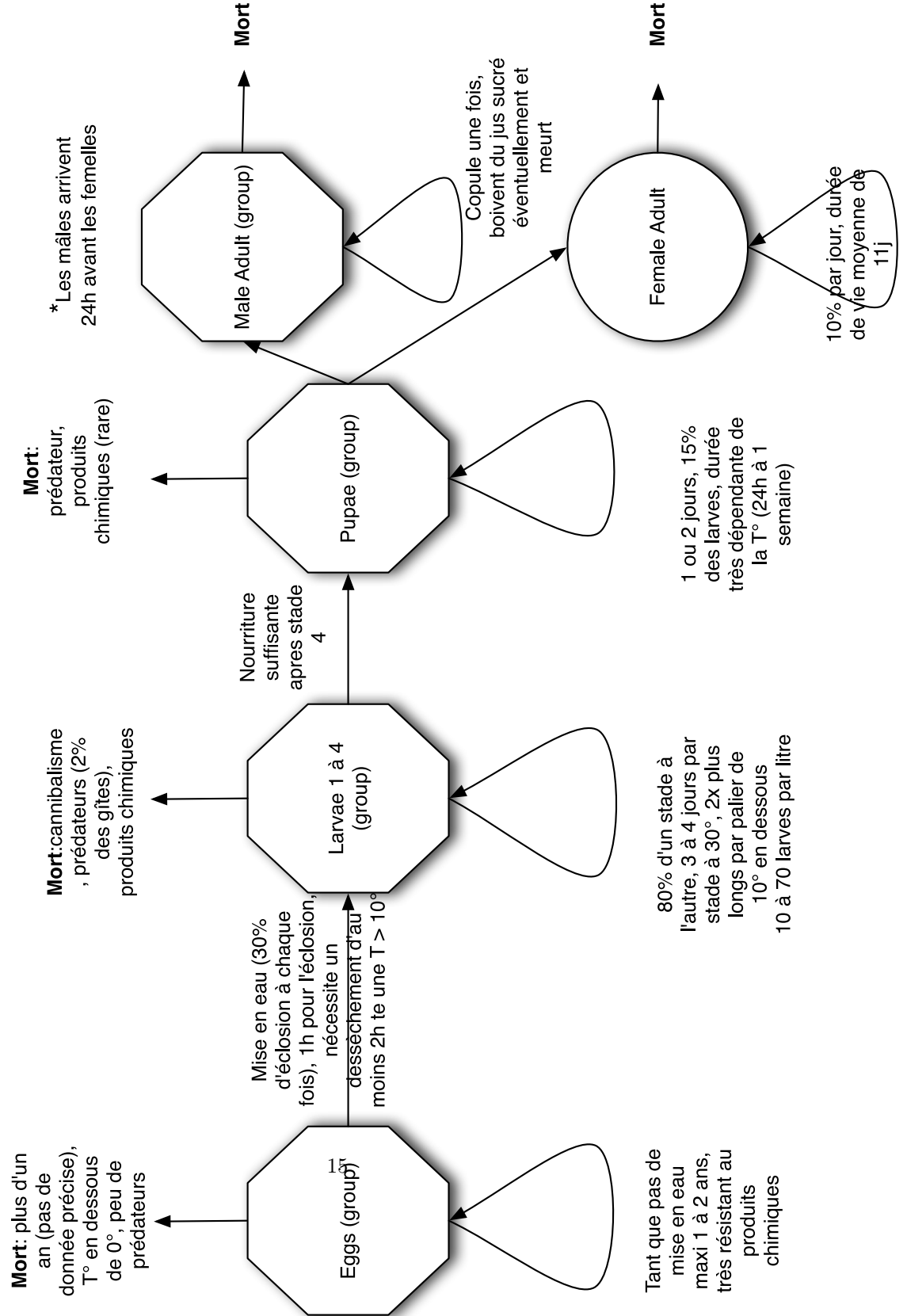
3.2 Recueil de données

Afin de pouvoir modéliser correctement l'*aedes aegypti*, vecteur de la dengue et son environnement, il a fallu tout d'abord avoir une première idée des informations nécessaires et de celles disponibles. Un premier aperçu a été donné par "A Stochastic Population Dynamics Model for *Aedes Aegypti* : Formulation and Application to a City with Temperate Climate"[4] qui décrit brièvement le cycle de vie de ce moustique ainsi que des données factuelles telles que la probabilité d'évolution d'un stade au suivant (et de mort). Ces données, bien que précises, sont spécifiques à Buenos Aires. Il a donc fallu les compléter par celles spécifiques à la Thaïlande et plus particulièrement à Bangkok. Pour ce faire, j'ai travaillé en collaboration avec Marc Souris et Philippe Barbazan entomologiste à l'IRD Bangkok. Cela s'est concrétisé par un questionnaire (voir annexe) adapté aux entomologistes. Ce questionnaire a été partiellement rempli par Mr Barbazan, nous avons ainsi pu avoir un second aperçu plus complet, et a ensuite été transmis à Ronald Morales (Mahidol University, Bangkok). Et enfin transmis par Mr Souris aux entomologistes "IRDiens" en mission en Thaïlande.

