

**Faculté des bioingénieurs**

# **Approche exploratoire pour la modélisation basée agent du changement d'occupation du sol dans le bassin versant d'Antsahovy, Madagascar**

Auteur : Benoît Tondeur

Promoteur, co-promoteur : Pr. M. Vanclooster, Pr. J-P. Jaoriziky

Lecteurs : Pr. F. Jonard, Pr. F. Gaspart

Année académique 2018-2019

Master [120] : Bioingénieur en sciences et technologies de  
l'environnement, spécialité ressources en eau et en sol.



## Remerciements

Je tiens à remercier plusieurs personnes pour leur aide, conseil, ou soutien, et qui m'ont suivi dans la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur, le professeur Marnik Vanclooster pour m'avoir permis de réaliser un séjour de terrain à Madagascar, duquel je ressors riche d'expériences. De plus, ses conseils et précieux commentaires m'ont permis d'avancer et d'améliorer petit à petit mon travail.

Aussi, je tiens à remercier Aristide Benitsiafantoka qui m'aura accompagné tout au long du travail de terrain et qui aura su organiser la collecte de données. De plus, je remercie Robin Castermans, Zonirina Ramahaimandimby, Hélène Voahanginirina et l'équipe du CURSA pour l'accompagnement lors du séjour à Madagascar. De même, je remercie et ai une pensée sincère pour le Maire d'Ambarabaha et sa femme pour l'accueil chaleureux pendant les missions en brousse.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien, leurs conseils et leur aide tout au long de ce travail.

# Sommaire

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUCTION</b>  | <b>8</b>  |
| <b>2</b> | <b>ÉTAT DE L'ART</b>   | <b>10</b> |
| 2.1      | MODELISATION BASEE AGENT (AGENT-BASED MODELLING, ABM)            | 10        |
| 2.1.1    | <i>Définition</i>  | 10        |
| 2.1.2    | <i>Caractéristiques</i>  | 10        |
| 2.1.3    | <i>Composants</i>  | 10        |
| 2.1.4    | <i>Plateformes</i>   | 12        |
| 2.1.5    | <i>ABM et LUCC</i>   | 13        |
| 2.1.6    | <i>Modélisation du comportement humain</i>                       | 16        |
| 2.2      | OUTILS POUR IMPLEMENTER ET DECRIRE LES MODELES BASES-AGENT       | 19        |
| 2.2.1    | <i>Introduction</i>  | 19        |
| 2.2.2    | <i>TRACE</i>   | 19        |
| 2.2.3    | <i>ODD Protocol</i>  | 20        |
| 2.2.4    | <i>ODD+D Protocol</i>  | 21        |
| 2.2.5    | <i>Unified Modelling Language</i>                                | 21        |
| 2.3      | APPLICATIONS   | 23        |
| <b>3</b> | <b>CONTEXTE DE L'ETUDE</b>                                       | <b>25</b> |
| 3.1      | MADAGASCAR   | 25        |
| 3.2      | REGION SAVA  | 25        |
| 3.3      | BASSIN VERSANT ANKAVIA   | 27        |
| <b>4</b> | <b>MATERIEL ET METHODES</b>                                      | <b>28</b> |
| 4.1      | METHODOLOGIE GENERALE  | 28        |
| 4.2      | MISE EN PLACE DE LA BASE DE DONNEES DE PROJET                    | 28        |
| 4.2.1    | <i>Données collectées sur le terrain</i>                         | 28        |
| 4.2.2    | <i>Données génériques</i>  | 29        |
| 4.2.3    | <i>Récapitulatif des données</i>                                 | 30        |
| 4.3      | ANALYSE DES DONNEES  | 31        |
| 4.3.1    | <i>Analyse statistique des caractéristiques des parcelles</i>    | 31        |
| 4.3.2    | <i>Analyse de l'historique de changement d'occupation du sol</i> | 32        |
| 4.4      | IMPLEMENTATION DU MODELE BASE-AGENT                              | 32        |
| 4.4.1    | <i>Environnement</i>   | 32        |
| 4.4.2    | <i>Agents et règles de décision</i>                              | 33        |
| 4.5      | ANALYSE DE SENSIBILITE   | 36        |
| <b>5</b> | <b>RESULTATS</b>   | <b>37</b> |
| 5.1      | BASE DE DONNEES  | 37        |
| 5.1.1    | <i>Données récoltées sur le terrain</i>                          | 37        |
| 5.1.2    | <i>Données génériques</i>  | 37        |
| 5.2      | ANALYSE DES DONNEES  | 41        |
| 5.2.1    | <i>Statistiques univariées</i>                                   | 41        |
| 5.2.2    | <i>Modèles de régression logistique et ANOVA</i>                 | 42        |
| 5.2.3    | <i>Analyse de l'historique de changement d'occupation du sol</i> | 43        |
| 5.3      | MODELE MULTI-AGENTS  | 47        |
| 5.3.1    | <i>Implémentation du modèle</i>                                  | 47        |
| 5.3.2    | <i>Sorties du modèle</i>   | 48        |
| 5.4      | ANALYSE DE SENSIBILITE   | 51        |
| <b>6</b> | <b>DISCUSSION</b>  | <b>53</b> |
| 6.1      | BASE DE DONNEES  | 53        |
| 6.2      | ANALYSE DES DONNEES  | 54        |
| 6.3      | MODELE MULTI-AGENTS  | 55        |
| 6.4      | ANALYSE DE SENSIBILITE   | 56        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>7</b> | <b>CONCLUSION .....</b>   | <b>57</b> |
| <b>8</b> | <b>ANNEXES.....</b>   | <b>59</b> |
| 8.1      | ANNEXE 1 : INTERFACE NETLOGO 6.0.4 DU MODELE PRODUIT .....                        | 59        |
| 8.2      | ANNEXE 2 : DONNEES RECOLTEES SUR LES PARCELLES VISITEES (GPS, PHOTOS, NOTES)..... | 61        |
| 8.3      | ANNEXE 3 : FORMULAIRE D'ENQUETES (A. BENITSIAFANTOKA).....                        | 63        |
| 8.4      | ANNEXE 4 : CODE GOOGLE EARTH ENGINE .....   | 65        |
| 8.5      | ANNEXE 5 : CODE R.....  | 67        |
| 8.6      | ANNEXE 6 : CODE NETLOGO .....   | 68        |
| 8.7      | ANNEXE 7 : CARTES DE PENTE ET D'EXPOSITION PRODUITES VIA QGIS .....               | 73        |
| 8.8      | ANNEXE 8 : TABLEAU DES DONNÉES DES PARCELLES .....                                | 74        |
| <b>9</b> | <b>RÉFÉRENCES .....</b>   | <b>75</b> |
| 9.1      | BIBLIOGRAPHIE .....   | 75        |
| 9.2      | NETOGRAPHIE.....  | 77        |

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| FIGURE 1 : STRUCTURE DU PROTOCOLE ODD+D. LES CASES GRISEES INDIQUENT LES NOUVELLES CATEGORIES COMPAREES AU PROTOCOLE ODD. LE NOMBRE DE QUESTIONS AJOUTEES EST NOTE ENTRE PARENTHESES. A DROITE LES DIFFERENTS ASPECTS DE LA NOUVELLE CATEGORIE "INDIVIDUAL DECISION MAKING" SONT INDIQUES. PAR MÜLLER ET AL. (2012). .....             | 21 |
| FIGURE 2 : DIAGRAMME DE CLASSE DU MODELE "SLASH-AND-BURN" PAR LE PAGE ET BOMMEL (2005) .....   | 22 |
| FIGURE 3 : SITUATION DE LA REGION SAVA ET DU BASSIN D'ANKAVIA .....  | 26 |
| FIGURE 4 : DECOUPE DES SOUS BASSINS VERSANTS D'ANKAVIA .....   | 27 |
| FIGURE 5 : CARTE DE LA SITUATION DU VILLAGE D'AMBARABAHA ET DU SOUS BASSIN MODELISE DANS LE BASSIN VERSANT D'ANTSAHOVY .....   | 28 |
| FIGURE 6 : CARTE DE LA SITUATION DES PARCELLES VISITEES AUTOUR DU VILLAGE D'AMBARABAHA .....   | 37 |
| FIGURE 7 : CLASSIFICATION DE L'OCCUPATION DU SOL EFFECTUEE VIA GOOGLE EARTH ENGINE ET IMAGE SENTINEL 2 D'ORIGINE .....   | 38 |
| FIGURE 8 : COMPARAISON DES SIGNATURES SPECTRALES DES PARCELLES DE RIZ ET DE VANILLE. BANDES : B2 = ROUGE ; B3 = VERT ; B4 = BLEU ; B8 = PROCHE INFRA-ROUGE .....   | 39 |
| FIGURE 9 : IMAGE BING AERIAL ET CLASSIFICATION NON SUPERVISEE REALISEE .....   | 40 |
| FIGURE 10 : CARTES DE COUVERTURE DU SOL ESACCI-LC DANS LE BASSIN D'ANTSAHOVY POUR LES ANNEES 1997 ET 2000 .....  | 44 |
| FIGURE 11 : ÉVOLUTION DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL IMAGES ESACCI-LC DE 1992 A 2015. CLASSES 40, 50 ET 100, AXE PRIMAIRE. CLASSES 10, 30 ET 60 : AXE SECONDAIRE. ....  | 45 |
| FIGURE 12 : PHOTOGRAPHIE D'UNE PARCELLE DE VANILLE AUX ALENTOURS DU VILLAGE D'AMBARABAHA, REGION SAVA, MADAGASCAR. JANVIER 2019. ....  | 46 |
| FIGURE 13 : ÉVOLUTION DE L'ENVIRONNEMENT DU MODELE NETLOGO. PATCHS : JAUNE : CLASSE INTERMEDIAIRE ; ORANGE : FORET ; BLEU : COURS D'EAU ; VERT : RIZ PLUVIAL PRESENT OU AYANT ETE PRESENT ; ROUGE : VANILLE PRESENTE OU AYANT ETE PRESENTE. SYMBOLES : PLANTE : CULTURE DE RIZ ; FLEUR : CULTURE DE VANILLE ; PAPILLON : JACHERE. .... | 48 |
| FIGURE 14 : ÉVOLUTION DES SURFACES DES CLASSES D'OCCUPATION DU SOL ET DU NOMBRE D'AGRICULTEURS. INTERMEDIAIRE, JACHERE : AXE PRIMAIRE. FORET, VANILLE, RIZ ET AGRICULTEURS : AXE SECONDAIRE .....  | 49 |
| FIGURE 15 : INTERFACE NETLOGO .....  | 59 |
| FIGURE 16 : PARTIE INFORMATIONS DU MODELE NETLOGO .....  | 59 |
| FIGURE 17 : CODE NETLOGO.....  | 60 |
| FIGURE 18 : CARTE D'ORIENTATION DES PIXELS DANS LE BASSIN D'ANKAVIA.....   | 73 |
| FIGURE 19 : CARTE DE PENTE DES PIXELS DANS LE BASSIN D'ANKAVIA.....  | 73 |

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| TABLEAU 1 : RECAPITULATIF DES DONNEES DE LA BASE DE DONNEES.....   | 31 |
| TABLEAU 2 : RESULTATS DE L'ANOVA POUR LES SIGNATURES SPECTRALES DES PARCELLES DE RIZ ET DE VANILLE. H0 : LA VARIABLE EST<br>UNE SOURCE DE VARIATION SIGNIFICATIVE. CODES DE SIGNIFICATIVITE : 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 '' 1 ..... 39 | 39 |
| TABLEAU 3 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DES CARACTERISTIQUES DES PARCELLES VISITEES.....   | 41 |
| TABLEAU 4 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE LA PENTE DES PARCELLES VISITEES .....   | 41 |
| TABLEAU 5 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE LA DISTANCE DES PARCELLES AU COURS D'EAU .....  | 41 |
| TABLEAU 6 : STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE LA DISTANCE DES PARCELLES AU VILLAGE .....  | 41 |
| TABLEAU 7 : RESULTATS DU MODELE DE REGRESSION LOGISTIQUE SUR 23 OBSERVATIONS.....  | 42 |
| TABLEAU 8 : RESULTATS DU MODELE DE REGRESSION LOGISTIQUE SUR 23 OBSERVATIONS (SUITE) .....   | 42 |
| TABLEAU 9 : RESULTATS DE L'ANOVA POUR LES CARACTERISTIQUES DES PARCELLES. CODES DE SIGNIFICATIVITE : 0 '***' 0,001 '**'<br>0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 '' 1.....   | 43 |
| TABLEAU 10 : LEGENDE DE LA FIGURE 11, CLASSES D'OCCUPATION DU SOL .....  | 45 |
| TABLEAU 11 : VALEURS DES PARAMETRES UTILISES DANS LA SIMULATION .....  | 50 |
| TABLEAU 12 : DIFFERENCES DE NOMBRE DE PATCHS DES DIFFERENTES CLASSES POUR CHAQUE PARAMETRE ANALYSE DANS L'ANALYSE<br>DE SENSIBILITE .....  | 51 |
| TABLEAU 13 : DONNÉES DISPONIBLES SUR LES PARCELLES VISITÉES.....   | 74 |

## Liste des abréviations

|           |  |
|-----------|--|
| ABM       | Agent-Based Modelling  |
| ARES-CCD  | Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur – Commission de Coopération au Développement |
| CURSA     | Centre Universitaire de la Région SAVA   |
| ESACCI-LC | European Space Agency Climate Change Initiative – Land Cover                                   |
| GIRE      | Gestion Intégrée des Ressources en Eau   |
| GPS       | Global Positioning System  |
| LUC       | Land Use and land Cover Change   |
| ODD       | Overview, Design concepts, Details   |
| QGis      | Quantum GIS  |
| SAVA      | Sambava, Antalaha, Vohémar, Andapa   |
| SMA       | Système Multi-Agents   |
| SRTM      | Shuttle Radar Topography Mission   |
| SIG       | Système d'Information Géographique   |
| UML       | Unified Modelling Language   |

# 1 Introduction

La région SAVA (Sambava, Antalaha, Vohémar, Andapa) située au Nord-Est de Madagascar, est affectée par des risques hydriques tels que les crues, inondations, cyclones, glissements de terrain, érosion, ou encore sécheresse, ainsi qu'à leurs conséquences sociétales, écologiques, et économiques. De plus, une déforestation incontrôlée, une gestion foncière problématique et le changement climatique accentuent ces risques et événements. Enfin, les besoins en eau s'accroissent progressivement et la répartition entre secteurs est parfois conflictuelle.

Afin de remédier à ces problèmes, il est donc nécessaire de comprendre la dynamique hydrologique des bassins versants touchés. Une approche de GIRE (Gestion Intégrée des Ressources en Eau) a été choisie pour aborder cette situation, prenant donc en compte l'ensemble des paramètres influençant les régimes hydrologiques. Ces régimes dépendant en partie de l'occupation du sol, il est important de pouvoir modéliser le changement d'occupation du sol de ces bassins, et ce en lien avec les activités humaines interagissant avec l'environnement.

Dès lors, ce mémoire s'inscrit dans le projet GIRE-SAVA, lancé en 2017 en partenariat entre l'UCLouvain et le CURSA (Centre Universitaire Régional de la SAVA) entre-autres, et financé par l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur, Commission de Coopération au Développement (ARES-CCD). Le projet vise à renforcer les capacités en gestion intégrée des ressources en eau de la région SAVA à Madagascar, en étudiant le bassin d'Ankavia.

Dans ce cadre, le mémoire a pour objectif la mise en place d'un modèle multi-agents reproduisant la distribution de l'occupation du sol dans le bassin versant d'Antsahovy et de sa dynamique de changement. Pour ce faire, 3 objectifs spécifiques ont été définis. Premièrement, la construction d'une base de données comprenant des informations physiques et socio-économiques sur le bassin versant d'Antsahovy. Deuxièmement, l'analyse de la dynamique présente dans le bassin via une analyse statistique. Et troisièmement, l'implémentation du modèle en lui-même.

Afin de répondre à ces objectifs, une étude de littérature a permis d'analyser les différentes méthodes de construction d'un modèle basé agent. Cette technique de modélisation et ses composants sont d'abord définis. Ensuite, les plateformes de modélisation sont abordées, et les méthodes de modélisation en lien avec l'occupation du sol sont présentées. Par après, les outils d'implémentation et de caractérisation du modèle sont eux

aussi présentés. Finalement, des applications en lien avec le mémoire sont proposées à titre illustratif.

Ensuite, des enquêtes ont été réalisées par un doctorant malgache et des données GPS ont été récoltées lors d'un séjour à Madagascar en janvier-février 2019. Ces données visent à fournir les informations nécessaires à la mise en place d'un modèle basé agent reproduisant la dynamique de changement d'occupation du sol aux alentours du village étudié, permettant ainsi de faire le lien entre les activités humaines dans le bassin et les modèles hydrologiques.

Outre les données récoltées sur le terrain, d'autres données ont été générées ou récupérées dans la base de données du projet GIRE-SAVA. Celles-ci ont ensuite été analysées afin d'en tirer des informations sur la dynamique de changement d'occupation du sol et sur la prise de décisions des agents modélisés.

Enfin, il a été possible d'implémenter un modèle basé-agents sur base des informations recueillies, et la sensibilité des paramètres a été analysée.

## 2 État de l'art

### 2.1 Modélisation basée agent (Agent-Based Modelling, ABM)

#### 2.1.1 Définition

La modélisation basée agent, agent-based modelling en anglais, est un type de modélisation qui permet de représenter les actions individuelles de divers agents afin d'observer le comportement du système global ainsi que les sorties. Ceci permet de faciliter la compréhension des processus du système (Heppenstall et al., 2012). Elle permet d'intégrer les caractéristiques des agents et de leur environnement, ainsi que les interactions entre ceux-ci. L'ensemble de ces agents forme un système multi-agent (SMA). De nombreuses applications de SMA existent, allant de la biologie à l'économie, en passant par l'art, la chimie et bien d'autres. Dans le cas de ce mémoire nous parlerons d'applications LUCC (Land Use and Cover Change), ou changement d'occupation et d'utilisation du sol étant donné l'objectif du modèle créé.

Dans les systèmes multi-agents, 3 points sont particulièrement importants à caractériser (Multi-Agent Systems, [cormas.cirad.fr](http://cormas.cirad.fr)) :

- la prise de décision des agents ;
- le contrôle hiérarchique entre les agents ; et
- la communication entre agents.

#### 2.1.2 Caractéristiques

Selon A. Gaudieux (2017), un système multi-agents peut être :

- ouvert ou fermé, selon que les agents entrent et sortent du système ou non ; et
- homogène ou hétérogène, selon que les agents ont les mêmes caractéristiques ou non.

#### 2.1.3 Composants

Les systèmes multi-agents sont composés d'agents autonomes, d'un environnement via lequel ils interagissent, de règles qui définissent la relation entre les agents et de règles qui déterminent la séquence d'actions dans le modèle (Parker et al., 2001). Cette section vise à décrire les composants agent et environnement d'un tel système.

### 2.1.3.1 Agents

Un agent est une entité autonome agissant dans un environnement et ayant des interactions avec d'autres agents du système. Celui-ci peut représenter une entité réelle individuelle ou un groupe d'individus. Les actions d'un agent influent sur les autres agents ainsi que sur l'environnement. Les principales caractéristiques des agents sont ici présentées, sur base du livre *Agent-Based Models of Geographical Systems (2012)*.

**Autonomie** : les agents sont capables de traiter et d'échanger de l'information ainsi que d'interagir de manière autonome avec d'autres agents et l'environnement.

**Hétérogénéité** : les agents peuvent avoir des attributs différents. Par exemple, différents agents « humain » ont un âge et un sexe différents.

**Activité** : les agents peuvent être actifs de différentes manières :

- Proactif : l'agent a un objectif qu'il tente d'atteindre ;
- Réactif : l'agent peut sentir son environnement et réagir selon lui ;
- Rationalité délimitée : les agents ne suivent pas une logique purement rationnelle dans la prise de décision, celle-ci dépend aussi du contexte et des connaissances de l'agent ;
- Interactif : l'agent peut communiquer avec d'autres agents ;
- Mobile : l'agent peut se déplacer dans son environnement ; et
- Adaptatif : l'agent peut adapter sa prise de décision en fonction de différents paramètres tel que les actions précédentes.

Les systèmes multi-agents étant basés principalement sur la modélisation des agents individuels, il est important de caractériser la prise de décision des agents de manière adéquate. Or, la modélisation du comportement humain, comme dans le cas de ce mémoire, est un processus compliqué pour lequel il n'existe pas de solution parfaite. La section 2.1.6 approfondit cette problématique.

