



HAL
open science

Modélisation et simulation à base d'agents de la propagation d'une parasitose végétale le gui

Tamene K Samuel, Vivient Corneille Kamla, Balama Gazissou

► To cite this version:

Tamene K Samuel, Vivient Corneille Kamla, Balama Gazissou. Modélisation et simulation à base d'agents de la propagation d'une parasitose végétale le gui. 2017. hal-01307159v3

HAL Id: hal-01307159

<https://hal.science/hal-01307159v3>

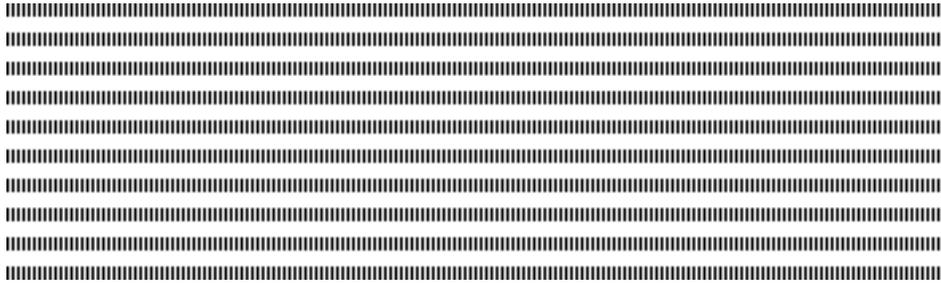
Preprint submitted on 15 Mar 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Open licence - etalab



Numéro spécial CRI'15

Modélisation et simulation à base d'agents de la propagation d'une parasitose végétale

le gui

TAMENE K. Samuel* — KAMLA V. Corneille** — Gazissou Balama*

* Département de mathématiques et Informatique
Université de Ngaoundéré
Ngaoundéré, Cameroun
samueltken@gmail.com

** Département de mathématiques et Informatique
Université de Ngaoundéré, ENSAI
Ngaoundéré, Cameroun
vkamla@gmail.com

RÉSUMÉ. "Gui d'Afrique" est la désignation commune des phanérogames hémiparasites des essences ligneuses et de vergers de la famille des *Loranthaceae*. Bien que possédant les vertus thérapeutiques, les guis causent des dégâts importants à leurs hôtes occasionnant de ce fait des pertes de production. Les mécanismes de dispersion des *Loranthaceae* sont encore peu connus. Le but de cette étude est d'identifier et classer les facteurs qui influencent la dissémination de ces parasites. Dans cet article, un modèle multi-agents de la propagation du gui dans une plantation d'arbres fruitiers est construit. Ce modèle a été construit suivant la démarche de modélisation des systèmes multi-agents (SMA) GAIA Version 2. Après une implémentation de ce système en utilisant la bibliothèque de simulation des SMA MASON, une analyse de sensibilité des sorties de ce modèle a été faite. Il en ressort que: le taux d'infestation croît avec la disponibilité des baies de gui, la fréquentation des oiseaux et la quantité de baies produites par chaque plant; par contre, il décroît fortement avec le facteur de compétition; l'intensité d'infestation quant à elle, croît avec l'âge des hôtes. Notre étude révèle qu'une dispersion de gui à grande distance n'est imputable qu'aux oiseaux endozoochores alors que les oiseaux épizoochores agissent à l'échelle locale.

ABSTRACT. Mistletoe is the common name of tree species of seagrass and orchards hemiparasites of the family *Loranthaceae*. Although possessing therapeutic virtues, mistletoes cause significant damages to their hosts thereby causing production losses. *Loranthaceae* dispersal mechanisms are still poorly understood. The purpose of this study is to identify and rank the factors that influence the spread of these parasites. In this article we build a multi-agent model for the spread of mistletoe in orchards. This model was built according to the modeling approach of multi-agent systems (MAS) GAIA Version 2. After an implementation of this system using the Java simulation library MASON. We perform sensitivity analysis of outputs of the simulation. It shows that: the rate of infection increases with the availability of mistletoe berries, attendance of the birds and the amount of berries produced by each plant; but it strongly decreases with the competition factor; infestation intensity in turn, increases with the age of hosts. Our study reveals that a dispersion of mistletoe on long distances is attributable to endozoochores birds, while epizoochores birds act locally

MOTS-CLÉS : GAIA, *Loranthaceae*, propagation, dissémination de graines, infestation

KEYWORDS : GAIA, *Loranthaceae*, propagation, seed dispersal, infestation



1. Introduction

Les *loranthaceae*, désignés sous le vocable commun de "gui d'Afrique" sont des phanérogames¹, hémiparasites chlorophylliens ou épiphytes² de essences ligneuses et de vergers [7]. De nombreux auteurs rapportent qu'à l'image de la plupart des phanérogames hémiparasites des ligneux, les *Loranthaceae* causent des dégâts importants à leurs hôtes. Ces parasites peuvent provoquer une défoliation des hôtes, un dessèchement des extrémités des rameaux qui conduit à la réduction considérable voir totale (mort de l'arbre) de la production. Mais les mécanismes de dispersion des *loranthaceae* restent très peu connus. Le gui, de part ses effets néfastes sur les cultures et son utilisation en pharmacie moderne et indigène, a fait l'objet de plusieurs études par de nombreux auteurs.