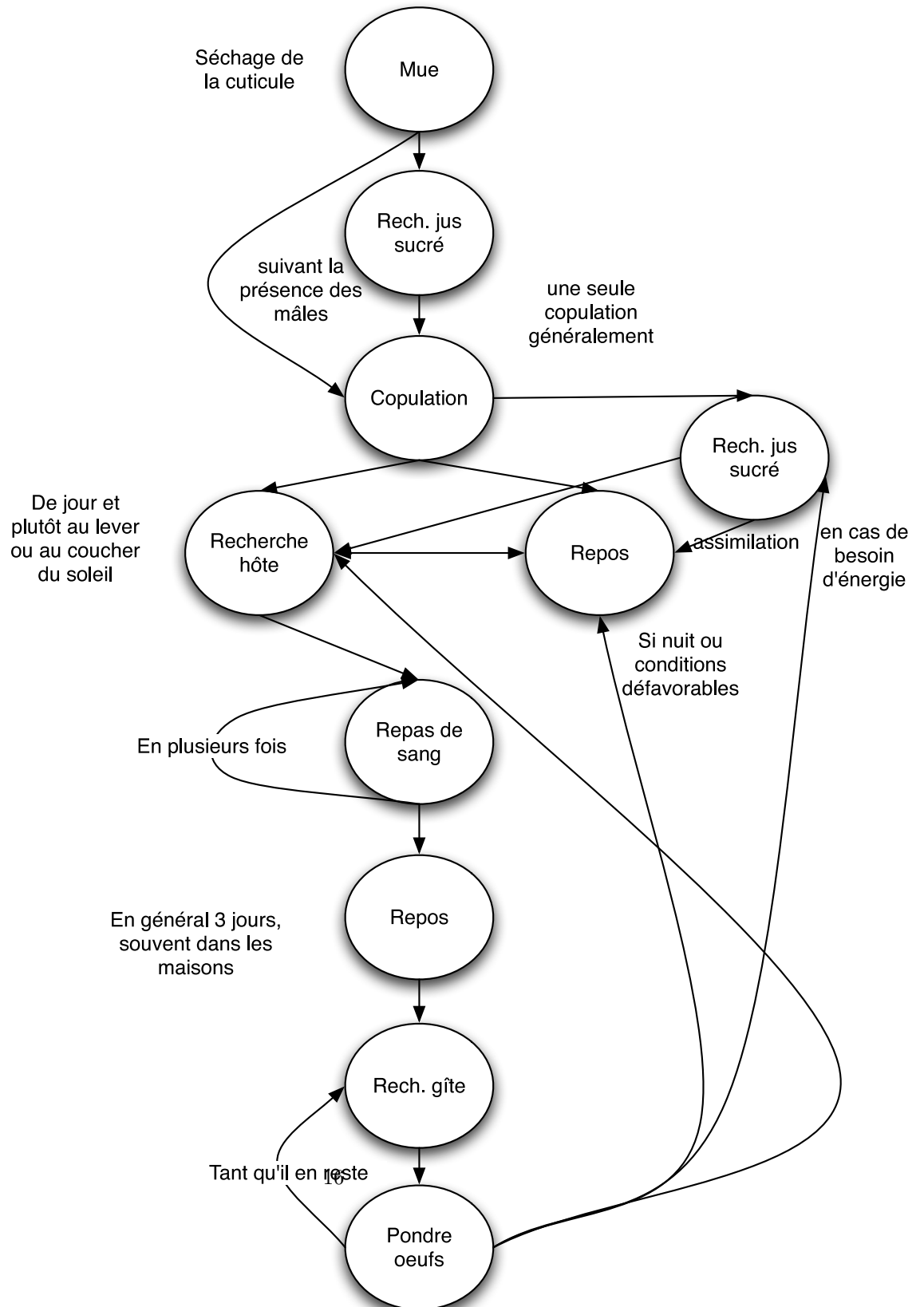
3.3 Modèle de l'*aedes aegypti*

Le cycle de vie de l'*aedes* se déroule en quatre stades principaux, à savoir l'oeuf, la larve, la nymphe et l'adulte. Une approximation agrégeant les individus pour les trois premiers stades de développement, à l'instar de "A Stochastic Population Dynamics Model for *Aedes Aegypti* : Formulation and Application to a City with Temperate Climate"[4], a été faite. Elle semble relativement correcte car le sexe des individus n'a alors que peu d'importance (voire aucune) dans l'évolution et qu'ils sont tous regroupés dans le même milieu à savoir le site de ponte ou gîte. Les mâles adultes sont également agrégés du fait de leur comportement très simple, il ne reste donc que les *aedes* adultes femelles qui sont clairement "agentifiées". Cela se justifie par leur comportement beaucoup plus complexe que celui des mâles ou des stades précédents. En effet la femelle va devoir rechercher du sang humain pour pouvoir mener à maturation ses oeufs alors que les mâles ne font que copuler une unique fois et mourir (et éventuellement aller boire du jus sucré de fleurs environnantes pour satisfaire leur besoin énergétique) et que les stades précédents ne font au mieux que manger et évoluer.