### 2.1.3.2 Environnement

L'environnement désigne l'espace dans lequel les agents interagissent. Il représente tout ce qui n'est pas l'agent. Celui-ci peut être statique ou dynamique, borné ou non, et peut prendre plusieurs formes : physique, social, ... (Gaudieux, 2017). Les agents, via leurs actions, peuvent modifier l'environnement de manière durable ou non, et leurs actions peuvent elles-mêmes dépendre de l'état de l'environnement. Selon Bousquet Le Page (2004), de nombreuses applications utilisent l'environnement comme un set de signaux pour le mouvement, la reproduction, ou le choix des tâches par les agents. L'environnement joue par

ailleurs un rôle important dans les interactions entre agents dans le cas où ceux-ci sont spatialement situés et ne peuvent interagir qu'avec leurs voisins.

## 2.1.4 Plateformes

### 2.1.4.1 Choix de la plateforme

De nombreuses plateformes permettent la modélisation basée agent. Les plus populaires sont Repast, SAWRM, MASON, NetLogo, ou encore CORMAS pour en nommer quelques-unes. Le choix doit donc se faire sur base de critères prédéfinis par le modélisateur.

Dans le cadre de ce mémoire, ce choix est principalement basé sur :

- la facilité d'apprentissage : le but étant de ne pas perdre trop de temps sur l'étape d'apprentissage du programme ;
- la disponibilité de documentation : celle-ci facilitant l'apprentissage ;
- l'efficacité de la plateforme ;
- le type de licence : aucun moyen financier n'étant dédié à l'achat d'une licence
- le système d'exploitation nécessaire ;
- l'importance de la communauté d'utilisateurs ; et
- la capacité d'intégration de système d'information géographique (SIG).

Au vu de ces critères, la plateforme NetLogo a été choisie. Celle-ci étant par ailleurs désignée comme étant la meilleure plateforme de simulation multi-agents en 2012 dans le livre *Agent-Based Models of Geographical Systems(2012)*, et mentionnée maintes fois dans la littérature. De plus, la comparaison entre différentes plateformes de modélisation multi-agents dans la thèse de Gaudieux (2017) met en évidence les éléments suivants :

- NetLogo dispose de nombreux tutoriels et d'une documentation conséquente ;
- une large communauté internationale utilise cette plateforme ;
- l'apprentissage est facile même pour un non-informaticien ;
- le logiciel est gratuit ;
- NetLogo a déjà permis l'implémentation d'un environnement riche ;
- la vitesse de modélisation apparaît comme moyenne pour les plateformes comparées ;
- la plateforme est disponible sur Mac OS X ;
- il est possible d'y intégrer des données SIG ; et
- un grand nombre d'applications existent dans différents domaines.

#### 2.1.4.2 NetLogo

NetLogo est donc un environnement gratuit de modélisation multi-agents, disponible sur <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, et utilisé par une large communauté internationale. Il permet de simuler des systèmes complexes évoluant dans le temps et comprendre les connections entre le niveau « micro » (comportement individuel des agents) et « macro » (évolution du système) (NetLogo 6.0.4 User Manual).

L'environnement se compose de 3 parties, à savoir l'interface, les informations, et le code. Les figures Figure 15, Figure 16 et Figure 17 en Annexe 1 donnent un aperçu de ces 3 parties pour le modèle « Sheep – Wolf Predation » disponible sur NetLogo.

NetLogo est composé de 4 types d'agents différents (Gaudieux, 2017), à savoir :

- l'observateur, qui ordonne les actions aux agents ;
- les « patches », qui correspondent à la grille sur laquelle des agents interagissent ;
- les « turtles », qui sont les agents situés et mobiles ; et
- les « links », qui représentent les liens entre agents.

De plus, il est possible d'ajouter des variables globales (propres à tout le modèle) et des variables locales (propres à un sous-modèle).

#### 2.1.5 ABM et LUCC

Dans le cas de ce mémoire, l'objectif est de créer un modèle reproduisant la dynamique du changement de l'occupation du sol, appelée LUCC, pour Land Use and Cover Changes en anglais, dans un bassin versant malgache. Les modèles multi-agents pour ce type d'application combinent un automate cellulaire représentant l'environnement étudié avec un modèle multi-agents représentant les interactions et prises de décision humaines (Parker et al., 2003). Selon Matthews et al. (2007), la première mention de ce type d'application date de 1993, par Lansing et Kremer, concernant les systèmes d'irrigation en Indonésie. Les avantages d'utiliser des modèles multi-agents dans de telles applications sont multiples. Hare et Deadman (2004) listent la capacité de couplage de modèles social et environnemental, la capacité d'incorporation du micro-niveau de décision en gestion environnementale, et l'étude de l'émergence de réponses collectives aux politiques de gestion environnementale. De plus, Parker et al. (2001) prennent en compte la possibilité de modéliser la prise de décision à

différents niveaux, tels que ceux de l'individu et de l'organisation, ainsi que l'adaptabilité de l'individu et du système.

La modélisation de tels systèmes demande des données à différents niveaux. Comme l'indiquent Robinson et al. (2007), les données relatives aux microprocessus (à savoir la prise de décision au niveau de l'agent) servent essentiellement à la modélisation, tandis que les données relatives aux macro-phénomènes (à savoir l'évolution du système) permettent de valider le modèle.

Afin d'obtenir ces données, différentes méthodes empiriques sont possibles et sont ici exposées sur base de la comparaison faite par Robinson et al. (2007) :

**Enquêtes d'échantillon** : Méthode quantitative visant à collecter des données au niveau de l'individu, du ménage (niveau principalement visé) ou de la communauté en utilisant principalement des questions fermées. Une partie de la population cible est interrogée de manière à représenter la distribution des différentes caractéristiques. Les données récoltées servent en général à modéliser le comportement de l'agent sur base de théories micro-économiques ou à générer une description statistique des caractéristiques de la population. Deux approches ont été utilisées pour implémenter la description statistique dans les modèles basés agents. D'une part, la méthode de Monte Carlo génère une population hétérogène d'agents uniques. D'autre part, l'utilisation d'agents typiques basés sur les données des enquêtes, en nombre proportionnel à leur représentation dans la population.

Les forces de cette méthode sont d'une part la possibilité de représenter l'ensemble de la population sans pour autant interroger chaque acteur. Il est possible de croiser les résultats d'enquêtes faites à différents niveaux ainsi qu'avec les données provenant d'observations. De telles enquêtes peuvent par ailleurs permettre de comprendre les interactions entre acteurs. Cependant, certaines informations peuvent être difficiles à obtenir de la part de l'enquêté, de par un manque de connaissance, une non-volonté de donner ces informations, ou encore par difficulté d'exprimer ses idées de manière quantitative.

**Observation participante** : Méthode anthropologique dans laquelle le chercheur observe et participe au système étudié, le but étant en général de construire un modèle conceptuel en lien avec les observations. Les hypothèses sont donc générées puis testées sur le terrain. Cette méthode peut permettre d'identifier les acteurs clés d'un système et de formuler des explications possibles quant aux interactions entre individus et leurs actions. Les données produites sont de type qualitatif plutôt que quantitatif. Cette méthode peut produire des données détaillées sur les interactions entre agents, leurs motivations, perception du monde, et sur l'hétérogénéité de la population, mais sans donner de chiffres exacts sur les proportions. De plus, des données quantitatives simples peuvent émerger sur base de comptage, telles que le nombre de foyers possédant un jardin, ou encore le temps alloué à

certaines activités. Il est à noter que cette méthode convient mieux à des systèmes à petite échelle, tel qu'un petit village rural.

Les forces de cette méthode viennent de la connaissance détaillée obtenue sur certains problèmes et la capacité d'identifier les relations et conceptions des acteurs. Les faiblesses viennent du fait que le chercheur va sur le terrain sans hypothèse à tester, la méthode est difficilement répétable, ne fournit que très peu d'information quantitative, et est moins favorable aux questions comprenant une composante spatiale (ex : où l'agent fait-il tel action).

**Expériences de terrain et de laboratoire :** Les expériences de laboratoire sont en général des expériences durant lesquelles des personnes (telles que des étudiants) reçoivent de l'argent en échange de leur participation. Les expériences de terrain sont moins abstraites et font participer les utilisateurs des ressources. Ces deux types d'expériences visent à tester des théories de prise de décision. Les participants font face à un certain problème et certaines règles, et les chercheurs observent les résultats du processus de prise de décision. Cette méthode ne vise donc pas à produire des données mais permet de valider ou non des hypothèses de comportement des agents.

Une des forces de cette méthode est d'aider à la création de modèles généraux sur la prise de décision de par le fait que des hypothèses spécifiques sont testées. Cependant, les paramètres culturels et contextuels étant généralement atténués, certains facteurs importants peuvent être omis.

**Modélisation d'accompagnement :** Dans cette méthode, un modèle initial est d'abord créé sur base d'interviews, d'études de terrain et de la littérature. Ensuite, des jeux de rôle sont créés de façon à utiliser le monde virtuel représenté dans le modèle et pour collecter des informations sur la perception du modèle par les acteurs. Enfin, les résultats des jeux sont analysés afin de vérifier les processus du modèle. Afin de limiter les erreurs, les interprétations des chercheurs sont croisées avec des interviews individuelles des acteurs.

Les forces de cette méthode sont qu'elle permet de valider des processus de décision implémentés, facilite la prise de conscience des acteurs du rôle de la modélisation, et fournit une opportunité d'observer les relations entre acteurs. Cependant, ce genre de méthode nécessite souvent une équipe pluridisciplinaire composée de chercheurs en sciences sociales et naturelles. Le rôle du chercheur est par ailleurs parfois difficile à définir, car il peut être médiateur, facilitateur, observateur, ou encore acteur. De plus, les jeux de rôles sont chronophages et peuvent être difficiles à mettre en place en cas de tension entre des communautés ou individus.

**SIG et images de télédétection :** De nombreuses données spatiales sont accessibles grâce à la télédétection. Ces données sont utiles pour définir des variables d'entrées reflétant les moteurs du système. Elles peuvent aussi révéler des facteurs d'influence sur le

comportement des acteurs. Des historiques de données peuvent être utilisées pour tester des hypothèses. Il est possible de produire des cartes de réseaux physiques, d'impédance sur la mobilité, de caractéristiques biophysiques, etc. qui pourront être utilisées dans le modèle.

Les forces sont donc de pouvoir réaliser un historique du système étudié, de couvrir une étendue large, ou encore de pouvoir être disponible gratuitement. Néanmoins, il n'est pas possible d'identifier directement les caractéristiques d'un ménage et il n'est pas toujours aisé d'interpréter les données

Aucune de ces méthodes n'est parfaite et chacune est focalisée sur différents aspects.

### 2.1.6 Modélisation du comportement humain

Comme introduit précédemment, il est nécessaire de pouvoir modéliser le comportement humain en termes de prise de décision face à une situation, vu l'autonomie des agents dans le modèle. Cependant, la validation du modèle de prise de décision est un challenge étant donné que les dynamiques sous-jacentes à la prise de décision chez l'humain sont fondamentalement non observables (Parker et al., 2001).

Concernant la modélisation de la prise de décision des acteurs dans les applications de changement d'occupation et d'utilisation du sol, un article de Groeneveld et al. (2017) démontre que l'utilisation de théories est limitée. En effet, la majorité des modèles étudiés ne font pas explicitement mention de théorie, mais sont plutôt basés sur des implémentations ad-hoc. Néanmoins, lorsqu'une théorie est utilisée, il s'agit généralement de la théorie de l'utilité espérée. De plus, les facteurs de prise de décision ont aussi été étudiés. Il en ressort que ce sont principalement les facteurs économiques tels que le revenu et les prix qui sont le plus pris en compte. Suivent ensuite les facteurs d'accessibilité et environnementaux, pour finir enfin par les facteurs sociaux environnementaux altruistes.

Au vu de la littérature étudiée, il semble ne pas y avoir de consensus quant à la modélisation des décisions humaines. Le livre *Agent-Based Models of Geographical Systems (2012)* donne toutefois une indication sur comment ne pas modéliser le comportement humain. Il considère que la modélisation de celui-ci par de simples phénomènes aléatoires n'est pas correct, étant donné que l'Homme, bien que qu'imprévisible, n'est pas aléatoire. Par ailleurs, certaines approches peuvent être identifiées, et une combinaison de celles-ci peut être utilisée. An (2012) présente 9 types de modèles utilisés dans la modélisation de systèmes couplés homme et nature :

- **Modèles microéconomiques** : Les agents prennent des décisions de manière à maximiser leur profit en fonction de diverses activités, tout en respectant

certaines contraintes. La fonction d'utilité est parfois basée sur un facteur autre que monétaire, tel que des indicateurs écologiques. Grâce à ces fonctions, il est possible de déterminer la probabilité qu'a un agent de choisir telle ou telle option. Cependant, dans la réalité, les agents cherchent d'avantage la satisfaction que l'optimalité. Il est donc intéressant de modifier les théories économiques utilisées de façon à prendre en compte la rationalité limitée des agents.

- **Modèles basés sur la théorie de l'espace** : La localisation d'objets dans l'espace ne détermine pas seulement la distance absolue entre deux objets, mais aussi l'attractivité des objets. En effet, les caractéristiques physiques et sociales de la localisation poussent à prendre en compte la distance relative entre objets ou agents.
- **Modèles psychologiques et cognitifs** : Les agents prennent des décisions en fonction de leur propre carte mentale, leurs capacités (mémoire, apprentissage, ...), croyances, et des normes sociales. Différentes théories existent, comme par exemple la théorie de structuration centrée acteur, selon laquelle l'acteur influence et est influencé par les normes sociales, les cartes cognitives floues, généralement utilisées pour décrire le comportement d'agents en études biologique ou écologique, ou encore la théorie d'organisation computationnelle, selon laquelle les agents apprennent à propos de leur environnement sur base de biais pré-conçus et influencent les autres agents à adopter ces biais.
- **Modèles basés institution** : La théorie postule que les agents se copient mutuellement, soit par respect de normes établies par le gouvernement ou autre institution, soit pour gagner en légitimité par rapport aux autres agents du même environnement. Les institutions peuvent prendre plusieurs formes, à savoir une taxe, une politique, un subside, des standards environnementaux, etc.
- **Modèles basés sur l'expérience ou les préférences** : Ces modèles sont directement dérivés d'observations, de données qualitatives ou quantitatives. Ils sont souvent simples et évidents.
- **Modèles basés agent participants** : Peut être considéré comme une variante du point précédent, dans laquelle des personnes réelles disent au modélisateur ce qu'elles feraient dans certaines conditions grâce à des jeux de rôle. Cette approche correspond à la modélisation d'accompagnement développée précédemment.
- **Modèles basés sur des règles empiriques ou heuristiques** : Les agents se voient attribués des règles de décision tirées de données empiriques et d'observations, sans lien étroit avec la théorie. La différence avec les modèles basés sur l'expérience est que la démarche est moins directe, en ce sens que les règles sont tirées de données qui ont dues être traitées de manière à en sortir les

statistiques. De plus, certains paramètres sont modélisés de manière stochastique.

- **Modèles basés sur la programmation évolutionniste** : Cette approche est similaire à la théorie de la sélection naturelle. Les agents disposent de caractères et stratégies propres qui leur permettent de prendre certaines décisions. Différentes stratégies sont en compétition et évoluent grâce à des croisements ou par imitation.
- **Règles basées sur des hypothèses et sur la calibration** : Des règles hypothétiques sont utilisées lorsque les données sont inexistantes ou inadéquates.

Par ailleurs, Bousquet et Le Page (2004) présentent 5 architectures de prise de décision au niveau de l'agent. Celles-ci se rapprochent de ce que An (2012) présentait comme des modèles.

- **Architectures basées sur la métaphore évolutionniste** : Comme la programmation évolutionniste évoquée plus tôt, cette architecture se base sur le fait que les stratégies des agents évoluent et changent.
- **Architectures pour tâches compétitives** : Cette architecture est utile pour les cas où des agents reçoivent des stimuli qui activent différentes tâches et doivent donc choisir entre plusieurs options de réponse. Il est alors possible de calculer le niveau d'activation d'une tâche en fonction du poids qui lui est attribué, de l'intensité du stimulus, et du poids des autres tâches. Dans le cas où le niveau d'activation dépasse une valeur seuil, la tâche est activée.
- **Architectures en réseau de neurones** : La capacité d'apprentissage des agents est mise en avant. La relation perception – action est modélisée par un réseau dont les connections évoluent.
- **Architectures basées sur des fonctions paramétrées** : Les décisions de l'agent sont basées sur l'addition de différentes forces, sur base de théories microéconomiques, ou encore d'analyse multicritères.
- **Architecture BDI (Belief – Desire – Intention)** : Cette architecture prend en compte les objectifs, représentations et la participation aux actions individuelles ou collectives. Cependant, la plupart des applications en écologie utilisent des agents simples et se concentrent sur la relation avec l'environnement.

Il existe donc une multitude de modèles et théories, les listes précédentes ne se voulant être en aucun cas exhaustives. De plus, les méthodes présentées peuvent être couplées au sein d'un même modèle et certaines sont redondantes. Ceci illustre quelque peu le manque de cadre clair et collectif quant à la modélisation de la prise de décision dans ce domaine.

Notons aussi que les auteurs utilisent chacun leur propre vocabulaire. Les noms « modèle » et « architecture » utilisés ici par différents auteurs se rapportent à des concepts similaires. Il a néanmoins été choisi de garder ces termes afin de rester fidèle à la littérature lue.

## 2.2 Outils pour implémenter et décrire les modèles basés-agent

### 2.2.1 Introduction

Dans le domaine des modèles basés-agent, l'utilisation de protocole de description est de plus en plus présente. Ceci a pour but de rendre les modèles plus transparents et mieux documentés afin de faciliter leur évaluation ainsi que leur réplication (Grimm et al., 2010). Cette section présente le protocole ODD (Overview, Design concepts, Details) (Grimm et al., 2010) ainsi que le cadre TRACE (Transparent and Comprehensive model Evaluation) (Grimm et al., 2014). Ces outils ne visent néanmoins pas à valider les modèles, mais ne sont utiles qu'à des fins de transparence dans la mise en place du modèle. Ainsi, il serait cependant probablement intéressant de réaliser le même genre de cadre pour la validation des modèles.

### 2.2.2 TRACE

TRACE est un outil visant à documenter la conception et la mise à l'épreuve de modèles écologiques dans le but de promouvoir les « bonnes pratiques de modélisation » dans ce domaine. Une première version a été présentée en 2010 par Schmolke et al., et a été revue par Grimm et al., en 2014. C'est cette version revue qui est brièvement présentée ici.

L'idée principale de TRACE est de suivre une structure de description du modèle, allant du problème étudié aux résultats du modèle. Pour ce faire, deux tâches sont à remplir : garder un cahier de modélisation dans lequel le modélisateur documente la conception, les tests et les analyses réalisés tout au long du processus ; et dans ce cahier, d'utiliser la terminologie TRACE. Les différents éléments sont très brièvement présentés ci-dessous de manière à donner au lecteur une idée de la structure du cadre TRACE :

1. Formulation du problème
2. Description du modèle
3. Évaluation des données
4. Évaluation du modèle conceptuel
5. Vérification de l'implémentation
6. Vérification des sorties du modèle
7. Analyse du modèle
8. Corroboration des sorties du modèle

Pour le point 2 « description du modèle », les auteurs de la revue de TRACE conseillent de prendre en compte le protocole ODD présenté dans la section suivante, dans le cas de modélisation basée-agent. Ils notent cependant qu'il peut y avoir chevauchement entre certaines parties de ces deux structures. Par ailleurs, les points 3 à 8 font partie de ce que Augusiak et al. (2014) appellent « l'évaludation », fusion entre les mots anglais evaluation et validation. L'évaludation est définie comme étant « le processus entier d'établissement de la qualité et de la crédibilité du modèle, à travers chaque étape de développement, d'analyse et d'application du modèle ».

### 2.2.3 ODD Protocol

Le protocole ODD est proposé pour la première fois par Grimm et al. en 2006 dans le but de décrire les modèles basés-agent sur base de 3 blocs (vue d'ensemble, concepts de design, et détails) subdivisés en 7 éléments. La première version a néanmoins été revue en par Grimm et al. (2010). C'est sur base de ce document que le protocole est ici lui-aussi brièvement présenté.