Les auteurs pionniers tels que Sallè[7], Sprengel, Balle et Boussim[1] ont présenté le gui en insistant sur les aspects biologiques. Ces travaux donnent une estimation du nombre d'espèces dans la famille des *loranthaceae*. Dans les régions tempérées, cette famille végétale regroupe 950 espèces réparties en 77 genres. En Afrique et en Arabie, Polhill et Wiens (1998) dénombrent plus de 500 espèces. Au Cameroun, Balle(1986) recense sept genres réunissant près de 25 espèces[7].

Les articles plus récents se focalisent sur les aspects tels que la croissance du gui[4], la relation hôte-parasite[9, 8], l'influence du vieillissement[4], le taux d'infestation, l'intensité d'infestation[11], les hôtes les plus attaqués[6], les espèces de gui les plus fréquentes mais aussi sur la dissémination [1, 9], les dégâts entraînant les pertes de productions [10, 1, 3, 2, 11] et bien d'autres aspects. Toutes fois, ces auteurs ne s'intéressent pas à la dynamique de propagation du gui dans des plantations. Ils font le plus souvent une étude transversale [3, 11, 6] ou alors un suivi des plantes sur une certaine durée[1]. En prenant en compte les comportements des guis qui sont variables d'un climat à un autre et donc d'une région à une autre, il apparait claire que ces travaux perdent des valeurs hors du contexte de la zone où ils ont vu le jour, car présentant des états des faits statiques. Notamment, la littérature actuelle est peu précise en ce qui concerne les facteurs influençant la dissémination des *loranthaceae* ainsi que le poids des influences de ces différents facteurs sur la propagation.

Ce travail vise à répondre à la problématique suivante. Comment prévoir la propagation des *loranthaceae* sur une population d'hôtes afin d'organiser les interventions pour limiter les pertes de production ?

Il a pour objectif de proposer un modèle calculatoire, basé sur l'approche des systèmes Multi-agent(SMA), de prise de décision quant à la propagation de gui et les dates où les interventions sont nécessaires afin d'éviter les pertes de production. Les étapes de construction de ce modèle sont les suivantes :

- Modéliser et simuler par l'approche multiagent la diffusion du gui sur une plantation d'hôtes;
- Mesurer par ce modèle, le temps nécessaire aux guis pour coloniser une plantation initialement saine et située dans une zone à risque;

La suite de cet article est organisée comme suit. La section 2 présente le gui avec une emphase sur son cycle épidémiologique, ses agents vecteurs, ses hôtes et la relations

1. Un végétal phanérogame est une plante ayant des organes de reproduction apparents dans le cône ou dans la fleur. La dissémination est assurée par des graines

2. Les épiphytes sont des plantes qui poussent en se servant d'autres plantes comme support. Il ne s'agit pas de plantes parasites car elles ne prélèvent pas de nourriture de leur hôte

entre l'hôte et le parasite. La section 3 présente notre modèle. La section 4 présente et commente les résultats de l'analyse du modèle. La section 5 conclue et donne les perspectives de ce travail.

2. Présentation des *Loranthaceae*

Les *Loranthaceae*, hémiparasites³ qui, implantés sur les parties aériennes de leurs hôtes, sont responsables de dégâts économiques, écologiques, morphogénétiques et technologiques variables selon les cultures ou les essences ligneuses parasitées[7]. Les hémiparasites sont des végétaux qui ont perdu au cours de leur évolution leur autonomie dans l'accès aux ressources nutritives et sont devenus tributaires de leurs hôtes. Ils représentent un fléau réel contre lequel une lutte volontariste s'avère indispensable, compte tenu de l'ampleur des dégâts[7]. Sallé et Aber ("Les phanérogames parasites : biologie et stratégies de lutte", *Lettres Botaniques*, 1986) mentionnent qu'une telle lutte passe nécessairement par une meilleure connaissance de la répartition géographique et de la biologie des organismes ciblés.

Les guis dépendent donc d'autres plantes pour leur nutrition et leur approvisionnement en eau et de ce fait, sont des parasites de celles-ci. Ils peuvent infecter plusieurs plantes parmi les quelles *Coffea Sp.* (Caféier)[6], *Theobroma cacao* (cacaoyer)[5], *Vitellaria paradoxa Sp.* (karité)[1], *Persea American Sp.* (avocatier)[3, 6] et s'ils ne sont pas contrôlés, ils peuvent causer de dégâts importants[7]. L'infestation par les guis aboutit à la mort de la branche à partir du point d'attaque; des infestations plus importantes provoquent la mort de plusieurs branches, ce qui aboutit à la perte de vigueur, une réduction de la production et éventuellement, à la mort de l'arbre tout entier.

2.1. Le cycle de reproduction du gui

Le cycle du gui est très variable, en fonction du climat et de l'espèce. Les étapes remarquables sont tout au moins assez claires:

- la graine, transportée par un oiseau se fixe sur une branche d'un hôte;
- dans de bonnes conditions climatiques, la germination a lieu au bout de 2 à 3 jours en zone tropicale et équatoriale[1];
- le germe passe ensuite au moins 2 mois pour fixer son suçoir sur la branche[1];
- au bout du 4^{ème} mois au moins (cette étape peut durer une année ou deux en zone de climat rude[9]), les premières fleurs apparaissent;
- au 6^{ème} mois, les premiers fruits mûrissent et peuvent être emportés sur d'autres branches/hôtes initialement sains.

On a remarqué que dans certaines zones et pour certaines espèces, les étapes se chevauchent. Par exemple, une nouvelle floraison peut se produire pendant la fructification[11].

Ainsi, le cycle de reproduction du gui varie avec la région où il est semé. Cette variabilité est liée au climat, mais aussi aux spécificités du gui et de l'hôte.