3.3.1 Modèle général de l'*aedes aegypti*



3.3.2 Modèle de l'*aedes aegypti* femelle



4 Evaluation critique

4.1 Système multi-agent

4.1.1 Noyau

Le système multi-agent fonctionne. Les fichiers XML de description des comportements sont correctement chargés et parsés par le système. Les entités informatiques représentant les agents sont ensuite également correctement gérées. L'ordonnanceur les crée, les détruit et les ordonne de la manière attendue.

Au final la dynamique du système est tout à fait opérationnelle. Malgré tout, il est toujours possible que des erreurs apparaissent dans la suite des travaux, mais à l'heure actuelle le noyau est pleinement fonctionnel.

4.1.2 Environnement et classes

L'environnement actuel est un environnement discret représentant une grille hexagonale. Celui-ci est quasiment terminé. Il reste cependant quelques méthodes à programmer ou à améliorer, comme des méthodes de gestion des stimuli qui peuvent être additifs ou paramétrés par une fonction.

Les classes implémentant les fonctions utilisées par la modélisation des agents de la simulation sur la dengue sont bien avancées. Elles permettront dans un futur proche de réaliser les premières simulations. Ces classes seront cependant remises en cause par la modélisation plus poussée qu'il reste à réaliser.

4.2 Interfaçage avec SavGIS

SavGIS devait à l'origine gérer complètement la partie environnementale et graphique mais ceci a été remis en cause au cours de mon séjour en Thaïlande. Il s'est en effet avéré que pour des raisons de performance (enregistrement et lecture dans la base de donnée), il ne serait pas envisageable de l'utiliser de cette manière. Il a donc fallu développer une surcouche environnementale pour stocker toute l'information dynamique et servir d'interface avec le SIG en cas de demande d'information environnementale statique.

De plus SavGIS a été codé en Visual Studio6 et SavSim en C++ suivant la norme ISO. SavGIS utilisant largement les spécificités de Visual studio, il a donc été décidé de porter le code du simulateur sous VisualStudio6. Bien que la majorité des erreurs de portage aient été résolues, Visual6 ne prend pas en charge certaines capacités du C++ ISO, tels les retours covariants, utilisés couramment dans le code de SavSim. Il a finalement été décidé de porter SavGIS sur Visual2005, qui lui supporte plus de fonctionnalités du C++ ISO, ainsi que SavSim, ce qui a été fait. Mon temps sur place atteignant sa fin et la disponibilité de Marc Souris se faisant de plus en plus réduite - du fait d'un calendrier chargé - l'interfaçage effectif n'a pu avoir lieu. Il est toutefois prévu pour le début de l'année universitaire 2006/2007.

4.3 Formalisation de la description des comportements

Ce travail a été réalisé avec Guy Mbatchou. Bien qu’une première expérimentation n’ait pu avoir lieu et que le formalisme soit encore amené à évoluer (un formalisme extensible étant de toutes manières souhaitable), on peut le considérer comme quasiment fini et utilisable. En effet les différentes configurations possibles de simulations, la notion d’espèce, de tâche, de stimulus sont bien définies et l’environnement est lui aussi relativement bien cerné.

4.4 Modélisation

Le modèle développé ne l’a été qu’avec un seul entomologiste et avec trop peu d’informations chiffrées. Ceci nous a seulement permis de déterminer un tableau général pour la modélisation de l’*aedes aegypti* ce dernier n’ayant été qu’esquissé. En effet ni l’environnement ni le comportement des humains (volontairement prévu basique) n’ont été suffisamment traités.

Nous avons également sollicité les autres entomologistes “IRDiens” basés en Thaïlande. Malheureusement ceux-ci n’ont pas encore donné suite à nos sollicitations (la période estivale étant peu propice à cela), ce qui ne nous a pas permis d’aller plus loin qu’un tableau général du comportement de l’*aedes*. En effet, quantité d’informations chiffrées nous manquent et il nous faudrait plusieurs sources d’information pour croiser et vérifier les données ainsi obtenues.

Une des raisons possibles de ce manque de réponses est la somme de travail que cela demande. En effet, selon M. Morales (entomologiste à Mahidol University, Bangkok), il faut au bas mot une bonne journée à répondre avec le strict minimum de précision. De plus, les chercheurs sollicités n’ayant pas vu une ébauche de résultats possibles, ils n’ont peut-être pas vu l’intérêt d’un tel travail. D’autant plus que ces chercheurs n’ont été que peu impliqués dans le développement de ce projet. Enfin la précision mathématique désirée lors des réponses à ces questionnaires était certainement trop forte (distribution statistiques des valeurs).

Une fois les premières expérimentations réalisées sur le modèle imparfait que nous avons, il sera sans doute beaucoup plus aisé d’obtenir ces informations.

5 Conclusion

5.1 Bilan

De par sa nature fortement interdisciplinaire, ce stage m’a énormément appris en me permettant de m’ouvrir à l’activité de recherche. Il m’a permis de découvrir des problématiques de recherche dans un cadre réel avec tous les soucis que cela peut poser. Ce sujet m’a permis de collaborer avec plusieurs spécialités très éloignées du cadre théorique de l’intelligence artificielle et même de l’informatique en général. Cette collaboration nécessitait un effort de précision sur la signification des différents concepts manipulés lors d’échange entre informa-

ticien d'une part, et entomologiste et géographe d'autre part. De ce fait, cette collaboration a été très stimulante mais pas sans difficultés.