L'utilisation du protocole ODD promeut une formulation rigoureuse du modèle, permet de rendre l'écriture et la lecture de la description du modèle plus efficaces, et facilite la réplication du modèle. Ceci rendant ainsi les modèles plus faciles à comprendre. Une structure à suivre est proposée pour le chercheur, mais il est possible d'omettre certains points qui ne seraient pas utilisés dans la modélisation. A l'inverse, il est possible d'ajouter des concepts importants dans le modèle mais qui ne seraient pas repris dans la structure du protocole. Cette structure est présentée de manière succincte ci-dessous :

- But
- Entités, variables d'état, échelles
- Vue d'ensemble des processus et programmation
- Concepts de design
  - Principes de base
  - Émergence
  - Adaptation
  - Objectifs
  - Apprentissage
  - Prédiction
  - Détection
  - Interaction
  - Stochasticité
  - Collectif

- Observation
- Initialisation
- Données d'entrées
- Sous-modèles

### 2.2.4 ODD+D Protocol

Le protocole ODD présenté dans la section précédente est maintenant largement utilisé pour décrire les modèles multi-agents, mais manque de détails concernant la description de la prise de décision des agents. Il est en effet principalement axé vers une perspective écologique plutôt que socio-écologique. Pour pallier ce manque, le protocole ODD+D a été proposé par Müller et al. (2012), élargissant et raffinant le protocole ODD afin de mieux documenter la prise de décision humaine.

La structure de base du protocole ODD a été gardée, mais des changements structuraux ont permis d'intégrer les aspects de prise de décision humaine ainsi que d'ajouter des catégories. Les changements effectués sont présentés dans la Figure 1.

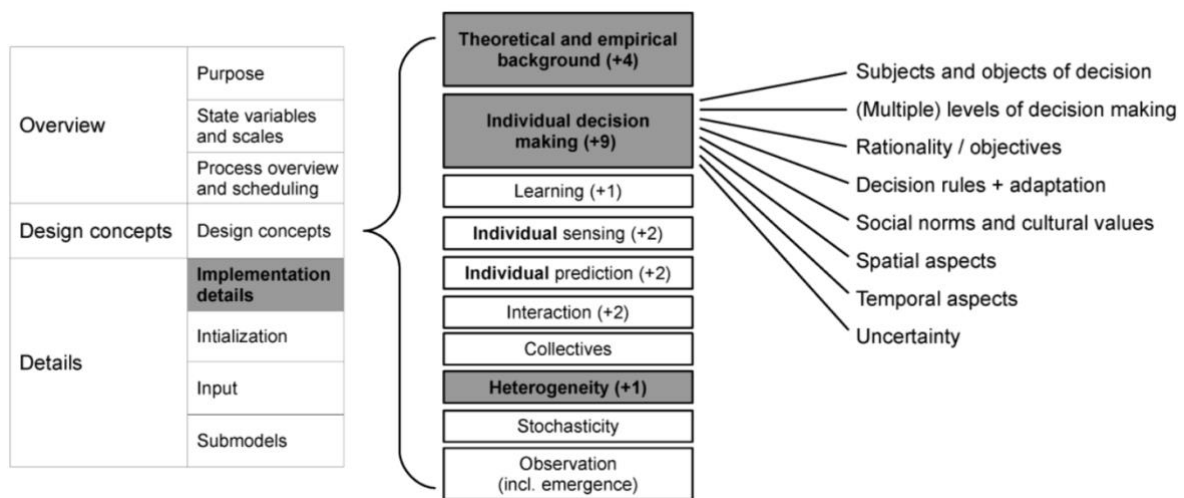


Figure 1 : Structure du protocole ODD+D. Les cases grisées indiquent les nouvelles catégories comparées au protocole ODD. Le nombre de questions ajoutées est noté entre parenthèses. A droite les différents aspects de la nouvelle catégorie "Individual Decision Making" sont indiqués. Par Müller et al. (2012).

### 2.2.5 Unified Modelling Language

Le langage UML (Unified Modelling Language) est un langage de description et de représentation graphique de modèles indépendants des langages de programmation (Le Page et Bommel, 2005). Il a été accepté par l'OMG (Object Management Group) en 1997. Dans le cadre de la modélisation basée-agent, l'UML peut être utilisé dans deux buts différents. Le



## 2.3 Applications

Quelques applications de modèles basés-agent sont ici brièvement présentées. De plus, certains points forts et faibles sont mis en évidence lorsque l'information disponible le permet.

Modèle SIEGMAS (Gaudieux, 2017) : SIEGMAS est un système d'aide à la décision étudiant les interactions entre les acteurs de la gouvernance communautaire des ressources naturelles. Il étudie des zones situées à La Réunion et à Madagascar et est axé sur le transfert de gouvernance. L'aspect spatial est pris en compte grâce à l'incorporation de cartes d'occupation du sol dans l'environnement NetLogo. Les sorties du modèle sont des analyses de la déviance des agents en termes de conformité avec la norme, et donnent une représentation spatiale.

Points forts : Prend bien en compte l'aspect de gouvernance, de déviance, l'aspect socio-économique, et les interactions.

Points faibles : La validation du modèle n'est pas clairement présentée.

CamFLORES (Legg, 2003) : Le modèle utilise un paysage simplifié et un village artificiel de 10 ménages basés sur des observations au Cameroun. De l'information est échangée entre les ménages et leurs parcelles afin de déterminer le travail effectué. Les occupations du sol représentées sont la forêt, la jachère, la culture de cacao et les plantations. Les données de base proviennent de SIG, d'enquêtes socio-économiques et de collectes de données biophysiques. Le but est d'étudier l'impact de l'introduction de nouvelles espèces cultivées et de systèmes agricoles améliorés sur le maintien à long terme de mosaïques de forêt et d'agriculture, dans le contexte du programme international d'alternatives à l'abattis-brûlis.

Points forts : Intégration de données biophysiques et socio-économiques.

Points faibles : Ne reprend pas l'ensemble des types d'agriculture présents dans la région étudiée.

SYPR Project (Turner et al., 2016) : Ce projet vise à observer, comprendre et modéliser le changement d'occupation du sol dans des forêts tropicales du Mexique. Il étudie la dynamique d'occupation du sol et les moteurs de déforestation en combinant des données SIG, des données socio-économiques et des données sur l'écologie.

Points forts : La recherche n'a pas été basée sur des hypothèses a priori, mais les hypothèses ont émergé de la recherche sur diverses dimensions des systèmes socio-environnementaux.

Ecuadorian Amazon ABM (Mena et al., 2011) : Ce modèle simule le changement d'occupation du sol dans des fermes de l'Amazonie du nord de l'Équateur. La prise de décision au niveau du ménage a été étudiée et simulée via des enquêtes longitudinales, socio-économiques et démographiques. De plus, des SIG ont été utilisés pour faire le lien entre les fermes et leur environnement. Ainsi, le modèle produit une représentation spatiale de l'occupation du sol par pas de temps de 1 an, et simule les caractéristiques socio-économiques et démographiques des ménages et communautés. Le modèle utilise des agents actifs et passifs, ainsi que sociaux et environnementaux.

Points forts : Possibilité de modifier les schémas de prise de décision par l'utilisateur.

Points faibles : Le processus de subdivision des fermes n'est pas intégré, alors qu'il joue un rôle important dans le changement d'occupation du sol.

Modélisation multi-agents pour l'aménagement forestier : Usages multiples dans l'écosystème forestier de Didy (Madagascar) (Abrami, 1999). Cette application prend en compte les cultures de riz sur brûlis, les exploitations forestières et le pâturage des troupeaux de zébus dans la forêt de Didy à Madagascar afin de modéliser leurs interactions et l'évolution du système.

Points forts : Possibilité de simuler différents types de situations réelles en ajustant les paramètres du modèle.

Points faibles : Trop grande complexité noyant les mécanismes de fonctionnement dans l'abondance d'informations et de paramètres.

LUCITA (Deadman, 2005) : Ce modèle étudiant les interactions homme – environnement en lien avec la déforestation dans la forêt amazonienne brésilienne est constitué de deux sous-modèles en interaction. L'un représente le milieu naturel tandis que l'autre représente les ménages prenant des décisions en lien avec l'occupation du sol dans leur ferme.

SAMBA-GIS (Castella et al., 2005) : Dans ce cas-ci, les interactions entre agriculteurs, institutions et changements de l'environnement biophysique et socio-économique sont couplées aux données SIG afin de faire varier année par année le paysage agricole. Ainsi, la simulation permet d'identifier les villages ayant une même dynamique de changement d'occupation du sol et d'évaluer l'impact potentiel des changements dans les ressources naturelles.

Points forts : Utilisation de jeux de rôle dans la conception du modèle.

## 3 Contexte de l'étude

### 3.1 Madagascar

L'île de Madagascar est située au sud-est du continent africain, et en est séparée par le canal du Mozambique. Longue de 1600 km et large de 570 km, sa superficie d'environ 590 000 km<sup>2</sup> en fait la quatrième plus grande île du monde.

Madagascar est réputée pour son haut taux d'endémicité et sa riche biodiversité, menacée par la déforestation. Au centre du pays et dans sa longueur, une chaîne montagneuse coupe l'île de façon asymétrique, rendant le relief à l'est de Madagascar plus escarpé que sur la partie ouest. Les différences de relief entre les différentes parties du pays, ainsi que la proximité de l'océan indien définissent les climats observés.

En général, le climat est caractérisé par une saison des pluies entre novembre et avril, et une saison sèche entre mai et octobre, où les températures sont alors plus fraîches. Étant donné la présence de la chaîne montagneuse au centre du pays, l'est du pays est sujet à davantage de précipitations que l'ouest. On observe donc en moyenne 3700mm par an de précipitations sur la côte est, contre 400mm pour la côte ouest. De plus, une différence nord-sud est aussi marquée, le sud étant beaucoup plus sec. Concernant les températures moyennes annuelles, elles sont de 27°C au nord, contre 23°C au sud.

### 3.2 Région SAVA

La région SAVA, pour Sambava, Antalaha, Vohémar, Andapa (ses 4 districts), est située au nord-est de Madagascar, dans la province d'Antsiranana. Sa superficie est d'environ 25 500km<sup>2</sup>, pour une population d'environ 1 100 000 habitants en 2007. C'est dans cette région que se situe la zone d'étude et qu'a été effectué le séjour mémoire de février 2019 en vue de récolter les données nécessaires à ce mémoire.



Figure 3 : Situation de la région SAVA et du bassin d'Ankavia

D'un point de vue topographique, la région peut être divisée en 3 zones :

- A l'est, la zone littorale s'étend sur 8 à 15km de large, allant de 0 à 60m d'altitude. Il s'y trouve principalement des cultures vivrières.
- Un peu plus vers l'ouest, la zone intermédiaire va de 60 à 250m. On y trouve des cultures vivrières ainsi que des cultures de rente telle que la vanille.
- Enfin, vers le centre du pays, la zone montagneuse va de 250 à plus de 2000m d'altitude.

Le climat de la région SAVA est un climat tropical chaud et humide, avec une saison plus chaude entre octobre et avril, pluvieuse à partir de novembre. Il n'y a pas de saison sèche, mais les précipitations sont moins intenses entre mai et septembre. Par ailleurs, la région est régulièrement touchée par des cyclones.

Le réseau hydrographique est quant à lui assez dense, avec des pentes plus fortes à l'intérieur des terres. Les rivières et fleuves sont en général assez courts, drainant une surface allongée et étroite.

### 3.3 Bassin versant Ankavia

Pour le projet dans lequel s'inscrit le mémoire, l'étude est basée sur le bassin d'Ankavia, dont l'exutoire se situe à proximité de la ville d'Antalaha. Sa superficie est de 118 799 ha, et est divisé en 3 sous bassins, à savoir Antsahovy, Ankaviabe, Sahafihitry.

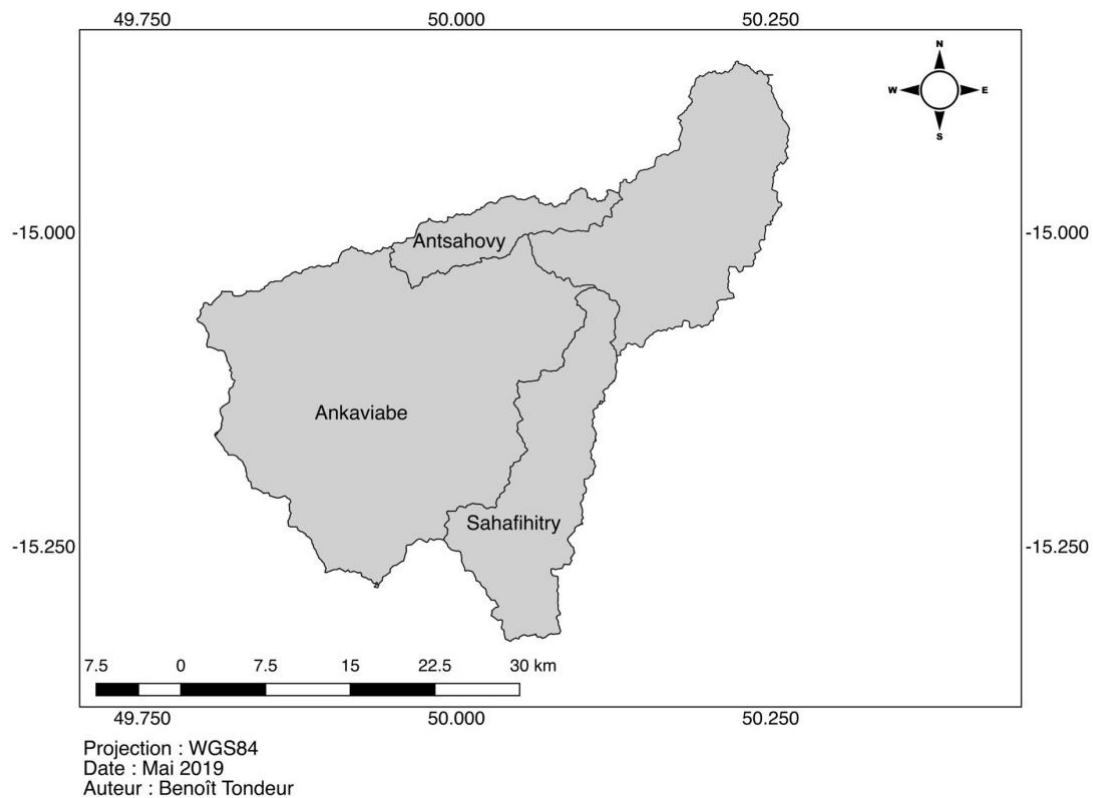


Figure 4 : Découpe des sous bassins versants d'Ankavia

Les sols sont principalement ferrallitiques, fortement altérés et de couleur rouge, caractéristiques des régions tropicales humides. Ce sont des sols bien drainants.

En ce qui concerne l'occupation du sol, on retrouve principalement des forêts secondaires, et seulement une petite surface de forêt primaire, celle-ci étant menacée par les cultures sur abattis-brûlis. On retrouve aussi des cultures vivrières telles que le riz pluvial et de bas-fond, et des cultures de rente comme la vanille et le poivre.

Pour cette étude, il a été choisi de se focaliser sur le village d'Ambarabaha, situé à l'exutoire du sous bassin d'Antsahovy. Le village compte environ 200 ménages, chacun cultivant les différents types de culture.

## 4 Matériel et méthodes

### 4.1 Méthodologie générale

Le mémoire visant à déterminer les possibilités en matière de modélisation basée agent dans le cadre de changement d'occupation du sol dans le bassin versant d'étude, la méthode utilisée est de type exploratoire. De ce fait, la méthodologie a évolué au cours de l'étude suivant les éléments d'informations disponibles ou non et suivant les conclusions tirées à partir de ceux-ci.

### 4.2 Mise en place de la base de données de projet

#### 4.2.1 Données collectées sur le terrain

Afin de récolter des données pour la mise en place d'un modèle multi-agents, un séjour sur le terrain a été effectué en février-mars 2019. La zone d'étude choisie pour cette récolte a été le village d'Ambarabaha et ses alentours. Ce choix provient de l'accessibilité relativement facile ainsi que de la bonne entente entre l'équipe de recherche et la population du village.

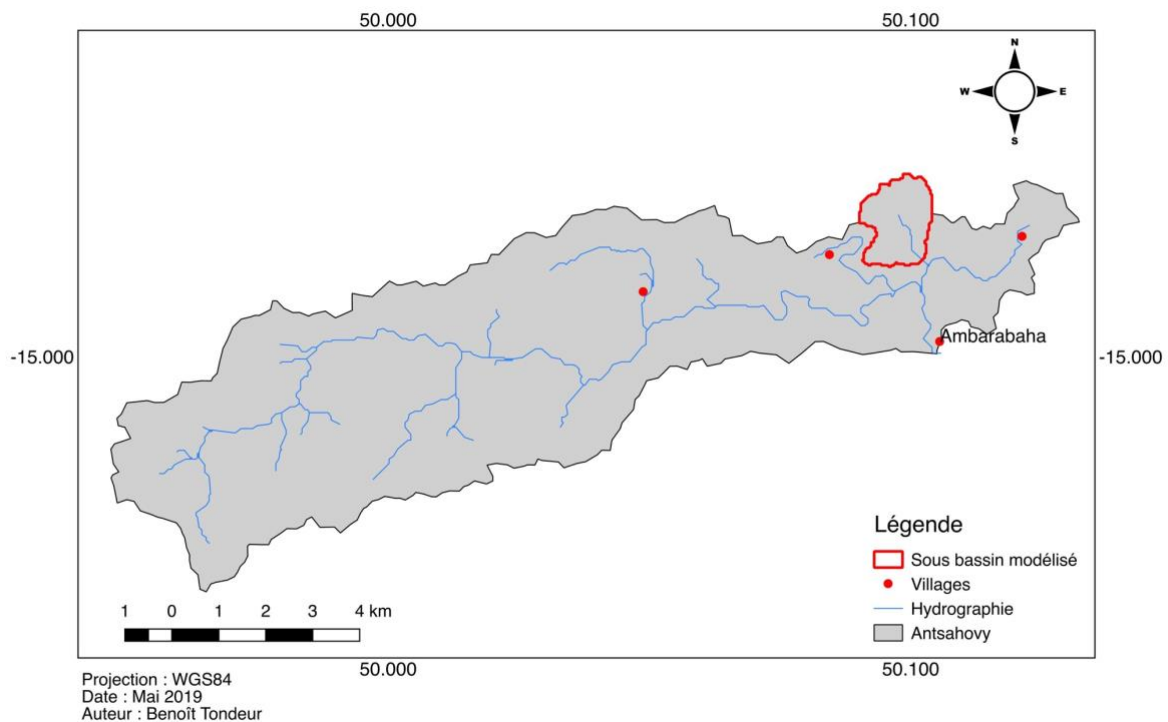


Figure 5 : Carte de la situation du village d'Ambarabaha et du sous bassin modélisé dans le bassin versant d'Antsahovy

Sur place, le travail a été réalisé en collaboration avec un doctorant malgache (M. A. Benitsiafantoka, CURSA et Université de Tamatave). Dans le but de réaliser un inventaire et une cartographie des parcelles agricoles d'un échantillon d'agriculteurs, le travail de terrain a

été de relever des points GPS aux coins des parcelles cultivées. Pour ce faire, il a fallu suivre les agriculteurs un à un jusqu'à une ou plusieurs de leurs parcelles de riz pluvial ou de vanille et y relever les coordonnées GPS via un GPS Garmin (eTrex 10) aux différents coins de chaque parcelle. Les limites des parcelles n'étant pas toujours claires pour une personne non informée, il était nécessaire que chaque agriculteur indique les endroits où prendre les points GPS. Pour ce faire, le doctorant malgache donnait soit les instructions avant le départ avec l'agriculteur pour les parcelles, soit le doctorant venait lui aussi sur la parcelle et pouvait dès lors faire l'interprétation en direct.

De plus, afin de caractériser les types de culture, des photos ont été prises sur les différents types de parcelle. Enfin, dans le but de caractériser l'évolution de la végétation dans les parcelles de jachère, des photos de parcelles à différentes années de jachère ont été prises. Toutes ces données ont été stockées dans une base de données indiquant les points GPS correspondant à la parcelle, le type de culture, les photos associées, ainsi que d'éventuelles notes. Ceci est repris en Annexe 2.