D'après [1], *Tapinanthus* au Burkina Faso parasite plus de 80 espèces d'arbres et le cycle de vie varie en fonction de l'hôte. D'autres sources de la littérature indiquent que la famille *Viscum Album L.*, qui pousse en France et y présente un cycle de 7 années, pousse aussi en Suisse mais avec un cycle de 5 ans sur la même palette d'hôte.

3. il peut fabriquer sa matière organique, mais dépend de l'hôte pour les sels minéraux et l'eau

2.2. La dissémination du gui

Les oiseaux sont les seuls responsables de la dissémination du gui [9, 1]. Les différents types d'oiseaux influençant la dissémination du gui ainsi que leur mode opératoire sont décrits comme suit:

- Certains oiseaux consomment les graines de gui en avalant plusieurs baies de gui (de 6 à 8 chez certaines espèces). Parmi ces oiseaux, certaines espèces digèrent les graines avalées, limitant ainsi la dissémination. D'autres par contre, les rejettent intactes dans leurs fientes, assurant ainsi la dissémination du gui.

- Une seconde classe d'oiseaux consommateurs de gui est constituée des oiseaux qui dépulpent les graines de gui et ne consomment que la pulpe, collant le germe sur les branches d'hôtes. Cette classe est reconnue par [9] comme "une véritable providence pour le gui". Les oiseaux de cette espèce collent presque sûrement toutes les graines de gui qu'ils consomment donnant ainsi la chance à chacune de pouvoir germer.

- La dernière classe d'oiseaux mange-gui opère sur les pousses (germes ou plant) de gui plutôt que sur les fruits. Ces oiseaux qui détruisent les plants en croissance participent ainsi à limiter la propagation du gui sur une plantation.

On distingue deux mécanismes assurant la dissémination des baies de Gui : la zoochorie et l'ornithochorie.

- Les oiseaux endozoochores avalent souvent jusqu'à 8 baies de gui. Ces baies sont soit digérées (dans ce cas l'oiseau participe à la diminution de la population du gui) soit rejetées entières et prêtes à la germination

- Les Ornithochores dépulpent les baies de gui et les collent sur des branches pour ne consommer que la pulpe. Les auteurs assignent aux Ornithochores la responsabilité d'une dissémination accrue de gui à l'échelle d'un hôte et son voisinage.

3. Présentation du modèle

Dans ce travail, le système modélisé est constitué d'une plantation d'arbres visités par des oiseaux mange-guis et des plants de guis poussant sur les hôtes (arbres). Le système est ouvert car des oiseaux peuvent aller et revenir dans la plantation en y important ou exportant de nouveaux guis. De façon sommaire, les interactions entre ces entités se résument en ces points:

- les oiseaux consomment les graines de gui et les déposent sur les branches d'arbres hôtes de gui;

- ces graines germent et produisent des fruits qui sont de nouveau transportés vers de nouvelles branches d'hôtes.

A chacune de ces étapes, la graine ou le germe de gui est susceptible de se perdre ou alors d'être détruit par les agents naturels.

3.1. Modélisation à l'aide de GAIA

La méthode GAIA est proposée par Wooldrige et al. dans [13]. GAIA version 2 propose une conception en deux phases avec un total de onze (11) modèles et permet de concevoir les SMA ouverts. En analyse, on a le découpage en sous-systèmes faiblement couplés, le modèle d'environnement, le modèle préliminaire de rôles, le modèle préliminaire d'interaction et les règles organisationnelles. Dans la phase de conception, la struc-

ture organisationnelle contenue dans le modèle organisationnelle est construite. Puis les modèles de rôles et d'interaction et enfin, les modèles d'agent et de services. Cette seconde version propose un formalisme sémi-formelle avec la notion d'organisation. En outre, elle propose d'enrichir les modèle GAIA avec les notations proposées dans A-UML (Agent-Unified Modeling Language). Faute de place ici, seuls quelques diagrammes seront représentés, le lecteur pourra se référer à [12] pour la modélisation complète du système.

3.1.1. Découpage en sous-systèmes

La première phase de la méthode est le découpage du système en sous-systèmes faiblement couplés. Ce découpage nous donne les sous-systèmes suivant :

1) Le sous-système *Croissance des plantes hôtes*: il se charge de la croissance des plantes hôtes.

2) Le sous-système *Reproduction du gui*: il se charge de la croissance et de la reproduction des guis. Il implémente alors les modèles de croissances des plantes de gui, leurs cycles de reproduction incluant la floraison, la pollinisation et la fructification.

3) Le sous-système *reproduction d'oiseaux*: il se charge de la reproduction des oiseaux dans le système.

4) Le sous-système *Climat*. Ce sous-système assure les changements climatiques dans le système. Il modélise les différents aléas climatiques par des données recueillies au fil du temps.

5) Le sous-système *Propagation*: il assure la dissémination du gui au travers des mécanismes de transport et dépôt de graines de guis (par les oiseaux). Il assure aussi l'ouverture du système et se charge du recrutement d'oiseaux et de nouvelles espèces de gui.

3.1.2. Modèle d'environnement

Dans la seconde phase, GAIA demande de construire un modèle d'environnement qui est, par sous-système, une représentation des différentes variables et agents du sous-système, en précisant les types d'opérations qui peuvent y être faites (lecture, écriture, production, destruction, ...). La table 1 présente le modèle d'environnement du système.