En premier lieu, s'est posé le problème de la coordination des différentes équipes dans le cadre d'une collaboration à distance (Bondy, Bangkok et Hanoi). Le problème de l'accord sur des méthodes et objectifs de développement s'est également posé. En effet, d'un côté il était convenu que SavSim serait un simulateur totalement indépendant ayant une interface pour les SIG en général et SavGIS en particulier. De l'autre, l'objectif était plutôt d'intégrer au maximum le code du simulateur dans celui du SIG, notamment pour des raisons de performances. Si la première première option a été retenue, le choix entre les deux a pris du temps.

Une autre difficulté des travaux de recherche interdisciplinaire est l'implication des personnes. En particulier quand il n'existe pas encore de prototype pour donner une idée de l'objectif à atteindre aux collègues ayant une toute autre spécialité. Ceci est d'autant plus important lorsque l'on ne peut rencontrer ces personnes avant de leur demander une somme de travail conséquente sans qu'ils ne sachent à quoi cela va aboutir.

5.2 Travaux futurs

Il reste de nombreux travaux à réaliser. Concernant le développement informatique il faudra finir l'interface avec le SIG SavGIS. Il faudra terminer l'environnement discret ainsi que développer, si possible, un environnement continu et rattacher tout ceci au SIG. Il faudra également finir le codage des classes d'implémentation pour la modélisation de la dengue et de la trypanosomiase. Enfin il faudra avoir fini la modélisation des vecteurs et des autres agents impliqués.

Cette modélisation demandera également un nouveau recueil de données plus précises et surtout chiffrées. De plus, il sera indispensable de commencer ce travail par une recherche bibliographique bien plus conséquente que celle réalisée au cours de ce stage. Selon Mr Barbazan, ce domaine d'étude est malheureusement quelque peu tombé en désuétude en entomologie. La tendance est plus à l'étude à haut niveau des interactions entre les groupes de moustiques et leur environnement.

Il faudra enfin poser un ensemble plus réduit de questions précises, voire de demande d'expérimentation. Il est d'ailleurs envisagé de collaborer avec l'université de Mahidol (Bangkok, Thaïlande), et son "Center for Vectors and Vector-Borne Diseases (CVVD)" en la personne de Ronald Morales.

5.3 Perspectives

Le travail réalisé dans ce stage représente clairement la première étape de ce que sera le projet SavSim dans quelques années : j'ai pu mettre en place les mécanismes fondamentaux : SMA, SIG, formalisme des comportements. Il reste cependant encore de nombreux travaux à réaliser, travaux que j'espère pouvoir continuer en thèse, si toutefois les financements demandés pour les projets internationaux dans lesquels SavSim est censé être utilisé sont obtenus par

FIR.