En ce qui concerne l'échantillon d'agriculteurs rencontrés et de parcelles visitées, il a été possible de suivre 21 agriculteurs ou agricultrices et de relever des points GPS dans 29 parcelles de riz ou de vanille. Les agriculteurs suivis ont été les agriculteurs à se porter volontaires ou ayant déjà participé à une interview menée par le doctorant, A. Benitsiafantoka. Ceux-ci ne représentent qu'une petite partie du village, ce dernier comprenant environ 300 ménages. De plus, il n'a pas été possible de visiter l'ensemble des parcelles de ces agriculteurs mais seulement une ou deux d'entre-elles, au vu du temps requis et de leurs disponibilités.

Dans le cas des parcelles de jachère, il est à noter qu'il n'a pas été possible de prendre les coordonnées GPS autour de celles-ci. En effet, la densité de la végétation étant trop importante, il a été décidé de ne prendre qu'un point GPS au bord accessible de la jachère.

En plus de ces données GPS, des enquêtes (Annexe 3) ont été réalisées auprès des habitants du village d'Ambarabaha par le doctorant. Afin d'acquérir des données pouvant servir à l'implémentation du modèle, des questions spécifiques à la prise de décision et à l'utilisation des terres ont été ajoutées à ces enquêtes.

#### 4.2.2 Données génériques

La modélisation nécessitant une représentation de l'environnement dans lequel évoluent les agents, un travail préalable a été nécessaire afin d'obtenir ces données. Pour ce faire, le logiciel QGIS, ainsi que le site internet Google Earth Engine ont été utilisés. Pour ce dernier, des scripts ont été développés en langage Python, et sont disponibles en Annexe 4.

Grâce au SRTM (résolution 30m) disponible dans la base de données du projet GIRE-SAVA sur Google Drive, les couches de pente et d'orientation ont pu être produites pour l'ensemble du bassin d'Ankavia. Aussi, la couche d'information contenant le réseau hydrographique, elle aussi présente dans la base de données du projet, a été utilisée afin de calculer la distance entre les centres des parcelles et le cours d'eau le plus proche.

De plus, une classification de l'occupation du sol a été effectuée. Pour ce faire, un premier essai a été de réaliser une classification non supervisée d'images Sentinel 2 MSI Level-1C via un algorithme de clustering en KMeans sur Google Earth Engine. Cependant, les résultats n'étant pas concluants, une autre option a dû être envisagée. Les images aériennes Bing disponibles sur QGis montrant une résolution importante permettant, à l'œil, de faire la différence entre différentes parcelles, il a donc été décidé d'utiliser ces images. Cependant, le téléchargement de ces images, ou l'utilisation des images originales par un algorithme de classification étant impossible, il a fallu sauver une partie de l'image seulement, correspondant à un sous bassin du bassin d'Antsahovy, afin de pouvoir l'utiliser. Cette méthode a cependant l'inconvénient de ne sauver que la résolution d'affichage de l'image à l'écran, et non la résolution de l'image d'origine, ainsi qu'une étendue bien plus petite. Néanmoins, cela permet quand même d'obtenir une meilleure résolution que la résolution des images Sentinel. La classification est alors réalisée via un algorithme de clustering en KMeans et est ensuite lissée via un filtre. C'est donc la classification de l'image Bing qui a été retenue.

Une classification supervisée de cette image n'a pas été réalisée pour les raisons suivantes. D'une part, le nombre de parcelles de riz et de vanille connues et utilisables dans l'entraînement de la classification est très faible (3 parcelles de chaque). De plus, aucune donnée de terrain n'est disponible pour les autres classes d'occupation du sol, telle que la forêt. Enfin, les résultats obtenus via classification non supervisée permettent déjà de faire la différence entre forêt, riz pluvial et classe intermédiaire, aucune information de terrain n'est disponible pour approfondir la classification.

#### 4.2.3 Récapitulatif des données

Le tableau présenté ci-dessous reprend l'ensemble des données constituant la base de données du mémoire. Y sont indiqués le type de données, la source, ainsi que les données utilisées pour la création de nouvelles données, la résolution ou d'autres notes dans les cas le justifiant.

Tableau 1 : Récapitulatif des données de la base de données

| Données                                 | Source                    | Notes / Données utilisées / Résolution                                     |
|---|---------------------------|--|
| Position des parcelles                  | Garmin eTrex 10           | Points GPS pris aux coins des parcelles<br>Visite de terrain, 2019         |
| Aire des parcelles                      | QGis                      | Points GPS   |
| Socio-économiques                       | Enquêtes                  | Voir formulaire d'enquête à l'annexe 3                                     |
| SRTM                                    | Base de données GIRE-SAVA | Résolution 30m   |
| Pente                                   | QGis                      | Couche SRTM<br>Résolution : 30m  |
| Orientation                             | QGis                      | Couche pente<br>Résolution : 30m   |
| Hydrographie                            | Base de données GIRE-SAVA |  |
| Distances (au cours d'eau / au village) | QGis                      | Données parcelles<br>Données hydro<br>Emplacement village                  |
| Limites du bassin versant d'Antsahovy   | Base de données GIRE-SAVA |  |
| Classification de l'occupation du sol   | QGis                      | Bing Aerial Imagery, 3m<br>Image 2019, 3m<br>Classification non supervisée |
| ESACCI-LC                               | Base de données GIRE-SAVA | Annuellement, de 1995 – 2015<br>Résolution : 300m                          |
| Limites du bassin versant modélisé      | QGis                      | Couche pente<br>Résolution : 30m   |

### 4.3 Analyse des données

#### 4.3.1 Analyse statistique des caractéristiques des parcelles

Les données de pente, élévation, distances, aire et type de culture ont été utilisées afin de produire des statistiques sur les parcelles et tenter d'en faire ressortir des informations sur la prise de décision des acteurs quant au choix de l'emplacement des parcelles à cultiver. Dans un premier temps, de simples statistiques descriptives ont été produites. De fait, pour chaque parcelle ont été calculés la moyenne pour la pente, l'élévation et l'orientation. Ensuite, il a été possible de déterminer les valeurs moyennes maximale et minimale pour chaque type de culture, ainsi que la médiane. Aussi, les distances entre les parcelles et le village ou le cours d'eau le plus proche ont été calculées.

Une fois ces statistiques disponibles, une régression logistique suivie d'une analyse de variance ont été effectuées avec la variable « culture » comme variable à expliquer, et les variables « pente », « élévation », « distance parcelle – village » et « distance parcelle – cours

d'eau » comme variables explicatives. Ceci a été réalisé via les fonctions *glm* et *anova* du logiciel Rstudio. La fonction *glm* permet de réaliser un modèle linéaire généralisé ajusté aux données fournies. Il a été choisi de faire un modèle de type binomial, correspondant à une régression logistique. Ceci donne l'importance de chaque paramètre dans le modèle. Ensuite, une analyse de variance a été faite sur ce modèle via la fonction *anova*. Celle-ci compare donc l'efficacité du modèle sans un des paramètres avec le modèle complet, et ce pour chaque paramètre, donnant ainsi la déviance de chaque paramètre. Le code R est disponible en Annexe 5.

#### 4.3.2 Analyse de l'historique de changement d'occupation du sol

En plus de ces statistiques, des images de couverture du sol (ESACCI-LC, European Space Agency Climate Change Initiative – Land Cover) de 1992 à 2015, produites par l'ESA (European Space Agency) en association avec l'UCLouvain en 2017, ont été analysées d'une part visuellement et d'autre part par des statistiques sur les pourcentages des différentes classes d'occupation du sol. Ces images sont basées sur les archives MERIS à 300m de résolution, SPOT-VEGETATION (Satellite Pour l'Observation de la Terre – Végétation) à 1 km, PROBA-V (Project for On-Board Autonomy - Vegetation) 1 km, et AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 1 km, donnant une couverture du sol à 300m de résolution. Les classes de couverture du sol utilisées sont celles de l'UN-LCCS (United Nations Land Cover Classification System).

L'analyse visuelle des images vise à observer la dynamique spatiale du changement d'occupation du sol. Plus précisément, elle a permis de détecter une zone ayant été sujette à la déforestation entre 1997 et 2000, choisie pour la modélisation.

#### 4.4 Implémentation du modèle basé-agent

Le modèle a été réalisé via le programme NetLogo 6.0.4, comme explicité plus haut.

##### 4.4.1 Environnement

Afin de mettre en place l'environnement dans lequel les agents évoluent, il a été nécessaire d'importer plusieurs couches SIG dans l'interface NetLogo. Tout d'abord, la couche d'occupation du sol produite par l'image aérienne Bing Aerial a été importée (Figure 9). Étant donné la présence de parcelles de riz déjà présentes dans cette couche, la classification a été simplifiée dans NetLogo pour ne diviser le territoire qu'en maximum 2 types d'occupation du sol, à savoir la forêt et la classe dite « intermédiaire ». Cette classe correspondant à une occupation du sol entre la forêt et un sol nu. Plus d'informations sont disponibles sur la raison

d'être de cette classe dans la section 5.1.2 concernant les résultats des classifications de l'occupation du sol.

Par ailleurs, les informations sur la pente du terrain ainsi que sur le réseau hydrographique ont été ajoutées dans le modèle. Afin d'empêcher les agents d'installer leurs parcelles dans le cours d'eau, les patches traversés par le cours d'eau ont été définis comme cours d'eau eux-mêmes. Aussi, la village d'Ambarabaha a été placé dans le coin inférieur droit de l'environnement, sous forme d'agent afin de pouvoir facilement l'utiliser dans les prises de décision des agents. Sa situation géographique ne correspond donc pas à la réalité, mais correspond à la direction dans laquelle se trouve le village, ce qui définit donc une bonne approximation.

Dans la visualisation de l'environnement, seule l'occupation du sol est affichée (et donc le cours d'eau), alors que les informations sur la pente ne sont pas visibles, bien que disponibles.

#### 4.4.2 Agents et règles de décision

Différents types d'agents ont été définis dans le modèle, bien qu'un seul type ait de schéma de décision. En effet, les agents principaux sont ceux qui représentent les agriculteurs. Ceux-ci ont donc besoin de prendre des décisions quant à l'endroit de mise en place de nouvelles parcelles. En plus de ces agents, des agents « riz », « vanille » et « jachère » ont été créés. Ceux-ci ne sont présents qu'afin de faire fonctionner correctement le modèle. De fait, ils n'ont pas de comportement particulier mais sont présents afin de déterminer la classe d'occupation du sol sur lesquels ils sont présents et pour déterminer le temps, c'est-à-dire le nombre d'itérations, pendant lequel une occupation du sol reste la même.

En ce qui concerne la prise de décision des agents relative au choix de l'emplacement de nouvelles parcelles de riz ou de vanille, celle-ci est basée sur les statistiques produites via les données des parcelles, et décrites à la section 5.2.1. Afin de rendre le modèle plus facilement manipulable, il a été rendu possible de modifier certains paramètres via l'interface directement plutôt que de passer par le code. Ceci afin de permettre à un utilisateur ne maîtrisant pas le langage informatique de manipuler le modèle selon ses désirs.

Dans le script du modèle NetLogo, les règles de décision apparaissent sous forme d'équations. Pour le riz, la règle est la suivante :

Si,

$$nbre_{riz} < nbre_{agris} * nbre_{riz/agri} \quad (1)$$

Où :

- $nbre_{riz}$  est le nombre de parcelles de riz dans l'environnement ;
- $nbre_{agris}$  est le nombre d'agriculteurs dans le modèle ;
- Et  $nbre_{riz/agri}$  est le nombre de parcelles de riz par agriculteur.

Alors, les règles suivantes sont utilisées. Autrement, pas d'implantation de parcelle de riz par l'agent.

Il est donc ensuite nécessaire de trouver un emplacement respectant les critères suivants :

$$LC \neq 3 \quad (2)$$

$$LC \neq 5 \quad (3)$$

Où :

- $LC$  est la classe d'occupation du sol, où 3 correspond à la classe riz, et 5 à la classe vanille ;
- Et où le numéro indique la classe.

$$slope_{here} \leq slope_{riz/max} \quad (4)$$

$$slope_{here} \geq slope_{riz/min} \quad (5)$$

Où :

- $slope_{here}$  est la pente du patch évalué ;
- $slope_{riz/max}$  est la pente maximale pour les parcelles de riz ;
- Et  $slope_{riz/min}$  est la pente minimale pour les parcelles de riz.

Tout en minimisant  $D$ , donné par :

$$D = P_{riz-hydro} * D_{riz-hydro} + P_{riz-village} * D_{riz-village} \quad (6)$$

Où :

- $P_{riz-hydro}$  est le poids attribué à la distance entre la parcelle et le cours d'eau le plus proche ;
- $P_{riz-village}$  est le poids attribué à la distance entre la parcelle et le village ;
- $D_{riz-hydro}$  est la distance entre la parcelle et le cours d'eau le plus proche ;
- Et  $D_{riz-village}$  est la distance entre la parcelle et le village.

Pour ce qui est du schéma décisionnel relatif aux parcelles de vanille, celui-ci est similaire mais les variables sont celles en lien avec les parcelles de vanille.

Afin de déterminer le temps pendant lequel la culture reste en place, un agent « riz » ou un agent « vanille » est créé à l'emplacement de la nouvelle parcelle. Pour ce qui est de l'agent « riz », celui-ci disparaît au début de chaque itération en créant un agent « jachère ». Ceci correspond au fait que les cultures de riz pluvial sont déplacées chaque année. Pour l'agent « vanille », la variable « years » définit le nombre d'années passées en culture, et évolue de la façon suivante :

A chaque itération :

$$years = years + 1 \quad (7)$$

Si  $years = 6$ , alors l'agent disparaît en créant un agent « jachère ». Ceci signifie donc qu'au début de la sixième année, la culture devient jachère.

Pour les parcelles en jachère, le processus est le même que pour la vanille, après 5 ans, la jachère disparaît, laissant place à une occupation du sol intermédiaire et laissant la possibilité d'implanter des cultures.

Le code NetLogo associé est consultable à l'Annexe 6.

Les paramètres choisis pour le modèle sont listés ci-dessous, seuls les 2 derniers points ne sont pas modifiables via l'interface :

- Pente maximale des parcelles de riz
- Pente minimale des parcelles de riz
- Nombre de parcelles de riz par agriculteur
- Pente maximale des parcelles de vanille
- Pente minimale des parcelles de vanille
- Nombre de parcelles de vanille par agriculteur
- Nombre d'agriculteurs initial
- Taux de croissance du nombre d'agriculteurs
- Poids des distances parcelle – village et parcelle – cours d'eau dans la prise de décision
- Nombre d'années de jachère après chaque culture
- Nombre d'années durant lesquelles chaque culture reste en place

En ce qui concerne l'échelle spatio-temporelle du modèle, il a été choisi de travailler avec des patchs carrés correspondant à une aire d'environ 2200 m<sup>2</sup> et avec un pas de temps correspondant à 1 an. De plus, le modèle est réalisé à l'échelle du sous bassin versant présenté préalablement. Le choix de la surface provient des statistiques d'aire des parcelles de riz et de vanille, et correspond à une moyenne entre les aires médianes des deux types de culture. Ces statistiques sont présentées dans la section 5.2.1. Le choix du pas de temps vient du fait que les agriculteurs changent l'emplacement de leurs parcelles de riz chaque année.

#### 4.5 Analyse de sensibilité

Une fois le modèle produit, une analyse d'incertitude a été réalisée afin mettre en évidence l'influence des différents paramètres sur les résultats. Pour cette analyse, des valeurs minimale et maximale de tous les paramètres modifiables directement dans l'interface ont été testées dans le modèle individuellement, tous les autres paramètres ayant la valeur de base.

Pour chaque simulation, les données de nombre de patchs de chaque occupation du sol ont été exportées afin d'être utilisables sous Excel et de pouvoir les comparer. De plus, l'environnement graphique a été enregistré après 5, 10, 15 et 20 ans afin d'observer les variations en termes de répartition de l'occupation du sol.

## 5 Résultats

### 5.1 Base de données

#### 5.1.1 Données récoltées sur le terrain

Le séjour sur le terrain a permis de visiter 29 parcelles de riz et vanille dans les environs du village d'Ambarabaha. De ces parcelles, 9 étaient cultivées de riz, et 20 de vanille. Le nombre de parcelles s'explique par le temps nécessaire à la récolte de données, et a un impact sur la qualité des statistiques. La figure suivante reprend une carte des parcelles visitées.

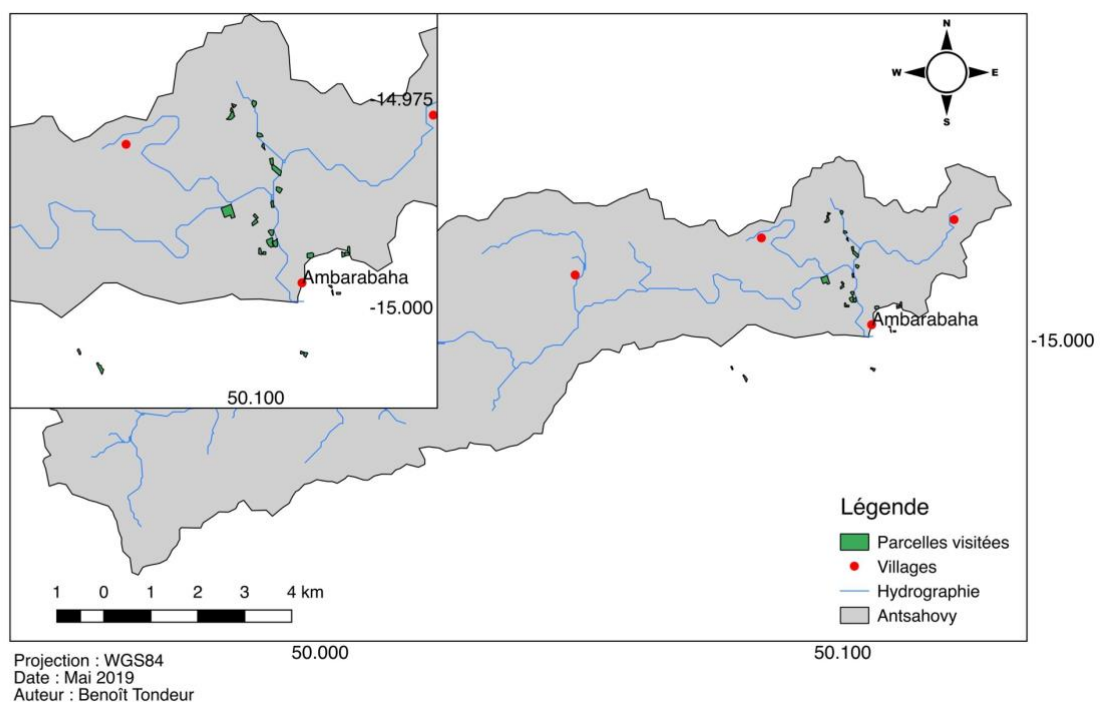


Figure 6 : Carte de la situation des parcelles visitées autour du village d'Ambarabaha

Pour ce qui est des données récoltées via les enquêtes auprès des habitants, elles ne sont malheureusement pas encore accessibles à l'heure de rédiger ce mémoire. Ceci marque donc un manque important dans la base de données.

#### 5.1.2 Données génériques

Pour la production de cartes de classification de l'occupation du sol, la tentative d'utilisation d'images Sentinel 2 n'a malheureusement pas donné de résultats convaincants. En effet, après classification via l'algorithme de clustering par KMeans sur Google Earth Engine, les cartes produites ne reflètent pas la réalité observée sur les images satellites RGB.

Ceci est illustré à la Figure 7. On peut y observer en haut la classification, dans laquelle sont formées de nombreuses petites zones de classes différentes, et en bas l'image en couleurs réelles. Dans cette dernière image, il est possible de faire la différence entre la forêt plus dense, à l'Ouest, et la partie la plus défrichée, à l'Est.