Pour chaque sous-système, il est précisé un certain nombre de variables que les agents du système pourront modifier ou simplement consulter pendant l'évolution du système. Les variables accessibles en écriture peuvent être considérées comme variable de sortie dans une analyse du système tandis que celles disponibles en lecture seule seront vues comme les paramètres d'entrée du système.

3.1.3. Modèle de rôles préliminaire

Le modèle préliminaire de rôles est construit pour chaque sous-système et pour chaque rôle. La table 2 présente le modèle préliminaire de rôle pour CYCLEPRODUCTIONGUI du sous-système croissance des plantes. Un rôle est la représentation abstraite d'une fonction qu'un agent peut assurer. Il encapsule un ensemble de services que l'agent pourra offrir en jouant ce rôle. Les protocoles de communication permettent à un rôle d'échanger avec un autre rôle dans la réalisation d'un service.

Le schéma de rôle précédant (tableau 2) illustre le rôle de la reproduction chez les gui. Il implémente ce qui est nécessaire à un gui pour la reproduction des guis dans notre système, de la fixation du germe à un plant adulte produisant des fruits, en passant par la germination, la fixation de l'haustorium, la production cyclique des fleurs puis des fruits. Ce cycle est représenté par les règles de *vivacité* du rôle. Les règles de sûreté

Tableau 1. Modèle d'environnement

Sous-Système croissance des plantes hôtes
<i>Lecture:</i> especeHote(tableau de [1..nbespeceHote]), Nombre_arbres <i>Écriture:</i> Branches, Etat_Branches
Sous-Système reproduction du gui
<i>Lecture:</i> especesGui(tableau de [1..nbespeceGui]), sensibilités (matrice $nbespeceHote \times nbespeceGui$) MaxFleursEspece, MaxProductionGuiJourPlant, féconditeEspece, Nombre_Germe_Gui <i>Écriture:</i> Fleurs_Gui, nombre_Graines_gui, Nombre_touffes_Gui
sous-système reproduction des Oiseaux
<i>Lecture:</i> Espece (tableau de 1..nbespeceoiseau), enombre_espece <i>Écriture:</i>
Sous-Système Propagation
<i>Lecture:</i> Nombre_Oiseaux <i>Écriture:</i> Nombre_Germe_Gui, nombre_Graine_Gui, Nombre_touffes_Gui
Sous-Système Climat
<i>Lecture:</i> <i>Écriture:</i> Pluviométrie, Température, sécheresse

Tableau 2. Schéma du rôle CYCLEPRODUCTIONGUI

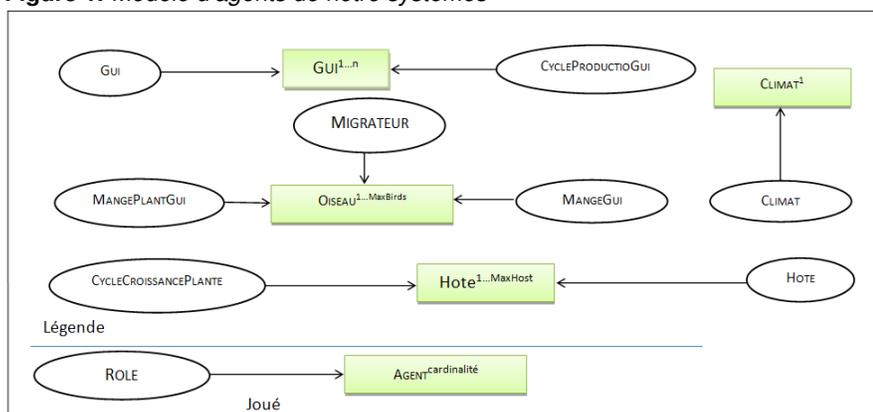
Schéma du Rôle: CYCLEPRODUCTIONGUI (CPG)
Description: Fixation, germination, croissance et production des baies par un plant de gui.
Protocoles et Activités: Germination, Fixation_Poto, Germination_Proto, Climat_Proto, Accroissement, Floraison, Nectar_Proto, Fécondation, Production
Permissions: <i>Lecture:</i> Espèce_Gui, taux_Fécondité, taux_Production, sensibilité_hote <i>Écriture:</i> Nombre_Fleurs, Nombre_Fruits, tige[i], i = 1..tmax
Responsabilités: <i>vivacité:</i> $CYCLEPRODUCTION = ((Climat_Proto). (Germination_Proto))^{min..max} \cdot (Fixation_Proto)^{min2..max2} [[Accroissement] \parallel (Floraison.Fécondation.Production)]^\omega$ FÉCONDATION = Nectar_Request.Nectar_response GERMINATION_PROTO = (ClimatRequest.ClimatRespond.Germer) FIXATION_PROTO = (FixationRequest.FixationRequest)+ <i>sûreté:</i> (SuccessfullyPasted == true \Rightarrow germination) ((Nombre_Fleurs \geq 0) et (Nombre_Fruits \geq 0) et (0 \leq taux_Fécondité \leq 1) et (0 \leq taux_Productivité \leq 1))

assurent que les services du rôles seront réalisés dans de bonnes conditions. Par exemple, la germination ne peut avoir lieu que si le germe a été collé avec succès à la branche de l'hôte.

3.1.4. Modèle d'agents

Le modèle d'agents présente les différents agents du système ainsi que les rôles que chacun peut jouer pendant le fonctionnement du système. Dans ce modèle, chaque classe d'agent est marquée par la multiplicité d'agents de celle-ci nécessaire au fonctionnement du système.