6 Annexes

Références

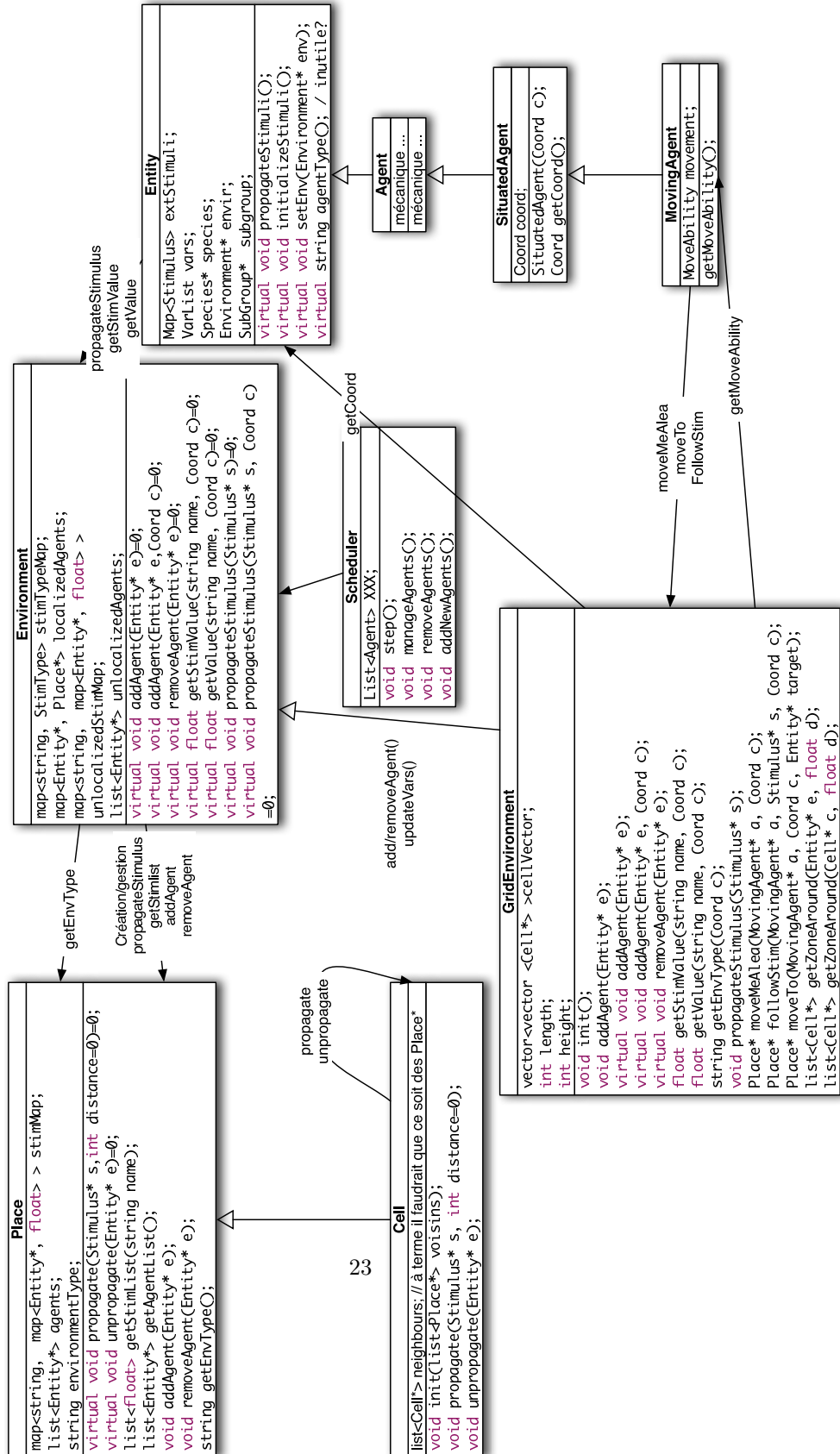
- [1] *Aedes Aegypti* (L.) The yellow fever mosquito - Its life history, bionomics and structure. Sir S Rickard Christophers 1960
- [2] De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes. A. Dro-goul 1993
- [3] Les Systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective. J. Ferber 1997
- [4] A Stochastic Population Dynamics Model for *Aedes Aegypti* : Formulation and Application to a City with Temperate Climate. M. Otero, H. G. Solari, N.Schweigmann 2006
- [5] Formalisme des comportements. Guy Merlin Mbatchou, rapport de re-cherche, 2006
- [6] Cours sur les SIG de Marc Souris (<http://www.star.ait.ac.th/~souris/books.htm#Cours>)
- [7] Institut Pasteur (<http://www.pasteur.fr>)
- [8] Organisation Mondiale de la Santé (<http://www.who.int>)
- [9] Wikipedia (<http://fr.wikipedia.org/wiki/>)

6.1 Glossaire

- *Aedes aegypti* : moustique vecteur de la dengue. Il se trouve dans les pays tropicaux et sub-tropicaux mais sa zone d'action s'agrandit, il a notam-ment été réintroduit en Amérique du Sud. Il vit principalement aux abords des humains car il a besoin d'eau claire pour pondre.
- *Aedes albopictus* : cousin de l'*aedes aegypti*, il est originaire des zones tropicales et plus spécialement d'Asie du Sud Est. On le retrouve désormais dans des pays non tropicaux comme l'Italie. Il est vecteur du chikungunya et plus rarement de la dengue.
- Immunité croisée : caractéristique de deux maladies, ou deux sérotypes, permettant à un ex-malade de l'une des deux d'être immunisé contre l'autre.
- Maladie endémique : maladie largement présente dans une région donnée comme la dengue ou la fièvre jaune en Thaïlande.
- Maladie à vecteur : maladie nécessitant le passage par un hôte temporaire, le vecteur, pour se transmettre à ses hôtes définitifs.
- Raster (mode) : mode de fonctionnement d'un SIG, dans celui-ci la carte est maillé, plus l'on zoom plus les pixels sont gros.
- Sérotype : nom donné à la variété sérologique correspondant à une espèce (bactérie, virus.) et la manière de nommer les subdivisions taxonomiques de microorganismes sur la base des caractéristiques de leur antigène ou protéines.

- SIG ou GIS : un système d’information géographique permet de gérer des données alpha-numériques spatialement localisées, ainsi que les données graphiques permettant d’afficher ou d’imprimer plans et cartes. Ses usages couvrent les activités géomatiques de traitement et diffusion de l’information géographique.
- SMA : un système multi-agent est un ensemble d’agents situés dans un certain environnement et interagissant selon une certaine organisation. Un agent est une entité caractérisée par le fait qu’elle est, au moins partiellement, autonome. Ce peut-être un processus, un robot, un être humain, etc.
- Vecteur (mode) : mode de fonctionnement d’un SIG, dans celui-ci la carte est composée d’objet dont un ensemble de points sont localisés par leur coordonnées, les amers, on joint ses points par des droites dont le nom “vecteur”.
- Vecteur (biologie) : animal transmettant un agent infectieux d’un sujet à un autre directement ou après multiplication de l’agent dans son organisme.

6.2 Diagramme détaillé des classes environnementales



6.3 Questionnaire *aedes aegypti*

Aedes Aegyptii

Questionnaire concernant le comportement du moustique en vue de la modélisation. Le questionnaire est organisé en fonction des différents états du moustique (œuf, larve, nymphe, adulte). Les réponses doivent si possible donner la moyenne expérimentale, plus un écart-type ou une courbe de distribution des valeurs observées si c'est possible. Toute amélioration de ce questionnaire est bienvenue.