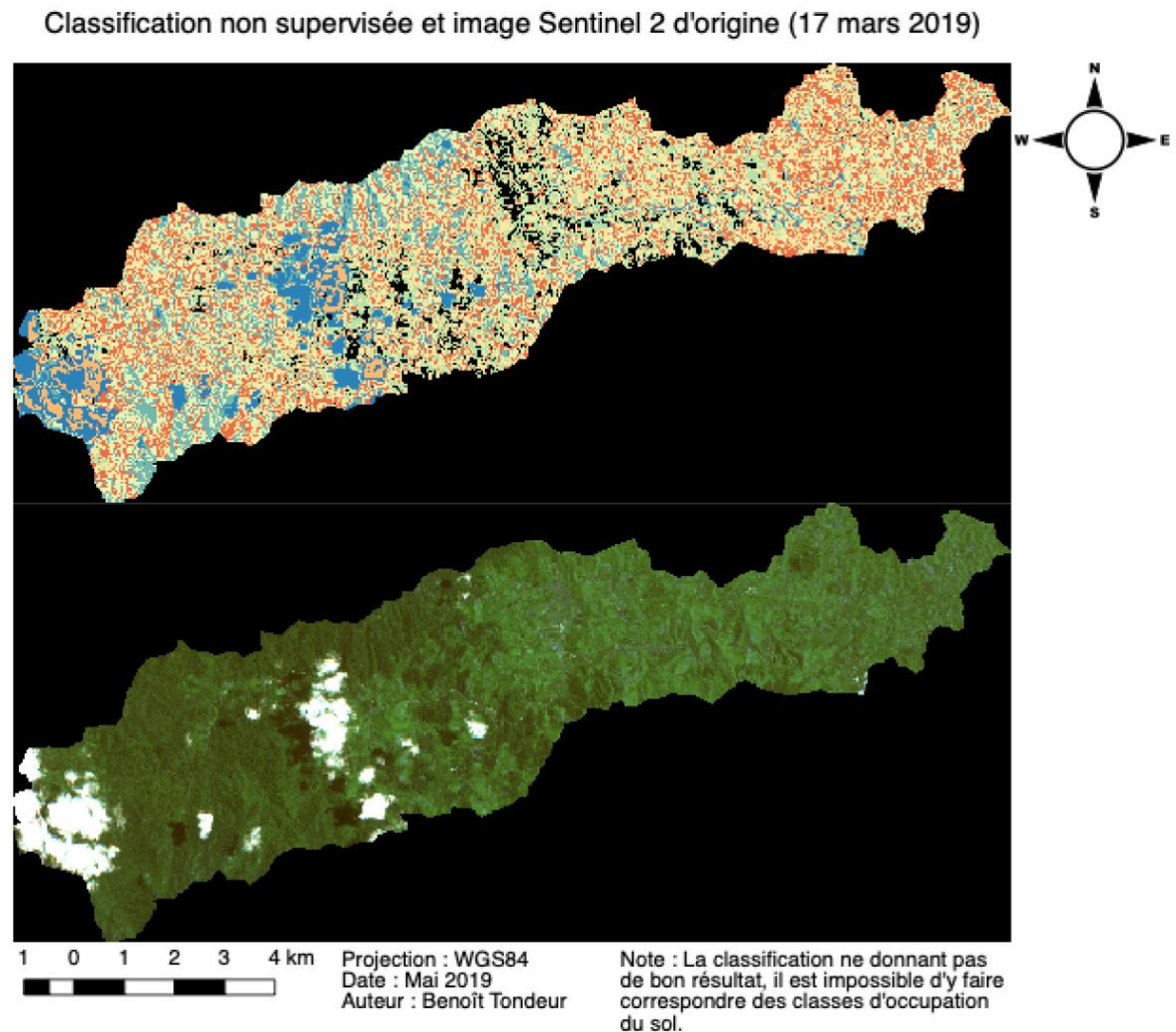


Figure 7 : Classification de l'occupation du sol effectuée via Google Earth Engine et image Sentinel 2 d'origine

Une analyse de la signature spectrale des parcelles visitées de riz et de vanille révèle ceci :

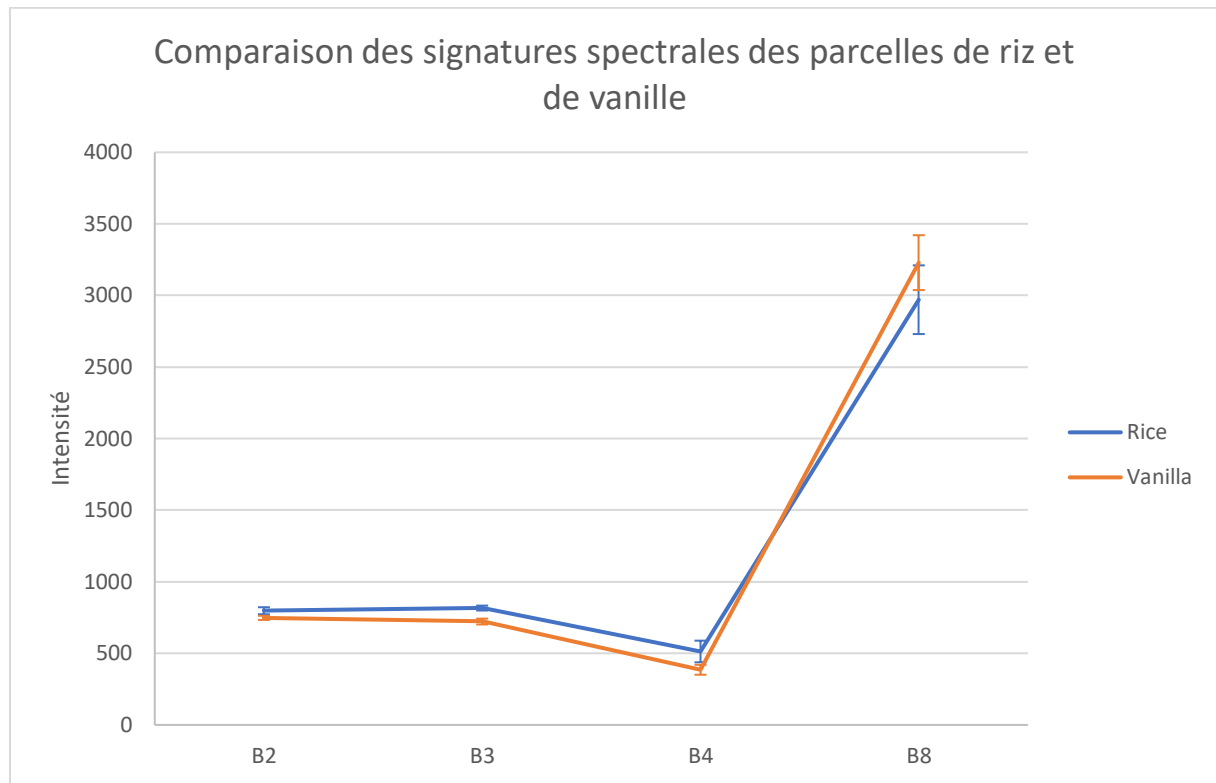


Figure 8 : Comparaison des signatures spectrales des parcelles de riz et de vanille. Bandes : B2 = rouge ; B3 = vert ; B4 = bleu ; B8 = proche infra-rouge

Cette analyse a été réalisée dans Google Earth Engine, le code se trouve en Annexe 4.

Nous pouvons observer sur ce graphe que les signatures sont très proches pour les bandes rouge (B2), verte (B3), bleue (B4) et proche infrarouge (B8). On peut donc penser que les signatures spectrales sont trop proches pour faire une classification. Afin d'aller plus loin, une ANOVA a été réalisée sur les signatures spectrales des parcelles de manière à tester si les bandes sont des sources de variation significatives ou non, c'est-à-dire si elles permettent de faire la différence entre riz et vanille. Les résultats se trouvent dans le tableau ci-dessous.

Tableau 2 : Résultats de l'ANOVA pour les signatures spectrales des parcelles de riz et de vanille.  $H_0$  : la variable est une source de variation significative. Codes de significativité : 0 '\*\*\*' 0,001 '\*\*' 0,01 '\*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

| Bande | Degré de liberté | Déviante | Degré de liberté des résidus | Déviante des résidus | Pr(>Chi) | Significativité |
|-------|------------------|----------|------------------------------|----------------------|----------|-----------------|
| B2    | 1                | 8,0097   | 19                           | 17,1176              | 0,004653 | **              |
| B3    | 1                | 9,4165   | 18                           | 7,7011               | 0,002150 | **              |
| B4    | 1                | 0,0127   | 17                           | 7,6884               | 0,910370 |                 |
| B8    | 1                | 7,6884   | 16                           | 0                    | 0,005558 | **              |

Ces résultats montrent qu'il est possible de différencier les cultures de riz et vanille sur base des bandes B2, B3 et B8. Il est donc étonnant que la classification via GEE n'ait pas été convaincante.

Sur base de ces résultats et pour contourner ce problème, une classification non supervisée a été réalisée sur une image Bing Aerial datant de 2019. La résolution de cette image étant bien meilleure que celle des images Sentinel 2, pour lesquelles la résolution est de 10m. Les bandes et propriétés des images aériennes de ce type n'étant pas directement disponibles ou téléchargeables, il fallut enregistrer la vue dans QGIS au format .tif. Ceci permet de sauver les informations des bandes RGB pour la vue courante de l'image aérienne, mais a le défaut de ne sauver qu'à la résolution d'affichage, et pour une étendue limitée.

Une comparaison entre la classification et l'image aérienne est proposée ci-dessous.

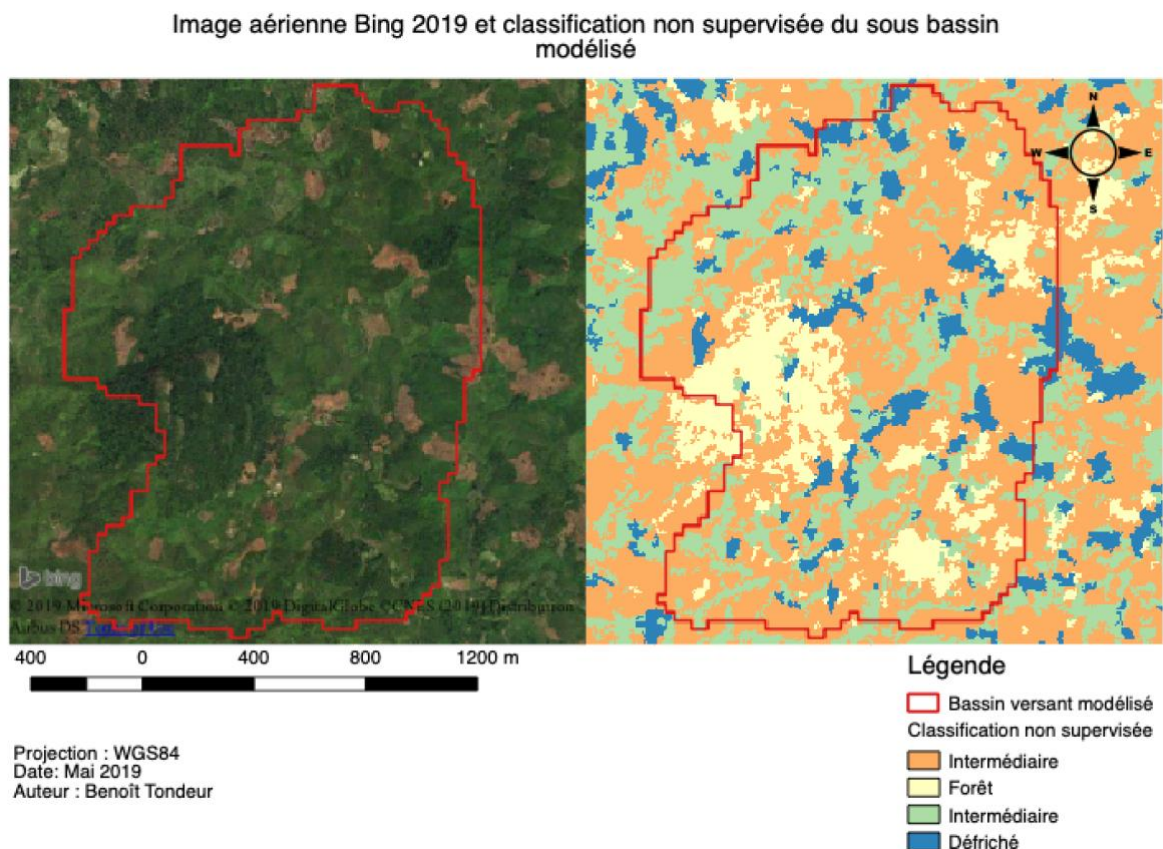


Figure 9 : Image Bing Aerial et classification non supervisée réalisée

Nous pouvons observer ci-dessus que les parties brunes de l'image de gauche, à savoir les zones défrichées, correspondent à la classe bleue de l'image de droite. De même, la forêt dense apparaît en beige clair dans la classification. Par contre, les classes orange et verte correspondent à des couvertures du sol qui semblent intermédiaires et donc il n'est pas possible de déterminer le type exact.

En plus de ceci, l'utilisation du SRTM, c'est-à-dire la couche d'élévation du sol, a permis de produire une couche de pente ainsi qu'une couche d'orientation (Nord – Sud) des pixels. Les cartes produites à partir de ces couches sont présentées à l'Annexe 7. Les couches de parcelles, d'hydrographie, l'emplacement du village ont été utilisés afin de calculer les distances entre les parcelles et le village et entre les parcelles et le cours d'eau.

## 5.2 Analyse des données

### 5.2.1 Statistiques univariées

Grâce aux données récoltées et produites, des statistiques ont été calculées pour les différents types de culture. Celles-ci ont permis de déterminer les caractéristiques principales des parcelles de vanille et de riz. Les tableaux suivants reprennent les statistiques observées. L'Annexe 8 reprend l'ensemble des résultats.

Tableau 3 : Statistiques descriptives des caractéristiques des parcelles visitées

| Culture     | Nombre d'observations | Aire médiane [m <sup>2</sup> ] | Écart-type sur l'aire | Élévation médiane [m] | Écart-type sur l'élévation |
|-------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
| Riz pluvial | 9                     | 1857                           | 2345                  | 90                    | 58                         |
| Vanille     | 20                    | 2718                           | 4317                  | 58                    | 25                         |

Tableau 4 : Statistiques descriptives de la pente des parcelles visitées

| Culture     | Pente minimale | Pente médiane | Pente maximale | Écart-type sur la pente |
|-------------|----------------|---------------|----------------|-------------------------|
| Riz pluvial | 2,3            | 18,8          | 24,8           | 9,5                     |
| Vanille     | 0              | 4,7           | 14,1           | 4,4                     |

Tableau 5 : Statistiques descriptives de la distance des parcelles au cours d'eau

| Culture     | Distance minimale au cours d'eau [km] | Distance médiane au cours d'eau [km] | Distance maximale au cours d'eau [km] |
|-------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Riz pluvial | 0,003                                 | 0,253                                | 0,587                                 |
| Vanille     | 0,0005                                | 0,214                                | 0,79                                  |

Tableau 6 : Statistiques descriptives de la distance des parcelles au village

| Culture     | Distance minimale au village [km] | Distance médiane au village [km] | Distance maximale au village [km] |
|-------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Riz pluvial | 0,392                             | 2,49                             | 3,2                               |
| Vanille     | 0,273                             | 1,02                             | 3                                 |

Ces informations montrent donc déjà une différence au niveau des pentes sur lesquelles les deux cultures se trouvent. On observe clairement que le riz est se retrouve plus sur des pentes plus élevées. Ceci donne donc déjà une première information sur la prise de décision des acteurs dans le choix de l'emplacement de nouvelles parcelles. Par ailleurs, l'aire des cultures permettra de déterminer la taille des patchs utilisés dans le modèle NetLogo. Enfin, on observe que la différence entre les médianes de distance au cours d'eau est très faible, ce qui peut indiquer que ce paramètre ne permet pas de différencier les parcelles de vanille et de riz. Par contre, il y a bien une différence de près 1,5 km pour les médianes de distance au village, montrant que les parcelles de vanille ont plutôt tendance à être plus proches du village que les parcelles de riz. Ceci peut s'expliquer pas la valeur marchande des gousses de vanille et par le besoin de protection des parcelles contre le vol.

### 5.2.2 Modèles de régression logistique et ANOVA

Sur base de ces statistiques, une régression logistique et une analyse de variance ont été réalisées sur l'ensemble des parcelles. Il a été choisi de prendre le type de culture comme variable à expliquer et la pente, l'élévation, et la distance au village et la distance au cours d'eau comme variables explicatives. L'aire ne semblant pas être un paramètre pouvant jouer sur l'emplacement des parcelles, il a été décidé de ne pas l'inclure dans l'analyse.

En ce qui concerne la régression logistique, celle-ci n'a pas pu déterminer de variable permettant d'expliquer le type de culture (Tableau 7). Cependant, l'analyse de variance a montré que la pente est un facteur déterminant (Tableau 9). Ceci confirme les résultats précédents. De plus, la distance au village joue elle aussi dans la prise de décision, dans une moindre mesure cependant.

Tableau 7 : Résultats du modèle de régression logistique sur 23 observations

| <b>glm (binomial)</b>                  | <b>Pr (&gt;  z )</b> |
|--|----------------------|
| <b>Intercepte</b>                      | 0,127                |
| <b>Pente</b>                           | 0,176                |
| <b>Distance parcelle – cours d'eau</b> | 0,335                |
| <b>Élévation</b>                       | 0,309                |
| <b>Distance parcelle – village</b>     | 0,228                |

Tableau 8 : Résultats du modèle de régression logistique sur 23 observations (suite)

|                            |         |                      |
|----------------------------|---------|----------------------|
| <b>Déviance modèle nul</b> | 28,2672 | 22 degrés de liberté |
| <b>Déviance résidus</b>    | 9,7904  | 18 degrés de liberté |

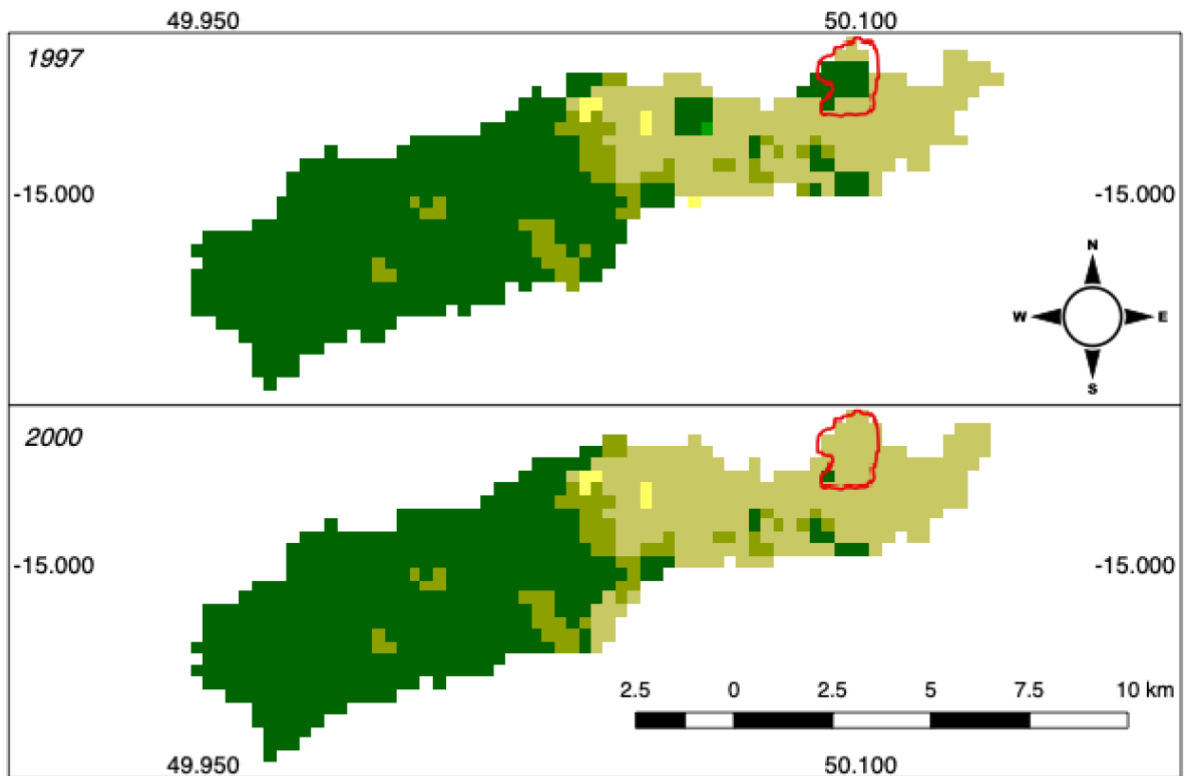
Tableau 9 : Résultats de l'ANOVA pour les caractéristiques des parcelles. Codes de significativité : 0 '\*\*\*\*' 0,001 '\*\*\*' 0,01 '\*\*' 0,05 '.' 0,1 '.' 1

| ANOVA                           | Degré de liberté | Déviante | Degré de liberté des résidus | Déviante des résidus | Pr (Chi) | Significativité |
|---------------------------------|------------------|----------|------------------------------|----------------------|----------|-----------------|
| Pente                           | 1                | 12,0945  | 21                           | 16,1727              | 0,0005   | ***             |
| Distance parcelle – cours d'eau | 1                | 1,6485   | 20                           | 14,5241              | 0,199    |                 |
| Élévation                       | 1                | 0,6270   | 19                           | 13,8971              | 0,428    |                 |
| Distance parcelle – village     | 1                | 4,1067   | 18                           | 9,7904               | 0,043    | *               |

Il est important de garder en tête que les résultats obtenus doivent être pris avec des pincettes étant donné le peu de données disponibles pour les statistiques. En effet, seules 9 parcelles de riz et 20 parcelles de vanille ont pu être visitées. Ceci représente donc un échantillon très réduit. Notons aussi que 6 observations ont été omises dans le modèle par manque de données pour une ou plusieurs variables. Les résultats obtenus devraient donc être améliorés via la prise de données supplémentaires afin d'obtenir un échantillon plus représentatif. Ils seront néanmoins utilisés comme tels dans le but d'explorer les possibilités de modélisation basée-agent.