Figure 1. Modèle d'agents de notre système



La figure 1 présente le modèle d'agents de notre système. Sur ce modèle, nous pouvons distinguer les agents *Gui* dont le nombre est variable dans notre système (multiplicité 1..n), l'agent *climat* dont le rôle est de simuler un modèle de variation des saisons, les agents *Hôte* dont le nombre est supposé non variable dans notre système (multiplicité 1..MaxHôte) et les agents *Oiseau* dont le nombre est aussi supposé non variable dans le système. Les différents rôles joués par ces agents sont représentés.

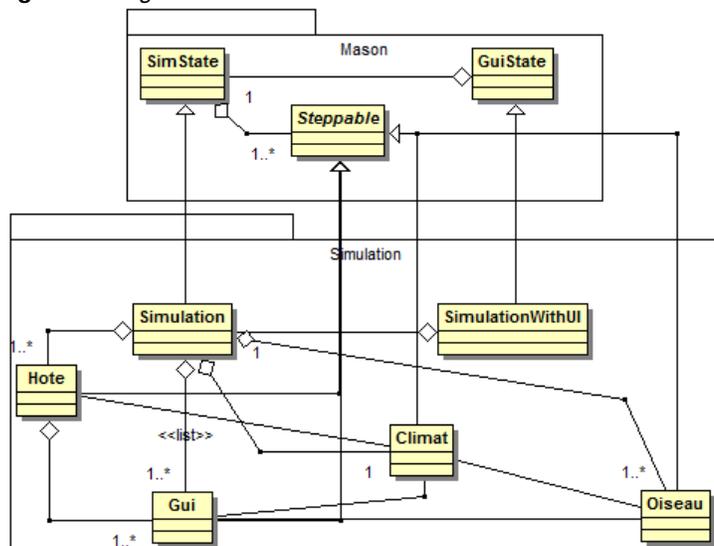
3.2. Implémentation sur MASON

En ce qui concerne l'implémentation, la plateforme MASON a été utilisée. Elle est constituée d'un ensemble de bibliothèques écrites en Java. Elle est adaptée pour la simulation de systèmes multiagent. Elle offre des facilités pour la définition d'agents et la gestion de leur cycle de vie (création, vie et destruction), la visualisation des variables dans un environnement multiagent, l'implémentation des fonctions stochastiques, les mécanismes de contrôle et de communication entre agents du SMA.

Mason est ainsi un ensemble de classes Java conçues pour assister le développeur à la création d'un système multiagent. La figure 2 illustre le diagramme de classe de notre simulation. Sur cette figure, on peut noter la présence de 2 packages, *Mason* et *Simulation*, représentant respectivement l'environnement MASON et notre simulation.

Dans l'environnement MASON, une simulation est simplement une instance de la classe *SimState* agrégeant des objets dont la classe dérive l'interface *steppable* qui sont des agents. La classe *GUIState* permet d'ajouter une interface graphique à la simulation et par cette interface graphique peut visualiser les variables dont les *getter* ont été défini dans la classe dérivée de *SimState(Simulation)*. Le diagramme de classe de cette figure simplifie la présentation de l'environnement MASON. Les agents de notre système se retrouvent dans le package *Simulation*. On y distingue les agents de la classe *Gui* implémentant les comportements des parasites, les agents de la classe *Hôte* implémentant les

Figure 2. Diagramme de classes



comportements des arbres hôtes des guis et les agents de la classe *Oiseau* implémentant les comportements des oiseaux.

4. Analyse du modèle

Après implémentation du modèle, l'évaluation de ses résultats a été faite. La validation du modèle a été faite par des tests statistiques, notamment le test de différence des moyennes.

4.1. Paramètres d'entrée et sortie du modèle

Compte tenu de la description du gui telle que présentée dans la littérature et dans notre modèle GAIA, les paramètres d'entrée du modèle qui ont été retenus pour l'analyse sont récapitulés dans le tableau 3. Les paramètres de sorties retenues pour l'analyse de sensibilité sont les suivants:

- 1) Le **taux d'infestation** (proportion d'hôtes infectés)[11, 2]. Ce paramètre mesure le nombre d'hôtes infectés après chaque pas de temps de la simulation ;
- 2) L'**intensité d'infestation** (proportion de gui par hôte infecté)[11, 2], ce paramètre donne le nombre moyen de touffes de guis par hôte infecté.
- 3) La **distance moyenne** séparant les guis issus de l'infection secondaire et de l'infection primaire. Ce paramètre pourrait aider à expliquer la propagation à longue portée du gui.

Cette liste de paramètres de sortie n'est pas exhaustive, en effet, le choix est conduit par les objectifs du travail.

4.2. Analyse de sensibilité

La technique d'analyse de sensibilité utilisée est l'analyse de sensibilité locale. Pour chaque paramètre d'entrée du modèle, un lot de 30 simulations est effectué pour la valeurs

Tableau 3. Paramètres d'entrées du modèle

Paramètre	Interprétation	base ⁴	référence
NbOis	Nombre moyen d'oiseaux présents dans le champ par jour	20	
DureeTranInt	Temps de traversée moyen de graines ingérées dans l'intestin de l'oiseau	30 min	[9]
NbBaiesConsJ	Quantité moyenne de guis consommée par un oiseau par jour	80	[9]
NbBaiesPlants	Nombre de baies de guis produites en moyen par une branche de gui mature par floraison	100	[1]
TempsVieBaies	temps qui sépare la maturation de la chute des baies mures	80 jours	
SensNat	Sensibilité naturelle (probabilité de fixation d'un gui sur un hôte)	0.465	
Compétition	Probabilité que le plant de gui survive à la compétition	0.465	
AgeHotes	Age initial des hôtes au début de la simulation	10 ans	[4]
Taux Endozoochore	Proportion d'oiseaux mange-gui de type endozoochore	0.4	

de base, la valeur de base modifiée de $\pm 10\%$ enfin la valeur de base modifiée de $\pm 50\%$; et pour chaque lot, la moyenne à chaque pas de temps des valeurs de sortie pour chaque paramètre de sortie est calculée. L'analyse de sensibilité consiste alors à calculer les indices de sensibilité et les taux de variations suivant les formules suivantes appliquées à chaque pas de temps.