1. Oeuf

- 1.1. Caractéristiques
 - 1.1.1. Taille des oeufs
 - 1.1.2. Métabolisme (respiration, nutrition, etc)
 - 1.1.3. Autres caractéristiques importantes
- 1.2. Influences de l'environnement sur la durée de vie et sur la maturation
 - 1.2.1. Température
 - 1.2.2. Climat
 - 1.2.3. Habitat
 - 1.2.4. Pollution
 - 1.2.5. Insecticide
 - 1.2.6. Ensoleillement
 - 1.2.7. Altitude
 - 1.2.8. Autres
- 1.3. Interactions et compétitions
 - 1.3.1.1. Entre oeufs
 - 1.3.1.2. Avec les autres stades de développement
 - 1.3.1.3. Avec d'autres espèces
- 1.4. Prédateurs
 - 1.4.1. Espèces
 - 1.4.2. Nombres par gîte (et sur les différents types de gîtes)
 - 1.4.3. Impact sur la population
 - 1.4.4. Mode opératoire
 - 1.4.5. Concurrence/interactions entre prédateurs
 - 1.4.6. Autres sources de mortalité
 - 1.4.7. Autres

- 1.5. Éclosion : passage de l'oeuf à la larve
 - 1.5.1. Quand (saison, heure de la journée, etc.)
 - 1.5.2. Conditions de déclenchements
 - 1.5.3. Conditions d'échec (mort de l'oeuf/larve)
 - 1.5.4. Durée du processus
 - 1.5.5. Vulnérabilité (larve à peine sortie sont-elles plus vulnérables qu'un peu après)
 - 1.5.6. Pourcentage moyen d'oeufs qui éclosent
 - 1.5.6.1. A la première pluie
 - 1.5.6.2. Au total (taux de mortalité des oeufs)
 - 1.5.7. Conséquences en cas d'interruption du processus de mise en eau
 - 1.5.8. Durée de la mise en eau pour assurer le déclenchement de l'éclosion
- 1.5.6. Autres
- Autres informations ?
- 2. **Larve** (en cas de différence notable entre les 4 stades de larve, veuillez préciser)
 - 2.1 Caractéristiques générales
 - 2.1.1. Nombre de stades
 - 2.1.2. Durée des stades
 - 2.1.3. Différence notables entre les stades
 - 2.1.4. Cohabitation des différents stades larvaires (& nymphe?) dans un même gîte (cannibalisme, comportement de groupe?)
 - 2.1.5. Taux de mortalité globale (variabilité et explicitation)
 - 2.2. Interactions
 - 2.2.1. avec les autres stades (inhibition de l'éclosion des oeufs par exemple)
 - 2.2.2. Autres espèces
 - 2.2.3. Prédateurs
 - 2.2.3.1. Espèces
 - 2.2.3.2. Nombres
 - 2.2.3.3. Impact sur la population

- 2.2.3.4. Mode opératoire
- 2.2.3.5. Concurrence/interactions entre prédateurs
- 2.2.3.6. Autres
- 2.3. Cycle de vie (description générale, ordonnancement des activités)
- 2.4. Développement
 - 2.4.1. Conditions environnementales optimales, normales, extrêmes et leur influences (durée de vie, développement, etc)
 - 2.4.1.1. Température
 - 2.4.1.2. Ensoleillement
 - 2.4.1.3. Quantité d'eau
 - 2.4.1.4. Quantité de nourriture disponible
 - 2.4.1.5. Pollution
 - 2.4.1.6. « Pollution » par déjection
 - 2.4.1.7. Existence de bactérie nuisible ?
 - 2.4.1.8. Insecticide
 - 2.4.1.9. Détergent
 - 2.4.1.10. Autres
 - 2.4.2. Processus de développement
 - 2.4.2.1. Nourriture (quantité minimale, source, assimilation, etc)
 - 2.4.2.2. Déroulement de la croissance (modification à chaque stade larvaire ?)
 - 2.4.2.3. Vulnérabilité lors de la mue (chimique ou aux prédateurs)
 - 2.4.2.4. Autres
- 2.5. Actions élémentaires (déplacement, prise de nourriture, mue, etc)
 - 2.5.1. Descriptions
 - 2.5.2. Durée
 - 2.5.3. Fréquence
 - 2.5.4. Interruptibilité
 - 2.5.5. Facteurs d'influence
 - 2.5.6. Autres (paramètres)

- 2.6. Comportements (enchaînement d'actions ayant généralement un but comme la recherche de nourriture)
 - 2.6.1. Général (activité principale)
 - 2.6.2. (en cas de) Manque de nourriture
 - 2.6.3. (en cas de) Surpopulation
 - 2.6.4. (en cas de) Sortie de l'eau
 - 2.6.5. Induit par l'environnement (par exemple phototropisme négatif)
- 2.7. Autres

Autres informations ?