### 5.2.3 Analyse de l'historique de changement d'occupation du sol

Enfin, les données ESACCI-LC, bien qu'à une résolution fort large, ont permis de suivre la déforestation s'étant déroulée entre les années 1992 et 2015. De celles-ci, il a été possible de déterminer une zone d'étude plus restreinte et dans laquelle des parcelles ont été visitées. Cette zone présente une déforestation entre les années 1997 et 2000, visualisable ci-dessous. La zone entourée en rouge représente le sous bassin choisi pour la modélisation, grâce à ces données.



### Légende

□ Sous\_BV\_Antsa

Classes ESACCI-LC

■ Culture pluviale

■ Mosaïque de végétation naturelle (arbre, buisson, herbacée) (>50%) / culture (<50%)

■ Couverture arborée feuillue sempervirente fermée à ouverte (>15%)

■ Couverture arborée feuillue caduque fermée à ouverte (>15%)

■ Mosaïque arbre et buisson (>50%) / couvert herbacé (<50%)

Projection : WGS84

Date : Mai 2019

Auteur : Benoit Tondeur

Figure 10 : Cartes de couverture du sol ESACCI-LC dans le bassin d'Antsahovy pour les années 1997 et 2000

On constate une déforestation dans la partie Est du bassin d'Anstahovy, qui correspond à la partie la plus peuplée. Le sous bassin choisi se situe lui au nord du village d'Ambarabaha autour duquel des données GPS ont été récoltées.

Une analyse de la surface des différentes classes a aussi été réalisée et est présentée ci-dessous :

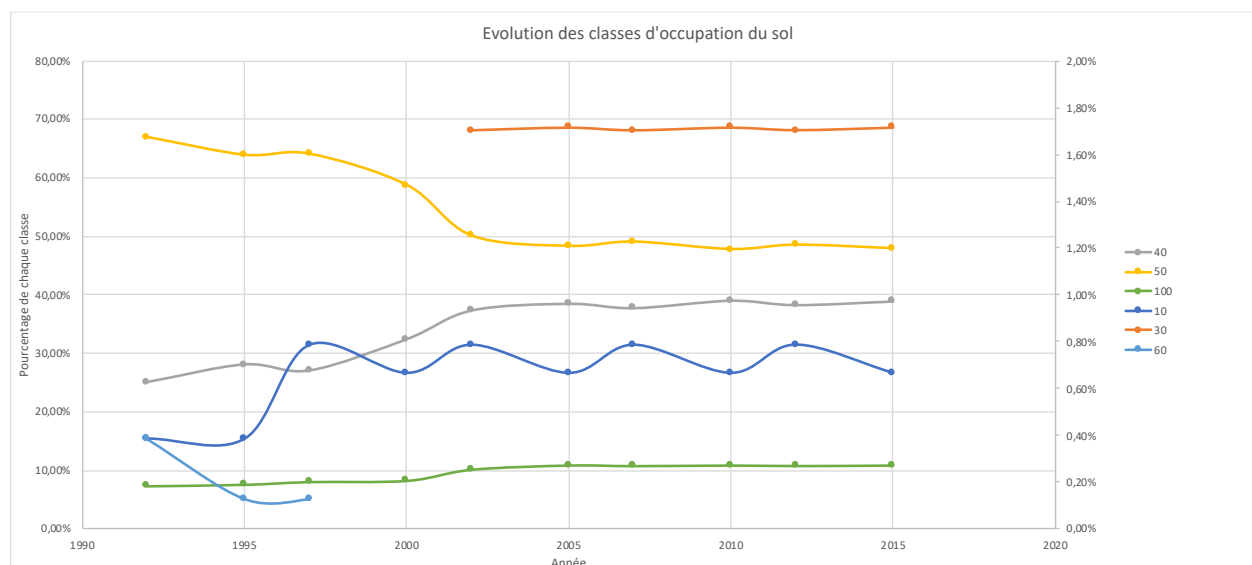


Figure 11 : Évolution des classes d'occupation du sol images ESACCI-LC de 1992 à 2015. Classes 40, 50 et 100, axe primaire. Classes 10, 30 et 60 : axe secondaire.

Tableau 10 : Légende de la Figure 11, classes d'occupation du sol

| Numéro de classe | Couverture   |
|------------------|--|
| 10               | Culture pluviale   |
| 30               | Mosaïque culture (>50%) / végétation naturelle (<50%)              |
| 40               | Mosaïque végétation naturelle (>50%) / culture (<50%)              |
| 50               | Couverture arborée, feuillue, sempervirente, fermé à ouvert (<50%) |
| 60               | Couverture arborée, feuillue, caduc, fermé à ouvert (<50%)         |
| 100              | Mosaïque arbre et buisson (>50%) / couvert herbacé (<50%)          |

Avant de commenter le graphique, il est important de mentionner que l'effet de type sinusoidal de la courbe correspondant à la classe 10 est dû à la variation du nombre de pixels repris dans l'image, plutôt qu'à de réels changements d'occupation du sol. En effet, le découpage de la zone correspondant au bassin versant réalisé dans QGIS à partir d'une couche de polygones n'a pas toujours repris exactement le même nombre de pixels selon la couche utilisée. Ceci peut être dû à une instabilité informatique du logiciel. Cependant, ceci n'influence que peu les résultats.

En ce qui concerne les observations, on peut voir une importante augmentation du nombre de cultures pluviales (classe 10) entre 1995 et 1997. Malgré qu'aucune information démographique ne soit disponible pour cette période, nous pouvons penser que la population a fortement augmentée durant cette période. Les données de population montrant une

augmentation importante entre 2007 et 2009, il est cependant étonnant de ne pas retrouver de pareille évolution des cultures à ce moment-là. Par ailleurs, on observe une baisse de la classe 50 avec une augmentation de la classe 40, les deux se stabilisant à partir de 2002. Ceci correspond probablement à la mise en culture de manière éparpillée dans le bassin, formant donc une mosaïque de végétation naturelle et de cultures (classe 40) à partir d'une couverture arborée (classe 50).

Enfin, lors de l'interprétation de ce graphe, il est important de garder à l'esprit les résultats de classification des images sentinelles présentés plus haut. Ceux-ci montrent qu'il est difficile de différencier les différents types d'occupation du sol, et l'expérience de terrain montre, elle, que les cultures de vanille ressemblent souvent à des couverts plutôt arborés, comme on peut le voir sur la Figure 12. Il est donc probable que ces cultures entrent dans une classe différente dans la classification ESACCI-LC.



*Figure 12 : Photographie d'une parcelle de vanille aux alentours du village d'Ambarabaha, Région SAVA, Madagascar. Janvier 2019.*

## 5.3 Modèle multi-agents

### 5.3.1 Implémentation du modèle

L'analyse des statistiques a permis la mise en place de règles de décision pour les agents du modèle. Il a été décidé de faire un schéma de décision relatif à l'installation de nouvelles parcelles de riz, et un autre pour les parcelles de vanille. Ces décisions sont prises par chacun des agents « agriculteur » du modèle à chaque itération de la simulation, une itération correspondant à 1 an de culture.

Pour chaque itération, le fonctionnement du modèle est le suivant :

Les agriculteurs, situés au village, décident chacun de trouver un emplacement pour une parcelle de riz. Pour ce faire, il leur faut trouver un patch dont la pente soit comprise entre les limites définies par l'utilisateur, que l'occupation du sol ne soit ni une culture ni une jachère, et que la somme des distances parcelle – village et parcelle – cours d'eau soit minimale. Afin de prendre en compte une pondération entre ces deux distances (il est peut-être plus important d'être proche du village que proche du cours d'eau), un facteur multiplicatif est ajouté à chaque distance. Celui-ci peut également être défini par l'utilisateur. Lorsque l'emplacement est trouvé, l'occupation du sol est changée et un agent « riz » est créé à cet emplacement. Le nombre de parcelles de riz à implanter est défini par le nombre de parcelles par agriculteur. Chaque agent vérifie donc d'abord s'il faut ou non ajouter une parcelle.

Ensuite, c'est au tour des parcelles de vanille d'être implantées. Suivant le même principe que pour le riz, les agents vérifient d'abord qu'ils puissent ajouter une parcelle ou non. Dans le cas où le nombre de parcelles de vanille total n'est pas encore égal au nombre de parcelles de vanille par agriculteur multiplié par le nombre d'agriculteurs, l'agent pourra ajouter une parcelle. Pour ce faire, il suivra un schéma de décision similaire à celui du riz, mais pour lequel les valeurs des paramètres diffèrent. Ici aussi, la couverture du sol est modifiée et un agent « vanille » est créé sur le patch.

Afin de prendre en compte les durées de culture, chaque agent « riz » et « vanille » disparaît au bout du temps de culture indiqué. Ainsi, le riz disparaît chaque année, laissant place à de nouvelles cultures. La vanille quant à elle reste en place durant 5 ans avant de disparaître pour laisser place à de nouvelles cultures. Lorsque ces agents disparaissent, sont créés des agents « jachère ». Ceux-ci permettent d'empêcher une nouvelle culture d'arriver directement sur le patch libéré. Lorsque le temps de jachère est dépassé, l'agent disparaît lui aussi pour laisser la place à de nouvelles cultures de riz ou de vanille. Dans l'environnement du modèle, les jachères sont représentées par un papillon, le riz par une plante, la vanille par une fleur, et les agriculteurs par des personnes.

L'environnement a quant à lui été modélisé grâce à la classification effectuée sur l'image Bing, puis ensuite simplifiée de manière à retirer les cultures initiales et ne démarrer qu'avec les classes forêt et intermédiaire. Cette simplification s'est faite en convertissant les cultures présentes en couverture intermédiaire.

### 5.3.2 Sorties du modèle

Le modèle produit donne d'une part la répartition des cultures au sein du bassin modélisé, via une carte évoluant à chaque itération, et d'autre part l'évolution de la surface totale de chaque type d'occupation du sol via le nombre de patches de chaque classe. Ceci permet donc de connaître non seulement les proportions de chaque type d'occupation du sol dans le bassin, mais aussi leur spatialisation. La figure suivante montre l'évolution de l'environnement aux années 0, 5, 10, 15, 20 et 25 après le début de la simulation.

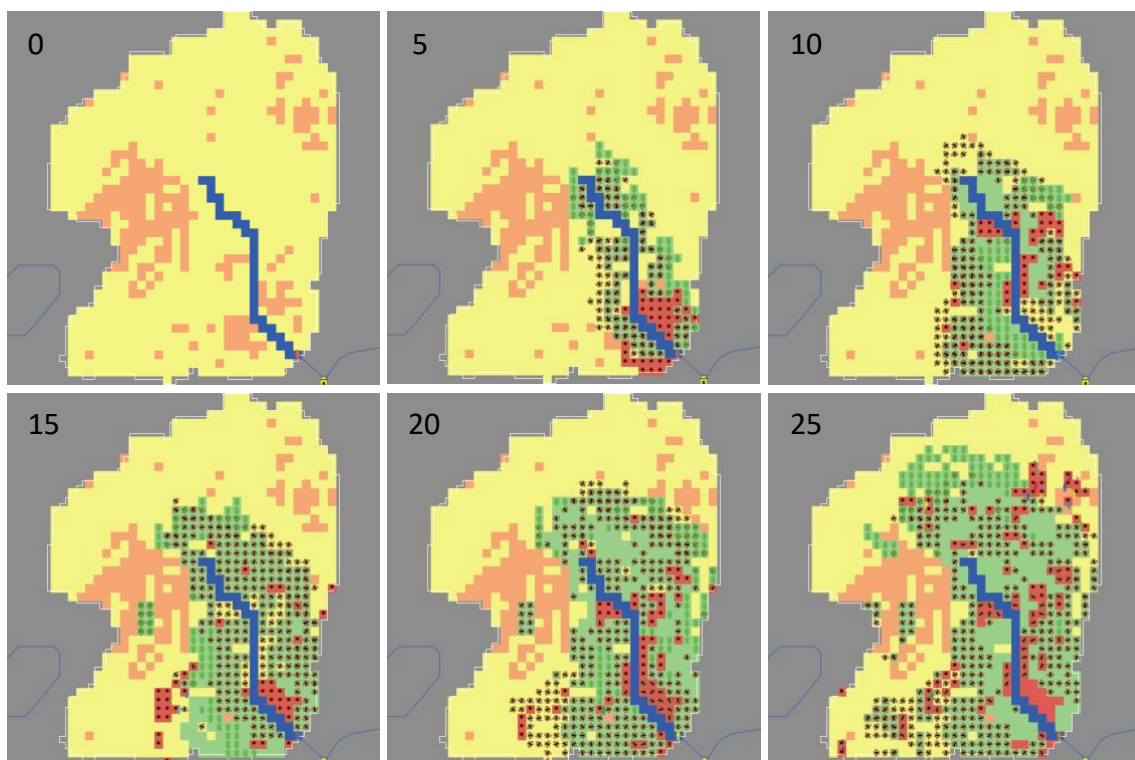


Figure 13 : Évolution de l'environnement du modèle NetLogo. Patches : jaune : classe intermédiaire ; orange : forêt ; bleu : cours d'eau ; vert : riz pluvial présent ou ayant été présent ; rouge : vanille présente ou ayant été présente. Symboles : plante : culture de riz ; fleur : culture de vanille ; papillon : jachère.

Comme on peut le constater ici, il a été décidé de commencer la simulation avec un bassin sans culture. Celui-ci ne comporte donc que des patches de forêt (orange) et d'occupation du sol intermédiaire (jaune). Ensuite se poursuit d'année en année la propagation des cultures de riz et de vanille ainsi que des parcelles en jachère. Étant donné les règles de décision imposées aux agents, nous observons ici que les cultures tendent à suivre le cours d'eau tout en évitant les parties forestières. Ceci est dû au fait que les pentes

présentent dans ces parties sont particulièrement élevées et sont donc évitées pour l'implantation de cultures. On peut remarquer aussi que les cultures ont tendance à être regroupées par type. Ceci est probablement dû au fait que les agents choisissent d'abord où installer les parcelles de riz, ensuite celles de vanille. Or, on peut s'attendre que les réels agriculteurs ne respectent pas d'ordre concernant l'installation.

Le graphe suivant montre l'importance des différentes classes d'occupation du sol tout au long de la simulation.

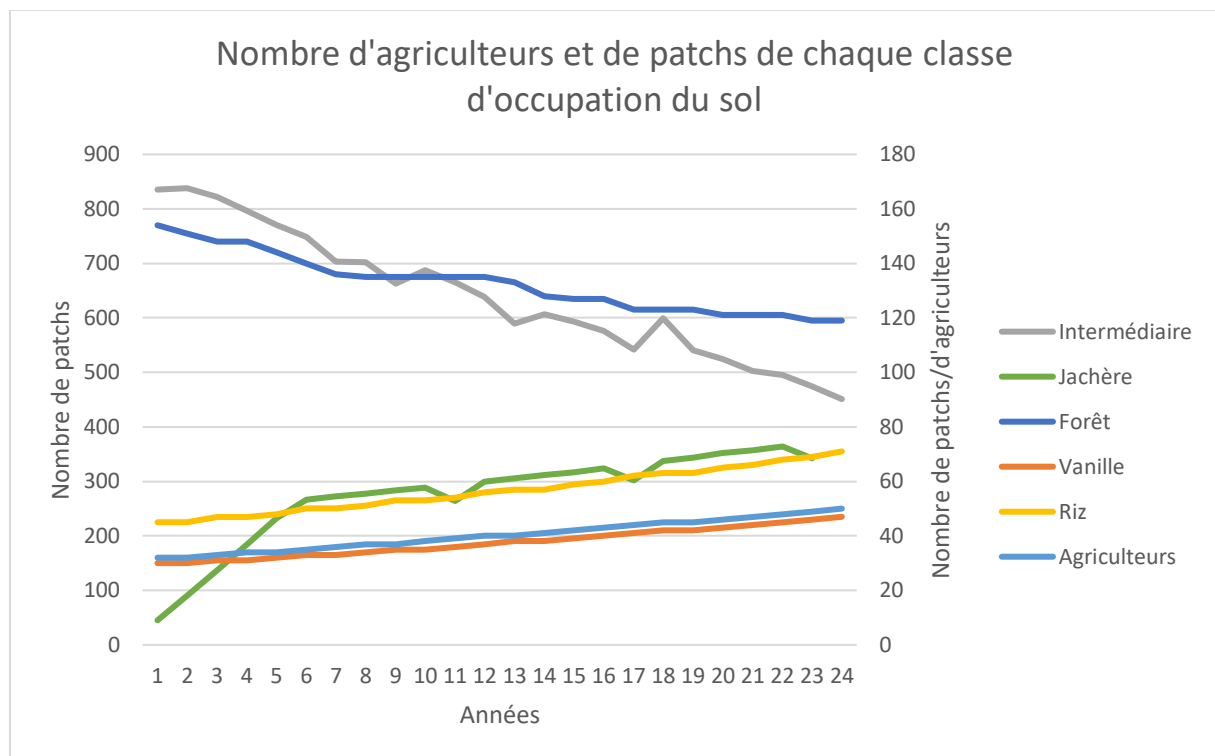


Figure 14 : Évolution des surfaces des classes d'occupation du sol et du nombre d'agriculteurs. Intermédiaire, jachère : axe primaire. Forêt, vanille, riz et agriculteurs : axe secondaire

Sur ce graphe, les valeurs de la classe intermédiaire se trouvent sur l'axe de gauche, tandis que les valeurs des autres classes se trouvent sur l'axe de droite. On peut donc observer que la diminution se fait principalement pour la classe intermédiaire, ce qui peut être attendu étant donné l'importance de cette classe au début de la simulation. Aussi, une légère diminution se fait pour la classe de forêt, ces zones étant évitées à cause des pentes trop importantes. L'évolution des classes de vanille et de riz provient de la démographie, comme on peut le voir sur le graphe. En effet, le nombre d'agriculteurs augmente à chaque itération du modèle, et donc aussi le nombre de parcelles cultivées. Notons enfin qu'une partie importante et croissante des parcelles se retrouvent en jachère.

Afin de mieux comprendre les sorties du modèle, le tableau suivant reprend les paramètres utilisés pour la simulation présentée ci-dessus. Dans ce tableau, les poids sont utilisés dans le calcul d'un paramètre D à minimiser par l'agent dans le choix de l'emplacement d'une parcelle (éq.6).