$$S_{ji} = \frac{\log(y_j) - \log(y_{jb})}{\log(x_i) - \log(x_{ib})} \quad [1]$$

où y_{jb} et y_j représentent respectivement, les sorties du modèle obtenues avec les paramètres d'entrées de bases (x_{ib}) et ce jeu de paramètres après modification d'un paramètre (x_i).

L'interprétation de ces indices est la suivante:

– un indice de sensibilité égal à 1 indique que le taux de variation du paramètre donné entraîne le même taux au niveau des sorties ;

– une valeur négative indique que les entrées et les sorties varient en sens inverse : plus grand est l'indice en valeur absolue plus grand est l'influence paramètre sur la sortie.

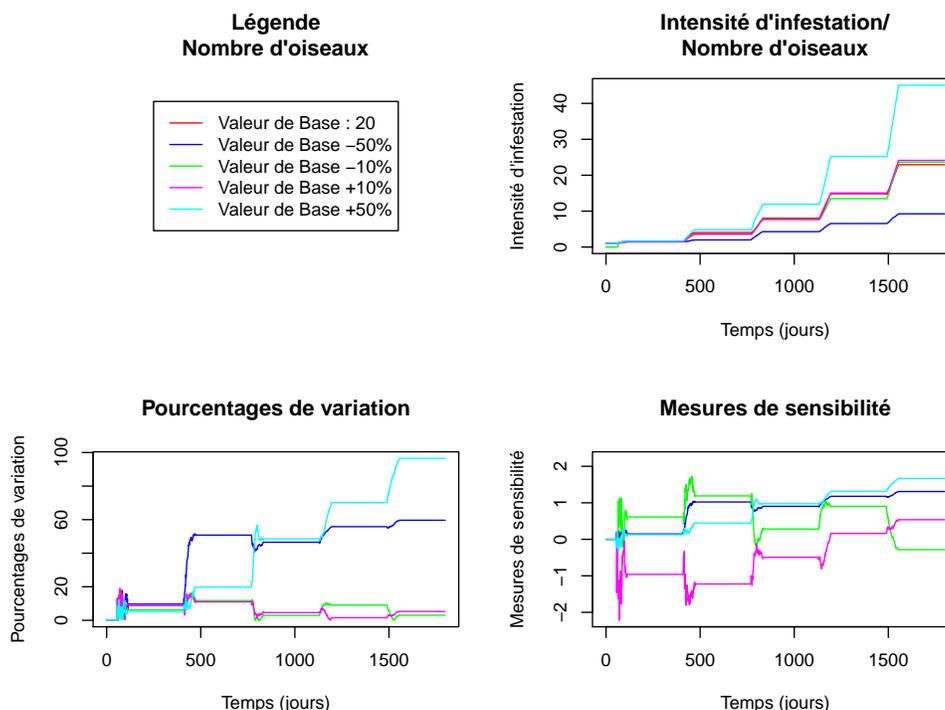
– une valeur positive indique que les entrées et les sorties varient dans le même sens. De plus le pourcentage de variation défini à l'équation 2 donne les proportions de cette variation par rapport aux sorties pour les valeurs de base du paramètre.

$$\%variation = \left| \frac{S2 - S1}{S1} \right| * 100 \quad [2]$$

5. Analyse et interprétation des résultats de la simulation

La figure 3 présente les indices de sensibilités et pourcentages de variations de l'intensité d'infestation par rapport au nombre (moyen) d'oiseaux visitant la plantation cible.

Figure 3. Indices de sensibilités de l'intensité d'infestation au nombre d'oiseaux



La figure 3 montre que de faibles variations ($\pm 10\%$) du paramètre *nombre d'oiseaux* autour de sa valeur de base (20) ont un faible ($\pm 7.5\%$) impact sur la sortie comparé aux variations de l'ordre de $\pm 50\%$ qui provoquent des variations allant de 20 à 90 % au bout de 5 ans et dans le sens de la variation. En outre, on peut constater sur ces courbes une tendance de ces différents indices de sensibilité à diverger à la fin de la simulation pour la valeur du paramètre augmentée de 50%. Ce qui montre une influence forte du nombre d'oiseaux sur la propagation du gui à l'échelle d'un arbre hôte. Cette influence locale forte s'explique par l'efficacité des oiseaux à la propagation du gui.

En considérant les autres paramètres, les résultats suivants consignés dans le tableau 4 n'ont pas pu être représenté par des courbes ici, faute de place. Chaque valeur du tableau représente la moyenne sur 5 années de la variation moyenne pour 30 simulations lorsque l'on a fait varier le paramètre de la ligne du pourcentage sur la colonne. Ainsi sur la ligne **temps de vie des baies**, pour une diminution de 50 % du temps de vie des baies, on observe une diminution (le signe -) de 44% de l'intensité d'infestation et de 42 % du taux d'infestation. Les autres variations du même paramètre montrent des variations des sorties dans le sens de variations. Pour le paramètre **distance moyenne** qui présente des fluctuations non monotones (-9%, -7%, -10% et -15% respectivement) sur ses sorties par rapport aux variations (-50%, -10%, +10% et , +50%) de l'entrée, un test de différences des moyennes a montré que ces fluctuations ne sont significatives qu'avec une probabilité de $\alpha = 0.05$. Ceci permettant de conclure que le **temps de vie des baies** n'influence pas significativement la distance de propagation des guis.