3. Nymphes

- 3.1. Caractéristiques générales
 - 3.1.1. Durée de vie (avant de changer de stade)
 - 3.1.2. Taux de mortalité globale (moyenne, écart type)
- 3.2. Conditions environnementales optimales, normales, extrêmes et leur influences (durée de vie , développement, etc)
 - 3.2.1. Température
 - 3.2.2. Ensoleillement
 - 3.2.3. Pollution
 - 3.2.4. Insecticide
 - 3.2.5. Détergent
 - 3.2.6. Autres
- 3.3. Interactions
 - 3.3.1. Entre nymphes
 - 3.3.2. Avec les autres stades
 - 3.3.3. Autres espèces
- 3.4. Prédateurs
 - 3.4.1. Espèces
 - 3.4.2. Nombres par gîte (et sur les différents types de gîtes)
 - 3.4.3. Impact sur la population
 - 3.4.4. Mode opératoire
- 3.5. Actions élémentaires

- 3.5.1. Descriptions
- 3.5.2. Durée
- 3.5.3. Fréquence
- 3.5.4. Interruptibilité
- 3.5.5. Facteurs d'influence
- 3.5.6. Autres (paramètres)
- 3.6. Comportements (enchaînement d'action ayant un objectif)
 - 3.6.1. Général
 - 3.6.2. Manque de nourriture
 - 3.6.3. Surpopulation
 - 3.6.4. Sortie de l'eau
 - 3.6.5. Entre eux (différents stades de larves)
 - 3.6.6. Vis-à-vis des autres stades & des autres espèces
 - 3.6.7. En fonction de l'environnement (par exemple phototropisme négatif)
 - 3.6.8. Conditions environnementales non optimales
- 3.7. Autres
- Autres informations ?
- 4. Adultes mâles**
 - 4.1. Caractéristiques générales
 - 4.1.1. Durée de vie
 - 4.1.1.1. Taux de mortalité globale
 - 4.1.1.2. Taux de mortalité journalière
 - 4.1.1.3. Facteurs influençants
 - 4.1.2. Vitesses
 - 4.1.3. Altitude de vol
 - 4.1.4. Autres
 - 4.2. Interactions
 - 4.2.1. Entre eux
 - 4.2.2. Avec les autres stades
 - 4.2.3. Avec d'autres espèces
 - 4.2.4. Avec l'homme

- 4.3. Prédateurs
 - 4.3.1. Espèces
 - 4.3.2. Nombres par gîte (et par type de gîtes)
 - 4.3.3. Impact sur la population
 - 4.3.4. Mode opératoire
 - 4.3.5. Concurrence/interactions entre prédateurs
 - 4.3.6. Autres
- 4.4. Actions élémentaires
 - 4.4.1. Description
 - 4.4.2. Durée
 - 4.4.3. Fréquence
 - 4.4.4. Interruptibilité
 - 4.4.5. Facteurs d'influence
- 4.5. Comportements (enchaînement d'action ayant un objectif)
 - 4.5.1. Les actions
 - 4.5.2. Durée
 - 4.5.3. Fréquence
 - 4.5.4. Interruptibilité
 - 4.5.5. Facteurs d'influence
- 4.6. Organisation du cycle de vie
 - 4.6.1. Jour/nuit
 - 4.6.2. Enchaînement des comportements
 - 4.6.3. « Horaires »
- 4.7. Autres informations ?

5. Adultes femelles

- 5.1. Caractéristiques
 - 5.1.1. Durée de vie
 - 5.1.1.1. Mortalité journalière (moyenne écart type)
 - 5.1.1.2. Facteurs d'influence
 - 5.1.2. Vitesse
 - 5.1.3. Altitude de vol

- 5.1.4. Habitat
- 5.1.5. Distance journalière parcourue (moyenne, écart type, exceptionnelle, facteurs d'influence)
- 5.1.6. Perceptions
- 5.1.7. Autres
- 5.2. Interactions
 - 5.2.1. Entre elles
 - 5.2.2. Avec les mâles
 - 5.2.3. Avec les autres stades
 - 5.2.4. Avec d'autres espèces
 - 5.2.5. Avec l'homme
- 5.3. Prédateurs
 - 5.3.1. Espèces
 - 5.3.2. Impact sur la population
 - 5.3.3. Mode opératoire
 - 5.3.4. Concurrence/interactions entre prédateurs
 - 5.3.5. Autres
- 5.4. Actions (se déplacer, piquer, pondre, etc)
 - 5.4.1. Descriptions
 - 5.4.2. Durée
 - 5.4.3. Fréquence
 - 5.4.4. Interruptibilité
 - 5.4.5. Facteurs d'influence
- 5.5. Comportements (enchaînement d'action ayant un objectif)
 - 5.5.1. Durée
 - 5.5.2. Fréquence
 - 5.5.3. Interruptibilité
 - 5.5.4. Facteurs d'influence (humidité, température, terrain découvert, etc)
 - 5.5.5. Différence jour/nuit
- 5.6. Comportements déjà connus (à décomposer en actions)
 - 5.6.1. « Naissance » (nymphe -> adulte)
 - 5.6.2. Copulation