*Tableau 11 : Valeurs des paramètres utilisés dans la simulation*

| <b>Paramètre</b>                                      | <b>Valeur</b> |
|---|---------------|
| <b>Pente minimale vanille</b>                         | 0             |
| <b>Pente maximale vanille</b>                         | 10            |
| <b>Pente minimale riz</b>                             | 3             |
| <b>Pente maximale riz</b>                             | 18            |
| <b>Nombre de parcelles de vanille par agriculteur</b> | 1             |
| <b>Nombre de parcelles de riz par agriculteur</b>     | 1,5           |
| <b>Taux de croissance de la population [%]</b>        | 0,02          |
| <b>Nombre d'agriculteurs initial</b>                  | 30            |
| <b>Poids de la distance riz-village</b>               | 1             |
| <b>Poids de la distance riz-cours d'eau</b>           | 1             |
| <b>Poids de la distance vanille-village</b>           | 1,5           |
| <b>Poids de la distance vanille-cours d'eau</b>       | 1             |

## 5.4 Analyse de sensibilité

Afin de déterminer l'influence des paramètres sur le modèle produit, une analyse de sensibilité a été menée en faisant varier chacun des paramètres vers une valeur maximale et une valeur minimale, tout en gardant les autres paramètres inchangés par rapport au modèle initial. Les simulations ont été faites sur une période de 20 ans, et les valeurs de nombre de patches de chaque classe ont été relevées au début et à la fin de chaque simulation. Ensuite, la différence entre les nombres de patches pour les valeurs maximale et minimale des paramètres ont été calculées. Les résultats sont montrés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 12 : Différences de nombre de patches des différentes classes pour chaque paramètre analysé dans l'analyse de sensibilité

|  | Différence de nombre de patches pour les valeurs max et min des paramètres |     |       |     |         |     |               |      |         |     |
|--|--|-----|-------|-----|---------|-----|---------------|------|---------|-----|
|  | Riz  |     | Forêt |     | Vanille |     | Intermédiaire |      | Jachère |     |
|  | Début  | Fin | Début | Fin | Début   | Fin | Début         | Fin  | Début   | Fin |
| <b>Taux de croissance de la population</b> | 0  | 57  | 0     | -29 | 0       | 38  | 0             | -221 | 0       | 155 |
| <b>Pente max vanille</b>                   | 0  | 0   | 6     | -4  | 0       | 0   | -6            | -19  | 0       | 23  |
| <b>Pente max riz</b>                       | 0  | 0   | -12   | -10 | 0       | 0   | 12            | 15   | 0       | -5  |
| <b>Pente min vanille</b>                   | 0  | 0   | 4     | 3   | 0       | 0   | -4            | -11  | 0       | 8   |
| <b>Pente min riz</b>                       | 0  | 0   | 6     | -11 | 0       | 0   | -6            | 64   | 0       | -53 |
| <b>Nbr agri au début</b>                   | 45   | 63  | -22   | -41 | 30      | 42  | -53           | -334 | 45      | 270 |
| <b>Nbr riz agri</b>                        | 90   | 126 | -25   | -69 | 0       | 0   | -65           | -544 | 90      | 487 |
| <b>Nbr vanille agri</b>                    | 0  | 0   | -13   | -22 | 30      | 84  | -17           | -79  | 0       | 17  |
| <b>Poids dist riz hydro</b>                | 0  | 0   | -5    | -1  | 0       | 0   | 5             | -14  | 0       | 15  |
| <b>Poids dist riz village</b>              | 0  | 0   | -13   | 6   | 0       | 0   | 13            | 9    | 0       | -15 |
| <b>Poids dist vanille hydro</b>            | 0  | 0   | 5     | 6   | 0       | 0   | -5            | 1    | 0       | -7  |
| <b>Poids dist vanille village</b>          | 0  | 0   | -9    | 5   | 0       | 0   | 9             | -18  | 0       | 13  |

On observe dans ce tableau que seuls les paramètres concernant le nombre d'agriculteurs au début de la simulation, ou le nombre de parcelles par agriculteur ont une influence sur le nombre patches de riz ou de vanille au début de la simulation, ce qui est tout à fait logique. En augmentant le nombre d'agriculteurs ou de parcelles par agriculteur, nous nous attendons forcément à une augmentation du nombre de cultures. La croissance démographique joue elle bien entendu sur le nombre de patches en fin de simulation, tandis que tous les autres paramètres n'ont pas d'influence sur le nombre de patches de riz ou de vanille.

En ce qui concerne les jachères, on s'attend aussi à une dépendance par rapport aux nombres de parcelles cultivées, ce qui est bien le cas. Cependant, on observe aussi de légères différences pour les autres paramètres, alors que ceux-ci ne devraient pas influencer le

nombre de parcelles de jachère mais plutôt leur position. Ces différences étant relativement faibles, une hypothèse est qu'elles soient dues à des instabilités du logiciel.

Il est plus intéressant de regarder l'évolution des autres classes, à savoir la forêt et la classe intermédiaire. En effet, la plupart des paramètres ont une influence sur la position des parcelles de culture et donc sur le type de classe d'occupation du sol modifié par l'implantation de nouvelles parcelles. On observe que les différences sont en général assez faibles, sauf pour les paramètres influençant le nombre de cultures. Notons cependant que la variation de la pente montre une influence légèrement plus élevée que le poids des distances dans le choix de l'emplacement.

Dans l'interprétation de ces données, il est important de garder à l'esprit qu'une grande majorité de patchs sont classés en tant qu'intermédiaire en termes d'occupation du sol. De ce fait, la modification des paramètres n'a qu'une légère influence sur le type d'occupation du sol supprimé lors de l'implantation de nouvelles cultures, étant donné que la plupart des patchs sont de type intermédiaire.

## 6 Discussion

### 6.1 Base de données

La mise en place de la base de données peut être séparée en deux phases distinctes. Premièrement la récolte de données de terrain, et secondement la récolte et production de données génériques. En ce qui concerne les données de terrain, il apparaît que le travail de récolte de données GPS s'est vu être extrêmement chronophage d'une part, mais aussi difficile à réaliser avec précision d'autre part, du fait de la topographie et de la végétation. Ceci a donc engendré la visite de 29 parcelles de riz ou vanille seulement, pour lesquelles des points GPS ont été enregistrés aux extrémités. Ce nombre est donc fort restreint et ne permet pas de couvrir une zone importante du territoire (Figure 6). De plus, les parcelles se trouvent être assez éparpillées, et il n'a pas été possible de visiter l'ensemble des parcelles d'un agriculteur. Il n'est donc pas possible de représenter ou d'avoir une idée de la répartition des parcelles d'un agriculteur autour du village. Enfin, la difficulté d'accès aux bords des parcelles a pu provoquer des imprécisions dans la mesure de la surface cultivée.

Outre ces données, des enquêtes menées par le doctorant auraient dû permettre une meilleure compréhension de la dynamique présente dans le bassin et des schémas décisionnels des agriculteurs. Cependant, les résultats de ces enquêtes n'ont pas été disponibles à temps pour permettre leur analyse et leur incorporation dans la base de données. Ceci représente donc un manque important.

Pour ce qui est des données génériques, il a été possible d'en produire et d'en récolter une série. Les données physiques disponibles permettent de représenter assez bien l'environnement étudié en termes de d'hydrographie, relief ou pente. Ces données ont par ailleurs pu être combinées aux données GPS des parcelles, fournissant des informations utiles. Les cartes d'occupation du sol ESACCI-LC disponibles sont, elles, une information utile pour l'étude de la dynamique de changement d'occupation du sol du fait de leur résolution temporelle et du laps de temps couvert. Néanmoins, leur résolution spatiale limite l'interprétation.

En ce qui concerne la réalisation d'une carte d'occupation du sol via l'image Sentinel 2, il est étonnant que la classification n'ait pas donné de résultat plus convaincant au vu de la comparaison des signatures spectrales de riz et vanille. Cependant, il est important de garder à l'esprit que le bassin versant est couvert de beaucoup d'autres types de végétation qui présentent peut-être eux des signatures spectrales plus similaires. Seules les signatures des parcelles de riz et vanille ont été comparées ici. Afin de réaliser de meilleures classifications des images Sentinel 2, il pourrait donc être intéressant de réaliser un travail de terrain visant à répertorier un ensemble de zones d'entraînement de l'algorithme pour chaque type

d'occupation du sol, pour ensuite effectuer une classification supervisée basée sur les données de terrain. Dans le cadre de ce mémoire, la classification effectuée était non supervisée étant donné que les seules informations de terrain disponibles étaient pour les classes de riz pluvial et de vanille.

La classification effectuée sur l'image enregistrée de Bing Aerial 2019 a permis de produire une carte de meilleure qualité, grâce à la résolution plus fine disponible. Cependant, la classification reste non optimale en ce sens qu'une grande partie du territoire est classée dans deux classes différentes pour lesquelles il est impossible de trouver de réalité de terrain correspondante. Aussi, l'étendue fort limitée de l'image enregistrée ne permettrait pas d'application à de grandes zones géographiques. Cette carte a cependant quand même pu être utilisée par après.

## 6.2 Analyse des données

Grâce à la base de données mise en place, il a été possible de calculer des statistiques descriptives sur les caractéristiques de parcelles visitées. De ces statistiques (Section 5.2.1), il a été possible de tirer plusieurs informations pouvant être utilisées dans le modèle. Cela étant dit, il est important de garder à l'esprit la grande variabilité des données, ainsi que leur nombre restreint. En effet, on peut observer que les écarts-type sont importants pour l'aire des parcelles, et c'est donc faire un choix important que de prendre l'aire médiane comme aire de référence pour une culture, la variabilité étant importante. Aussi, nous pouvons observer de grandes différences entre les pentes minimales et maximales des parcelles cultivées. Afin de consolider les données et donc les statistiques effectuées dessus, il serait bon d'agrandir la base de données du point de vue du nombre de parcelles visitées. Ces statistiques donnent donc des indications sur les caractéristiques générales des parcelles, mais sont à utiliser avec des précautions.

Le modèle de régression logistique et l'ANOVA ont été utilisés dans le but d'estimer quels sont les paramètres permettant d'expliquer le choix de l'emplacement d'une nouvelle culture. Il en ressort que la pente et la distance entre la parcelle et le village sont des variables explicatives. A nouveau, ces résultats sont à utiliser précautionneusement au vu du peu de données utilisées dans le modèle de régression. Ceci donne donc une indication, mais est à confirmer par de plus amples études de terrain. En outre, il est tout à fait possible que des paramètres importants dans le choix des agents n'aient pas été testés par manque d'information. L'analyse des données des enquêtes peut éventuellement apporter des éléments nouveaux à ce niveau-là.

Les données d'occupation du sol ESACCI-LC ont été utilisées pour suivre l'historique de changement d'occupation du sol entre 1992 et 2015. Il a été possible de détecter une zone dans laquelle un changement s'est produit entre 1997 et 2000, mais aucune donnée permettant d'expliquer ce phénomène n'est disponible pour cette période. Une hypothèse revient donc à dire que la déforestation a été causée par une augmentation de la population, engendrant une mise en culture des terres jusque-là boisées. Malheureusement, la résolution spatiale limitée de ces images n'a pas permis d'aller plus en détails dans l'observation et la compréhension de ce changement.

### 6.3 Modèle multi-agents

L'implémentation du modèle a été basée sur les analyses faites sur les données. Celles-ci étant limitées, il convient de considérer les résultats du modèle en conséquence.

Le modèle réalisé permet de simuler l'occupation du sol dans un sous bassin versant du bassin d'Antsahovy en prenant en compte les paramètres physiques de l'environnement provenant de la base de données. Les règles de décisions étant basées sur les quelques données disponibles, elles pourraient être précisées par la suite via une amélioration de la base de données, mais aussi via une analyse des réponses aux enquêtes. De plus, ces enquêtes peuvent apporter une dimension autre que la dimension purement physique prise en compte pour le moment dans le modèle. En effet, il n'est pas impossible que des critères socio-économiques dérivés des enquêtes s'avèrent être des éléments fondamentaux à la prise de décision des agriculteurs.

Il est difficile de réaliser une validation sur les sorties du modèle étant donné le peu d'information sur la position des cultures actuellement (l'échantillon dans ce sous bassin versant n'est constitué que de 6 parcelles), mais on peut constater que les parties couvertes de forêt dans la réalité le restent en partie dans le modèle. Ceci donne donc une indication sur la direction que prend le changement d'occupation du sol. Notons que les parties recouvertes de forêt sont épargnées des cultures étant donné leur forte pente. Néanmoins, lorsque les pentes ne sont pas assez importantes, la forêt est quand même remplacée par des cultures, comme on peut le voir en bas à droite des images de la Figure 13. Pour ce qui est des parties classées en « intermédiaire », il est difficile de comprendre la réalité de terrain et donc de valider ou non leur évolution.

Pour terminer, rappelons que le modèle produit reste très simple dans la mesure où le nombre de paramètres pris en compte est limité, ce qui a pour conséquence de réduire les possibilités de schémas de prise de décision ainsi que leur pertinence.

## 6.4 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité met en évidence les paramètres pour lesquels le changement de valeur a le plus d'impact sur les résultats du modèle. Comme on peut s'y attendre, ce sont les paramètres en lien avec le nombre d'agriculteurs ou le nombre de parcelles qui ont la plus grande influence dans l'analyse de sensibilité. Ceci est logique étant donné que les proportions de chaque classe d'occupation du sol dépendent directement de la quantité de cultures dans le bassin versant.

Par ailleurs, il est possible d'observer que les paramètres relatifs à la pente ont eux aussi un rôle relativement important dans les résultats du modèle, ce qui est normal puisque la pente est un paramètre décisif dans le choix de l'emplacement des cultures, et influence donc le type d'occupation du sol qui sera remplacé.

## 7 Conclusion

Le bassin d'Ankavia, situé dans la région SAVA au Nord-Est de Madagascar, et zone d'étude du projet GIRE-SAVA, fait face à divers risques hydriques dont les conséquences se font sentir au niveau sociétal, économique et écologique. Ces risques (crues, inondations, érosion, etc.) sont accentués par une déforestation incontrôlée, le changement climatique et une gestion foncière problématique. C'est dans le but de faire face à cette problématique que le projet GIRE-SAVA a été mis en place, visant à améliorer la gestion intégrée des ressources en eau dans ce bassin versant.

Le présent mémoire a été effectué dans ce cadre et a pour objectif la mise en place d'un modèle basé-agents reproduisant la dynamique de changement d'occupation du sol dans le bassin versant d'Antsahovy, sous bassin versant du bassin d'Ankavia. Dans cette optique, 3 objectifs spécifiques ont été établis.

Le premier objectif vise à la mise en place d'une base de données contenant les informations nécessaires à la mise en place du modèle. Pour ce faire, une campagne de prise de données GPS a été effectuée entre janvier et mars 2019 aux alentours du village d'Ambarabaha, situé au bord du bassin d'Antsahovy. Cette campagne a permis la visite de 29 parcelles de riz pluvial et de vanille dans lesquelles des points GPS ont été effectués aux différents coins afin d'en déterminer l'aire et la situation géographique. En plus de ces données de terrain, des données génériques ont été produites grâce à l'utilisation de données disponibles. Ainsi, la caractérisation du relief, de la pente et de l'exposition des parcelles a pu être effectuée. Enfin, une carte d'occupation du sol a été produite via l'utilisation d'une image Bing Aerial 2019. Ceci provenant de l'incapacité à produire une classification convenable à partir des images Sentinel 2.

Le second objectif vise à l'analyse des données récoltées et produites afin d'en extraire des informations relatives à la dynamique de changement d'occupation du sol dans le bassin versant, et à la prise de décision des agents modélisés. Pour ce faire, des statistiques univariées ont été calculées sur les différentes caractéristiques des parcelles. Ceci a permis de déterminer l'aire à utiliser dans le modèle pour les parcelles, les pentes minimales et maximales, etc. De plus, un modèle de régression logistique et une ANOVA ont été effectuées sur les caractéristiques des parcelles afin d'en apprendre plus sur celles qui influencent le plus le choix de l'emplacement des nouvelles parcelles. Il en ressort que la pente et la distance entre les parcelles et le village jouent un rôle important dans la prise de décision. Enfin, les données ESACCI-LC, relatives à l'occupation du sol à une résolution de 300m et couvrant la période 1992 à 2015, ont été analysées visuellement d'une part, et statistiquement d'autre part. Cela a permis la détection d'une zone plus restreinte dans laquelle un changement

conséquent a eu lieu entre 1997 et 2000, et qui a donc été choisi comme zone de modélisation.

Le troisième et dernier objectif vise quant à lui à la mise en place du modèle multi-agents. Pour ce faire, des règles de décision ont été déterminées sur base des données et des analyses effectuées dessus. Il en résulte un modèle encore assez simple, ne prenant qu'un nombre limité de paramètres en compte, à savoir ceux disponibles dans la base de données. Ce modèle simule le changement d'occupation du sol dans un sous bassin versant du bassin d'Antsahovy. La simulation permet d'avoir une idée de la propagation des cultures dans le bassin et donc de voir quelles sont les classes d'occupation du sol qui vont être touchées par cette propagation. Il est à noter que la validation du modèle n'est pas encore possible étant donné le manque de données de terrain ou de cartes d'occupation du sol précises. Néanmoins une observation des zones de forêt semble indiquer que le modèle va dans la bonne direction. Enfin, une analyse de sensibilité a été conduite sur les paramètres du modèle afin de déterminer quels paramètres influencent les plus les résultats de celui-ci. Il en ressort que les paramètres en lien avec le nombre de cultures sont les plus influents, comme attendu.

A la fin de ce mémoire, il apparaît donc qu'il a été possible de produire une ébauche de modèle basé-agent simulant le changement d'occupation du sol dans une zone réduite du bassin d'Antsahovy, et ce à partir d'une base de données relativement limitée. Il semble donc que ce modèle pourrait être amélioré par : i) la récolte d'un plus grand nombre de données sur les parcelles de riz et de vanille ; ii) l'inventaire complet des parcelles d'un certain nombre d'agriculteurs ; iii) des cartes d'occupation du sol plus précises, que ce soit pour l'analyse de l'historique ou pour la mise en place du modèle ; iv) la prise en compte d'un plus grand nombre de paramètres dans le modèle, et donc de schémas décisionnels plus aboutis. L'amélioration de ce modèle permettra d'une part de mieux comprendre les enjeux en lien avec le changement d'occupation du sol, ainsi qu'une prédiction de ce changement en regard des choix de gestion.

## 8 Annexes

### 8.1 Annexe 1 : Interface NetLogo 6.0.4 du modèle produit



Figure 15 : Interface NetLogo

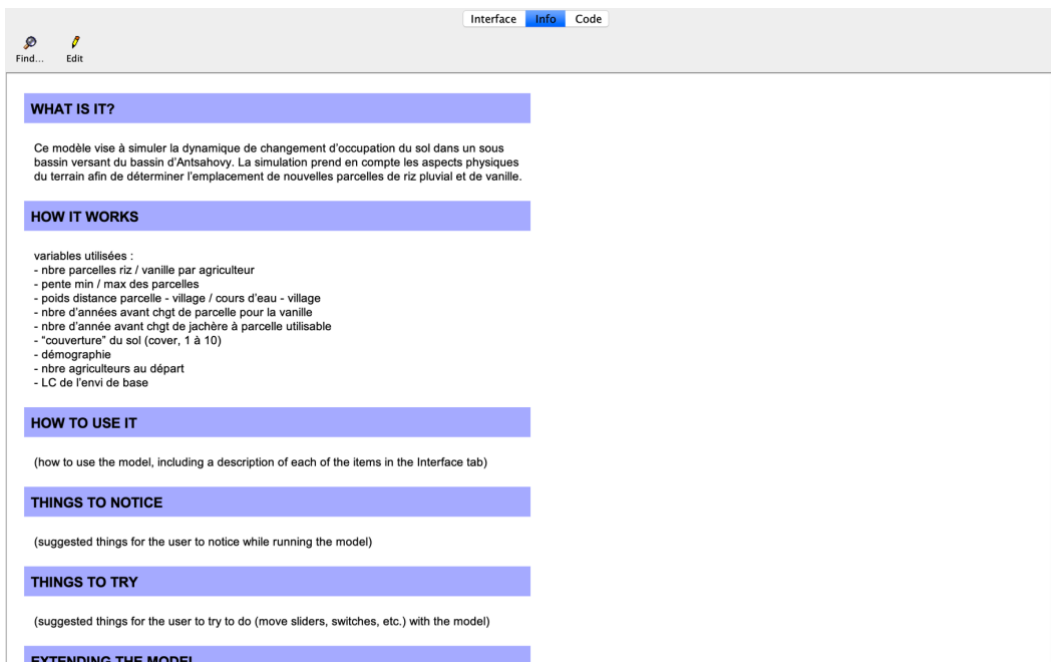


Figure 16 : Partie Informations du modèle NetLogo

```
Interface Info Code
Find... Check Procedures Indent automatically

1 extensions [ gis ]
2  globals [ hydro-dataset
3    SRTM-dataset
4    SBV-dataset
5    LC-dataset
6    slope-dataset
7    nbr-agris
8  ]
9
10 breed [agris agri]
11 breed [villages village]
12 breed [vanillas vanilla]
13 breed [fallows fallow]
14 breed [rices rice]
15
16 vanillas-own [
17   years
18 ]
19
20 fallows-own [
21   years
22 ]
23
24 patches-own [
25   SRTM
26   slope
27   LC
28   cover
29 ]
30
31 ;;;; SETUP ;;;;;;;;;;
32
33 to setup-gis
34   clear-all
35   set hydro-dataset gis:load-dataset "/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_GIS/Hydrographie.shp"
36   set SRTM-dataset gis:load-dataset "/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_GIS/SRTM_SBV.asc"
37   gis:apply-raster SRTM-dataset SRTM
38   ask patches [
39     set SRTM gis:raster-sample SRTM-dataset
40     self
41   ]
42   set SBV-dataset gis:load-dataset "/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_GIS/Sous_BV_Antsa.shp"
43   set slope-dataset gis:load-dataset "/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_GIS/Slope_SBV.asc"
44   gis:apply-raster slope-dataset slope
45   ask patches [
46     ifelse (slope <= 0) or (slope >= 0) [
47       set slope slope [
48
```