Tableau 4. Résumé des influences des paramètres d'entrée sur les sorties du modèle

	Intensité d'infestation			Distance Moyenne			Taux d'infestation		
	-50	-10	+50	-50	-10	+50	-50	-10	+50
variati- ons(%)									
Age Hôtes	-6	-12	+13	-10	-9	-14	-21	-5	+9
Facteur de com- pétition	+25	+8	-12	-32	-10	-7	+28	+7	-18
Sensibilité Naturelle	+8	+3	-5	-6	-3	-12	+9	+5	+7
Temps de vie des baies	-44	-20	+19	+75	-12	-14	-42	-16	+17
Nombre de baies branche	-20	-7	+6	+7	-6	-8	-6	-4	+2
Consomma- tion oiseaux	-9	-7	-4	-4	-13	+2	+6	-3	+6
Nombre d'oiseaux	-42	-6	+6	+44	-15	-5	-54	-3	+6
Transite intesti- nal	-12	-7	+7	+5	-7	-4	-17	-13	+9
Taux d'endozochoire	-6	-5	+10	+10	-10	-5	-4	-8	+8

5.1. Discussion

L'étude proposée dans les sections précédentes a permis d'obtenir un certain nombre de résultats. Ceux-ci font l'objet d'une comparaison avec les résultats connus de la littérature dans cette section. L'intensité d'infestation mesure le nombre moyen de touffes de gui par hôte infesté dans une population d'hôtes et le taux d'infestation modélise la proportion d'hôtes infectés dans une population. Les analyses précédentes montrent que l'intensité d'infestation et le taux d'infestation sont influencés par les paramètres suivants: la disponibilité des baies de gui, le nombre d'oiseaux, la quantité de baies produite par floraison, l'âge des hôtes, la sensibilité naturelle des plante à l'espèce de gui et le facteur de compétition entre les guis. Ces influences permettent de tirer les conclusions suivantes, tout en prenant en compte les connaissances de la littérature sur le gui:

- La disponibilité des baies de guis mesure le temps de l'année pendant lequel les baies de gui mûres resteront disponibles pour la consommation des oiseaux et par là, pour la propagation. Ce paramètre modélise le nombre de floraisons par an. Les résultats suggèrent que les guis qui fleurissent plusieurs fois l'année ont une forte expansion. Ce résultat apparaît également dans [1].

- Les oiseaux sont désignés dans la littérature comme principaux responsables de la dissémination du gui[1, 9]. Une infestation accrue à l'échelle d'une station est souvent attribuée aux oiseaux dont le mécanisme de consommation des baies de gui n'oblige pas le transit par l'intestin. Les analyses des résultats obtenus montrent une forte dépendance de l'intensité d'infestation aux nombre d'oiseaux, ce qui est conforme avec la littérature[9, 1], mais ces travaux montrent que l'on ne peut imputer aux oiseaux la responsabilité d'une propagation à longue portée du gui. En effet, l'étude sur la distance couverte par le gui, montre que seuls le temps de transit intestinal des baies de guis et taux d'endozoorchores influent positivement sur la dispersion à grande distance du gui. Ces influences restent pourtant assez faibles;

- La quantité de baies produites par floraison et par plant de gui modélise la production de gui par plant. Les résultats obtenus dans notre étude montrent que cette variable, qui est dépendante de l'espèce de gui et de sa zone de culture[8] influence la propagation du gui à l'échelle d'une plantation comme à celle d'un arbre. En effet plus il y a de baies produites, plus les oiseaux en consomment, même en un nombre de jours restreint. Par contre, les analyses ont montré des différences non significatives (par un test de différence des moyennes) lorsque l'on fait varier la quantité de baies de gui consommées par oiseau et par jour.

- Durand *et al.*[4] montrent que le gui s'installe avec plus d'aisance sur les hôtes vieillissants, cela est en accord avec les résultats obtenus dans le présent travail. D'autres auteurs[9] font d'ailleurs cette même affirmation.

- Un indice de compétition entre les plants de gui d'un hôte a été défini. Les analyses de sensibilité du taux et de l'intensité d'infestation par rapport à cet indice de compétition montrent une dépendance négative. Ce qui signifie que les plants de gui qui se tolèrent mutuellement auraient une forte expansion. La tolérance d'un plant de gui à un autre est abordée implicitement par Nierhaus *et al.* dans [9] qui évoquent les guis parasitant d'autres guis. D'autre part, le nombre et la taille des branches des hôtes peut engendrer une influence positive en faveur de cette compétition.

6. Conclusion et perspectives

Ce travail propose un modèle de la dynamique de la propagation de la parasitose végétale nommée “gui d’Afrique”. Ce modèle basé sur les concepts de systèmes multiagents, supporté par la méthodologie GAIA, a été implémenté en utilisant la bibliothèque de simulation des SMA, MASON. Des analyses de sensibilité des sorties par rapport aux entrées ont été faites.