- 5.6.2.1. Description (changement biologique, etc)
- 5.6.2.2. Durée
- 5.6.2.3. Interruptibilité
- 5.6.2.4. Comportement en cas de non copulation au moment prévu
- 5.6.2.5. Facteurs d'influence
- 5.6.3. Repas de jus sucré
 - 5.6.3.1. Description
 - 5.6.3.2. Durée
 - 5.6.3.3. Interruptibilité
 - 5.6.3.4. Comportement en cas d'impossibilité (recherche jusqu'à la mort ou bien ?)
 - 5.6.3.5. Détection des sources
 - 5.6.3.6. Facteurs d'influence
- 5.6.4. Repas de sang
 - 5.6.4.1. Description (changement biologique, etc)
 - 5.6.4.2. Durée
 - 5.6.4.3. Interruptibilité
 - 5.6.4.4. Comportement en cas d'impossibilité (recherche jusqu'à la mort, trouver un animal ?)
 - 5.6.4.5. Détection des cibles
 - 5.6.4.5.1. Type de perception
 - 5.6.4.5.2. Distance
 - 5.6.4.5.3. Angle de vue
 - 5.6.4.5.4. Opacité de l'environnement
 - 5.6.4.6. Facteurs d'influence
- 5.6.5. Repos après repas de sang
 - 5.6.5.1. Description (changement biologique, etc)
 - 5.6.5.2. Durée
 - 5.6.5.3. Interruptibilité

- 5.6.5.4. Comportement en cas d'impossibilité (recherche jusqu'à la mort ou bien ?)
 - 5.6.5.5. Facteurs d'influence
 - 5.6.6. Recherche de gîte
 - 5.6.6.1. Description (changement biologique, etc)
 - 5.6.6.2. Durée
 - 5.6.6.3. Interruptibilité
 - 5.6.6.4. Comportement en cas d'impossibilité (recherche jusqu'à la mort ou bien ?)
 - 5.6.6.5. Facteurs d'influence
 - 5.6.7. Ponte
 - 5.6.7.1. Description (changement biologique, etc)
 - 5.6.7.2. Durée
 - 5.6.7.3. Interruptibilité
 - 5.6.7.4. Facteurs d'influence
 - 5.6.8. Autres comportements à rajoutés
- 5.7. Organisation du cycle de vie
 - 5.7.1. Jour/nuit
 - 5.7.2. Enchaînement des comportements
- 5.8. Déroulement de la vie du moustique femelle
 - 5.8.1. Eclosion, durcissement de la cuticule
 - 5.8.2. Copulation (à plus de 90 %)
 - 5.8.3. Jus sucré
 - 5.8.4. Recherche de Repas de sang
 - 5.8.5. Repos
 - 5.8.6. Recherche de gîte, ponte, repos
- 5.9. Les Stimulus
 - 5.9.1. Stimulus Copulation
 - 5.9.1.1 Période de copulation au cours de la vie du moustique

- 5.9.1.2 Types de comportement et de déplacement en vue de la copulation
- 5.9.1.3 Influence de l'environnement sur les paramètres de la copulation
- 5.9.2 Stimulus Repas de sang
 - 5.9.2.1 Recherche de l'hôte. Mouvement ? Gaz carbonique ? Chaleur ? UV ? Infra-Rouge ? Odeur ? Type de déplacement en vue de repas de sang. Heures des repas. Humidité ? Lieux de piqûres.
 - 5.9.2.2 Nombres de repas nécessaires au développement des oeufs.
 - 5.9.2.3 Repas interrompus. Animaux piqués ? Temps d'une piqûre.
 - 5.9.2.4 Influence de l'environnement et du climat sur la fréquence des repas de sang
 - 5.9.2.5 Comportement après un repas de sang (recherche de lieu de repos, temps de repos, maturation des oeufs).
- 5.9.3 Stimulus Repas de jus sucré
 - 5.9.3.1 Nombre et type de repas nécessaire au développement
 - 5.9.3.2 Comportement en absence de stimulus
- 5.9.4 Périodes de repos
 - 5.9.4.1 Lieux privilégiés de repos
 - 5.9.4.2 Déplacements possibles sans stimulus particulier
 - 5.9.4.3 Influence du climat (température, humidité, pluie)
- 5.9.5 Stimulus ponte
- Recherche du gîte, forme géométrique, contraste entre le forme du gîte et l'environnement, couleurs (noir, marron), odeur, humidité, parois, présence d'eau.

- 5.9.6 Stimulus repos
 - 5.9.6.1 Sommeil à Heure de début et de fin d'activité journalière.
- 5.10 Paramètres généraux de vie du moustique
 - 5.10.1. Durée de vie du moustique
 - 5.10.2. Nombre de pontes au cours de la vie
 - 5.10.2. Habitats privilégiés
 - 5.10.3. Influence du climat sur la physiologie
 - 5.10.4. Prédateurs
- 6. Virémie**
 - 6.1. Cycle de vie dans l'humain
 - 6.1.1. Incubation
 - 6.1.2. Transmissibilité
 - 6.1.3. Effets sur le comportement
 - 6.1.4. Mortalité
 - 6.2. Cycle de vie dans le moustique
 - 6.2.1. Durée de vie
 - 6.2.2. Durée avant d'être infectant
 - 6.2.3. Durée contaminant
 - 6.2.4. Effets sur le comportement
 - 6.3. Transmission humain/moustique
 - 6.3.1. Description
 - 6.3.2. Probabilité de contamination (& facteurs)
 - 6.4. Autres

6.4 Code XML AEDES