Les résultats de ces analyses montrent qu’en laissant libre la reproduction des oiseaux, le risque d’une expansion accrue de gui est élevé. De plus, les guis ayant de grandes productions fruitières présentent également une expansion rapide. Il a également été montré que les guis fleurissant plusieurs fois l’année se répandraient plus rapidement et que cette expansion s’accentuerait dans une population vieillissante. Concernant le niveau local à un arbre, il a été montré que l’intensité d’infestation croît avec la fréquentation des oiseaux, la disponibilité des baies, l’âge des hôtes et la production des baies. Mais les paramètres choisis semblent mal adaptés pour expliquer une dispersion de gui à grande échelle de distance. Mais ces résultats ne contredisent pas pour autant l’hypothèse que les oiseaux endozoochore sont responsables d’une dissémination de gui à longue portée. A l’échelle de plus grandes surfaces, les oiseaux endozoorchores ont été désignés comme vecteurs de guis à grandes distances.

En perspective, une exploration plus complète du modèle en prenant en compte plus de paramètres pourra être faite, notamment le mélange des espèces d’hôtes et de guis. Des estimations de grandeurs épidémiologiques telles que le nombre de reproduction de base sont envisageables. De plus, comme complément à ce travail, une extension du modèle pour prendre en compte les aléas climatiques dans la sensibilité (vigueur), la croissance et la mortalité des hôtes et l’influence de l’accroissement en biomasse des plants de gui sur la productivité des plantes hôtes afin d’avoir une estimation plus réaliste des pertes de productions.

Une orientation formelle du travail présenté dans cet article pourrait être la conception d’un modèle basé sur les équations différentielles de la propagation du gui.

7. Bibliographie

- [1] I. J. BOUSSIM, G. SALLÉ, S. GUINKO, « Tapinanthus, parasite du Karité au Burkina Faso, 2^{ième} partie: phénologie, biologie et dégâts », *Bois et forêts des Tropiques*, vol. 238, 1993.
- [2] S. D. DIBONG, NDIANG ZENABOU, R. MONY, JOSEPH BOUSSIM ISSAKA, AMOUGOU AKOA, « A parasitic study of phragmanthera capitata (sprengel) s. balle (loranthaceae) in the anthropic environments: The case of the ndogbong chieftain’s compound orchard (douala, cameroon) », *AJAR*, n° 1, 2010.
- [3] S.D. DIBONG, R. MONY, C. F. LADOH, I. J. BOUSSIM, A. AMOUGOU, « Parasitism evolution of Loranthaceae in the Ndogbong chiefdom’s orchard (Douala, Cameroon) », *AJAR*, vol. 5, 2010.
- [4] M. DURAND-GILLMANN, M. CAILLERET, T. BOIVIN, L.-M NAGE LEISEN, H.K. DAVI, « Individual vulnerability factors of Silver fir (*Abies alba* Mill.) to parasitism by two contrasting biotic agents: mistletoe (*Viscum album* L. ssp. *abietis*) and bark beetles (Coleoptera : Curculionidae: Scolytinae) during a decline process », *Annals of Forest Science*, n° doi 10.1007/s13595-012-0251-y, 2012.
- [5] G. M. JANNY, BARBARA J. RITCHIE, J. FLOOD., « A la découverte du cacao: Un Guide pour la formation des facilitateurs », *UK Centre Bakeham Lane*, 2003.

- [6] T. JIOFACK, J. P. DONDJANG , M. SMITH, V. KEMEUZE., « Parasitism of indigenous fruits plants of west high land of Cameroon », *Annales de la Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I*, vol. 37 n° 1, 2004.
- [7] R. B. JIOFACK TAFOKOU, J. P. DONDJANG, B.-A. NKONGMENECK , M. SMITH , V. KEMEUZE, « Diversité et gestion durable des *Loranthaceae* dans les hautes terres de l'Ouest du Cameroun », *Bois et forêts des tropiques*, n° 1 vol. 303, 2004.
- [8] R. MONY, S. D. DIBONG, J. M. ONDOUA, N. L. ENGONE OBIANG, I. J. BOUSSIM, AMOUGOU AKOA, BILONG BILONG, « Contribution of tree ants towards the low production of fruits in *Phragmanthera capitata* (Sprengel) S. Balle (Loranthaceae) », *Journal of Cell and Animal Biology*, n° 6 vol. 4, 2010.
- [9] NIERHAUS-WUNDERWALD, P DAGMAR LAWRENZ, « Biologie du gui », *Not. prat.* , n° 28, 1997.
- [10] B. SONKE, D. KENFACK, M. TINDO, « Parasitisme de l'avocatier (*Persea americana*, Lauraceae) par des Loranthacées dans la région de Yaoundé (Cameroun) », *Fruits*, n° 5 vol. 55, 2000.
- [11] K. SORO, D. SORO, K. N'GUESSAN , G.M. GNAHOUA , D TRAORÉ, « Parasitisme des Loranthaceae sur les hévéas en zone forestière des sous-préfectures de Gagnoa et d'Ourahio, en Côte d'Ivoire », *Journal of Animal & Plant Sciences*, n° 1, vol. 6, 2004.
- [12] SAMUEL, TAMENE K., « Modélisation et simulation à base d'agents de la propagation des loranthaceae (guis d'Afrique) », *Master thesis*, n° 999, 2013, Université de Ngaoundéré.
- [13] M. J. WOOLDRIDGE, N. JENNINGS, D. KINNY, « The Gaia methodology for agent-oriented and design », *Journal of Autonomous agents and multiagent systems*, n° 3 (3), 2000.