Figure 17 : Code NetLogo

## 8.2 Annexe 2 : Données récoltées sur les parcelles visitées (GPS, photos, notes)

| N° propriétaire | Type de culture | Points GPS                | Âge (si jachère) | N° Photos (voir dossier "Photos") | Notes  |
|-----------------|-----------------|---------------------------|------------------|-----------------------------------|--|
| <b>1</b>        | Vanille         | 521 - 526 (+ 21a et 521A) |                  |                                   |  |
|                 | Jachère         | 718                       | 5 ans            | 372 - 379                         | Environ 7ha; en bordure: cultures de cacao, bananes, café. Végétation très dense, "impénétrable", arbres allant jusqu'à plusieurs mètres de haut, plantes grimpantes |
| <b>2</b>        | Vanille         | 527 - 530                 |                  |                                   |  |
| <b>3</b>        | Vanille         | 531 - 534                 |                  |                                   |  |
| <b>4</b>        | Vanille         | 535 - 539 + 540 - 543     |                  |                                   |  |
|                 | Riz Pluvial     | 544 - 547                 |                  |                                   |  |
| <b>5</b>        | Riz Pluvial     | 548 - 552                 |                  |                                   |  |
| <b>6</b>        | Vanille         | 555 - 563 + 564 - 567     |                  |                                   |  |
| <b>7</b>        | Vanille         | 568 - 572                 |                  |                                   |  |
|                 | Riz Pluvial     | 573 - 576                 |                  |                                   |  |
| <b>8</b>        | Vanille         | 578 - 581 + 582 - 586     |                  |                                   |  |
| <b>9</b>        | Vanille         | 587 - 591                 |                  |                                   |  |
| <b>10</b>       | Vanille         | 592 - 597                 |                  |                                   |  |
|                 | Jachère         | 761                       | 3 ans            | 638 - 639                         |  |
|                 | Jachère         |                           | 2 ans            | 642 - 643                         |  |
|                 | Forêt primaire  |                           |                  | 640 - 641                         | réserve de l'agriculteur, jamais touché pour l'agriculture mais dégradé par les cyclones   |
| <b>11</b>       | Riz Pluvial     | 598 - 605                 |                  |                                   |  |
|                 | Vanille         | 606 - 619                 |                  |                                   |  |
| <b>12</b>       | Vanille         | 620 - 623                 |                  |                                   |  |
|                 | Jachère         | 764                       | 1,5 ans          | 653 - 654                         |  |
| <b>13</b>       | Vanille         | 624 - 627 + 628 - 636     |                  |                                   |  |
| <b>14</b>       | Vanille         | 637 - 643                 |                  |                                   |  |
| <b>15</b>       | Vanille         | 644 - 648                 |                  |                                   |  |
| <b>16</b>       | Vanille         | 649 - 656                 |                  |                                   |  |

|           |                |                          |       |           |  |
|-----------|----------------|--------------------------|-------|-----------|--|
| <b>17</b> | Riz<br>Pluvial | 658 - 668                |       |           |  |
|           | Jachère        | A côté de riz<br>pluvial | 1 an  | 321 - 325 |  |
| <b>18</b> | Riz<br>Pluvial | 670 - 688                |       |           |  |
| <b>19</b> | Riz<br>Pluvial | 689 - 700                |       |           | Parcelle divisée en 2 parties l'une<br>contre l'autre. Voir données GPS pour<br>déterminer les points manquants<br>(zone isolée, seules données prises là-<br>bas) |
|           | Jachère        | à côté du riz            | 4 ans | 326 - 327 |  |
| <b>20</b> | Vanille        | 719 - 723                |       |           |  |
|           | Jachère        |                          | 2 ans | 388 - 389 |  |
|           |                |                          | 3 ans | 390 - 391 |  |
|           |                |                          | 1 an  | 392 - 393 | Déjà quelques petits arbres, beaucoup<br>d'arbustes (+- 1m)  |
| <b>21</b> | Vanille        | 727 - 742                |       |           |  |
|           | Riz<br>Pluvial | 743 - 750                |       |           |  |
|           | Jachère        | au-dessus<br>du riz      | 1 an  | 411 - 412 | Plutôt des plantes herbacées, environ<br>1,5m de haut  |

## 8.3 Annexe 3 : Formulaire d'enquêtes (A. Benitsiafantoka)

### GUIDE D'ENTRETIEN POUR LES AGRICULTEURS

N° de l'entretien : \_\_\_\_\_ Date : \_\_\_\_\_  
 Nom du chef de ménage : \_\_\_\_\_ Statut : \_\_\_\_\_  
 âge : \_\_\_\_\_ Sexe : \_\_\_\_\_  
 Commune/ fokontany/ village : \_\_\_\_\_ Sous-bassin : \_\_\_\_\_

#### I. Ménage et famille

Taille du ménage : \_\_\_\_\_  
 Hommes : \_\_\_\_\_ Actifs : \_\_\_\_\_ Inactifs : \_\_\_\_\_  
 Femmes : \_\_\_\_\_ Actifs : \_\_\_\_\_ Inactifs : \_\_\_\_\_  
 Enfants : \_\_\_\_\_ scolarisés : \_\_\_\_\_ Non scolarisés : \_\_\_\_\_  
 Consommation journalière (en riz / kapoka): \_\_\_\_\_  
 Consommation pendant les soudures : \_\_\_\_\_ Durée : \_\_\_\_\_ Mois de soudure : \_\_\_\_\_  
 Origine (immigrant/autochtone) : \_\_\_\_\_  
 Sources d'énergie et origine ? \_\_\_\_\_ Type d'utilisation ? \_\_\_\_\_ Quantité par utilisation ? \_\_\_\_\_  
 Cultures prioritaires : \_\_\_\_\_ Raisons de ces choix : \_\_\_\_\_  
 Réaction dans le cas de la fluctuation de prix de certains produits agricoles

#### II. Capital et exploitation:

##### 1. Riziculture irriguée

|   |                          |  |                   |
|---|--------------------------|--|-------------------|
| Origine du terroir agricole (Achat ? Héritage ?)              | Taille de l'exploitation | Age de l'exploitation                              | Espèces cultivées |
| Critère du choix de parcelle agricole                         |                          |  |                   |
| Mode d'exploitation (technique culturale)                     |                          | Accès à l'eau de l'irrigation                      |                   |
| Utilisation des intrants agricoles                            | Type                     | Quantité   | Fréquence         |
| Matériel utilisés   | Nombre de travailleurs   | Rendement par saison                               |                   |
| Evolution annuelle de rendement                               |                          |  |                   |
| Jachère (période et durée)                                    |                          | Distance des champs/village                        |                   |
| Calendrier culturale  |                          | La production est elle suffisante pour le ménage ? |                   |
| Destination de la production ? (%autoconsommation ? %vente ?) |                          |  |                   |
| Contrainte de production                                      |                          |  |                   |
| Proposition de solution pour améliorer la situation           |                          |  |                   |

##### 2. Riziculture pluviale

|   |                          |  |                   |
|---|--------------------------|--|-------------------|
| Origine du terroir agricole (Achat ? Héritage ?)              | Taille de l'exploitation | Age de l'exploitation                              | Espèces cultivées |
| Critère du choix de parcelle agricole                         |                          |  |                   |
| Mode d'exploitation (technique culturale)                     |                          |  |                   |
| Utilisation des intrants agricoles                            | Type                     | Quantité   | Fréquence         |
| Matériels utilisés  | Nombre de travailleurs   | Rendement par saison                               |                   |
| Evolution annuelle de rendement                               |                          |  |                   |
| Jachère (période et durée)                                    |                          | Distance des champs/village                        |                   |
| Calendrier culturale  |                          | La production est elle suffisante pour le ménage ? |                   |
| Destination de la production ? (%autoconsommation ? %vente ?) |                          |  |                   |
| Contrainte de production                                      |                          |  |                   |
| Proposition de solution pour améliorer la situation           |                          |  |                   |

##### 3. Culture des rentes

|   |                          |  |                   |
|---|--------------------------|--|-------------------|
| Origine du terroir agricole (Achat ? Héritage ?)              | Taille de l'exploitation | Age de l'exploitation                              | Espèces cultivées |
| Critère du choix de parcelle agricole                         |                          |  |                   |
| Mode d'exploitation (technique culturale)                     |                          |  |                   |
| Utilisation des intrants agricoles                            | Type                     | Quantité   | Fréquence         |
| Matériel utilisés   | Nombre de travailleurs   | Rendement par saison                               |                   |
| Evolution annuelle de rendement                               |                          |  |                   |
| Jachère (période et durée)                                    |                          | Distance des champs/village                        |                   |
| Calendrier culturale  |                          | La production est elle suffisante pour le ménage ? |                   |
| Destination de la production ? (%autoconsommation ? %vente ?) |                          |  |                   |
| Contrainte de production                                      |                          |  |                   |
| Proposition de solution pour améliorer la situation           |                          |  |                   |

#### 4. Autres cultures vivrières

|   |                          |  |                   |
|---|--------------------------|--|-------------------|
| Origine du terroir agricole (Achat ? Héritage ?)              | Taille de l'exploitation | Age de l'exploitation                              | Espèces cultivées |
| Critère du choix de parcelle agricole                         |                          |  |                   |
| Mode d'exploitation (technique culturale)                     |                          |  |                   |
| Utilisation des intrants agricoles                            | Type                     | Quantité   | Fréquence         |
| Matériel utilisés   | Nombre de travailleurs   | Rendement par saison                               |                   |
| Evolution annuelle de rendement                               |                          |  |                   |
| Jachère (période et durée)                                    |                          | Distance des champs/village                        |                   |
| Calendrier culturale  |                          | La production est elle suffisante pour le ménage ? |                   |
| Destination de la production ? (%autoconsommation ? %vente ?) |                          |  |                   |
| Contrainte de production                                      |                          |  |                   |
| Proposition de solution pour améliorer la situation           |                          |  |                   |

#### 5. Elevage

|   |        |                     |
|---|--------|---------------------|
| Espèces   | Nombre | Technique d'élevage |
| Source d'alimentation                                       |        |                     |
| Destination (Force de travail ? Autoconsommation ? Vente ?) |        |                     |
| La production est-elle suffisante pour le ménage ?          |        |                     |
| Problèmes et contraintes liés à l'élevage                   |        |                     |
| Proposition de solution                                     |        |                     |

#### 6. Autres activités

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

### III. Environnement, Santé et ressource en eau

|   |           |                                |          |
|---|-----------|--------------------------------|----------|
| Les productions sont-elles suffisantes pour le ménage ?               |           |                                |          |
| Activités nécessitant l'eau du fleuve                                 |           |                                |          |
| Utilisation de latrines   |           | Types de latrines existants    |          |
| Utilisation des dépôts d'ordures                                      |           | Type                           |          |
| Existence d'infrastructure d'adduction d'eau potable                  |           | Type                           |          |
| Recours à la déforestation  | Raison    | Fréquence et période           | Quantité |
| Action de reforestation   | Organisme | Fréquence et durée de repousse | Quantité |
| Connaissance des législations sur la déforestation et l'environnement |           |                                |          |
| Application et engagement personnelle envers ces textes               |           |                                |          |
| Evolution du climat   |           |                                |          |
| Evolution de la ressource en eau et disponibilité                     |           |                                |          |
| Evolution des sols et de la fertilité                                 |           |                                |          |
| Evolution des ressources végétale et disponibilité                    |           |                                |          |
| Contraintes ressentis par rapport à l'environnement                   |           |                                |          |
| Indicateurs de l'abondance de ressource en eau                        |           |                                |          |
| Indicateur de l'insuffisance des ressources en eau                    |           |                                |          |
| Indicateur de la dégradation de la qualité de l'eau                   |           |                                |          |

## 8.4 Annexe 4 : Code Google Earth Engine

```
// Code Google Earth Engine
// Classification non supervisée d'une image Sentinel 2, 2019
// Bassin versant d'Antsahovy
// Analyse signature spectrale des parcelles visitées
// Mémoire Benoît Tondeur
// 2018 - 2019

var Antsahovy = ee.FeatureCollection('ft:1U2n-wlNXkYV261jnmWN-lfTh9naP45hPI_hRNR-4');
var clipMask = function (img){
return img.clip(Antsahovy)};
var Parcelles = ee.FeatureCollection("users/benoittondeur1/Parcelles");

// Définition des paramètres de visualisation de l'image en couleurs RGB
var RGBvis = {bands: ['B4', 'B3', 'B2'], min:300, max: 1800};

// Importation collection Sentinel 2
var imageCollection = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2");
var Senti2 = imageCollection
.filterMetadata('MGRS_TILE', 'equals', '39LUD')
.filterMetadata('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'less_than', 50)
.select('B2', 'B3', 'B4', 'B8')
.map(clipMask);
print('Info', Senti2);
var count = Senti2.size();
print('size of the image collection', count);

var Less_cloud = Senti2.sort('CLOUD_COVERAGE_ASSESSMENT').first();
print('Less_cloud_img', Less_cloud);
//Map.addLayer(Less_cloud, RGBvis, 'Less_cloud');

// Sélection image 2019, couverture nuageuse minimale
var img2019 = ee.ImageCollection(Senti2)
.filterDate('2019-01-01', '2019-12-31')
.filterMetadata('MGRS_TILE', 'equals', '39LUD')
.select('B2', 'B3', 'B4', 'B8')
.map(clipMask);
var img2019 = ee.ImageCollection(img2019)
.sort('CLOUD_COVERAGE_ASSESSMENT').first();
print('img2019', img2019);

// Visualisation image
Map.setCenter(50.10746048388967, -14.99732606920931); // Ambarabaha
Map.addLayer(img2019, RGBvis, 'RGB_2019');
//Map.addLayer(Senti2, FalseCvis, 'False Color Composite');

// Classification non supervisée
var training2019 = img2019.sample({
region: Antsahovy,
scale: 10,
```

```

    numPixels: 5000
  });

  var clusterer2019 = ee.Clusterer.wekaKMeans(7).train(training2019);
  var result2019 = img2019.cluster(clusterer2019);
  Map.addLayer(result2019.randomVisualizer(), {}, 'clusters2019');
  print('Info_clusters_2019',result2019);

  // Exportation image

  Export.image.toDrive({
    image: result2019,
    description: 'Clustering_S2_2019',
    region: Antsahovy,
    maxPixels: 1450680000,
    scale: 10
  });

  // Analyse de la signature spectrale des parcelles visitées
  var spectra = img2019.reduceRegions({
    collection: Parcelles,
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    scale: 10
  });
  print(spectra);

  Export.table.toDrive({
    collection: spectra,
    description: 'spectral_sign',
    fileFormat: 'CSV',
    selectors: (['Culture','Menage','B2','B3','B4','B8'])
  });

```

## 8.5 Annexe 5 : Code R

```
# Régression logistique sur les données des parcelles de riz et
vanille
# culture : 1 = riz / 0 = vanille
load("/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/Donnees
Ambarabaha/data_A.Rda")
descript_stat <- summary(data_A)
model <- glm(formula = culture ~ slope + dist + srtm + distv,family =
binomial,data = data_A)
summary(model)
anova(model,test="Chisq")

# analyse signature spectrale
model3 <- glm(formula = Culture ~ B2 + B3 + B4 + B8, family =
binomial, data = spectra_sign)
summary(model3)
anova(model3,test="Chisq")
```

## 8.6 Annexe 6 : Code NetLogo

```
extensions [ gis ]
globals [ hydro-dataset
  SRTM-dataset
  SBV-dataset
  LC-dataset
  slope-dataset
  nbr-agris
]

breed [agris agri]
breed [villages village]
breed [vanillas vanilla]
breed [fallows fallow]
breed [rices rice]

vanillas-own [
  years
]

fallows-own [
  years
]

patches-own [
  SRTM
  slope
  LC
  cover
]

;;;;;;;; SETUP ;;;;;;;;;;

to setup-gis
  clear-all
  set hydro-dataset gis:load-dataset
  "/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_GIS/Hydrographie.shp"
  set SRTM-dataset gis:load-dataset
  "/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_GIS/SRTM_SBV.asc"
  gis:apply-raster SRTM-dataset SRTM
  ask patches [
    set SRTM gis:raster-sample SRTM-dataset
    self
  ]
  set SBV-dataset gis:load-dataset
  "/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_GIS/Sous_BV_Antsa.shp"
  set slope-dataset gis:load-dataset
  "/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_GIS/Slope_SBV.asc"
  gis:apply-raster slope-dataset slope
  ask patches [
```

```

ifelse (slope <= 0) or (slope >= 0) [
  set slope slope] [
  set slope -99]
]
gis:set-world-envelope (gis:envelope-of SBV-dataset)
reset-ticks
gis:set-drawing-color white
gis:draw SBV-dataset 1
gis:set-drawing-color blue
gis:draw hydro-dataset 1
set LC-dataset gis:load-dataset
"/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_GIS/LC_Bing_SBV_2019.asc"
gis:apply-raster LC-dataset LC
ask patches with [LC = 4 or LC = 3] [
  set LC 2]
ask patches [set cover 10]
color-patches
create-villages 1
ask villages [
  setxy 36 0
  set shape "house"
]
ask patches [ if gis:intersects? self hydro-dataset and LC > 0 [
  set pcolor blue
  set slope 100
  set LC 100
  set cover 100
]]
end

to color-patches
  ask patches [
    if LC = 0 [ set pcolor gray ]
    if LC = 1 [ set pcolor orange + 2 ] ; forêt
    if LC = 2 [ set pcolor yellow + 2 ] ; intermédiaire
    if LC = 3 [ set pcolor green + 2 ] ; riz
    if LC = 4 [ set pcolor blue + 2 ]
    if LC = 5 [ set pcolor red + 1 ] ; vanille
    if LC = 100 [ set pcolor blue ]
  ]
end

to create_agris
  create-agris nbr-agris-start
  ask agris [
    setxy 33 3
    set shape "person"
  ]
end

to setup
  clear-all

```

```

setup-gis
set nbr-agris nbr-agris-start
create_agris
end

:::::: GO ::::::::::

to go
  if ticks = 25 [
    stop
  ]
  tick
  new_agris
  change_LC
  culture
  color-patches
  demography
  ask rices [
    set color green]
  ask vanillas [
    set color red]
  ask fallows [
    set color brown]

  if ticks = 5 [
    export-view
    "/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_output/model_ini_step5.png"
  ]
  if ticks = 10 [
    export-view
    "/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_output/model_ini_step10.png"
  ]
  if ticks = 15 [
    export-view
    "/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_output/model_ini_step15.png"
  ]
  if ticks = 25 [
    export-view
    "/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_output/model_ini_step20.png"
    export-all-plots "/Users/benoittondeur/Documents/Master_thesis/NetLogo_output/model_ini.txt"
  ]
end

to demography
  set nbr-agris (nbr-agris + demography-rate * nbr-agris)
end

to new_agris
  let i (nbr-agris - count agris)
  ask patch 33 3 [
    sprout-agris i
  ]

```

```

ask agris [
  set shape "person"
]
end

to culture
ask rices [
  ask patch-here [
    sprout-fallows 1]
  die
]

ask vanillas [
  set years years + 1
  if years = 6 [
    ask patch-here [
      sprout-fallows 1]
    die ]
]

ask agris [
  ;; RICE
  setxy 33 3
  while [ count rices < (count agris * nbr-rice-agri) ] [
    while [[LC] of patch-here = 3 or [LC] of patch-here = 5 or [slope] of patch-here > max-slope-rice or
[slope] of patch-here < min-slope-rice ] [
      face min-one-of patches with [ LC != 3 and LC != 5 and slope <= max-slope-rice and slope >= min-
slope-rice ] [
        Priz_vill * distance myself + Priz_hydro * distance one-of patches with [ LC = 100 ]
      ]
      forward 1
    ]
  ask patch-here [set LC 3
set cover cover - 8
sprout-rices 1]]

  ;; VANILLA
  setxy 33 3
  if count vanillas < (count agris * nbr-vani-agri) [
    while [[LC] of patch-here = 3 or [LC] of patch-here = 5 or [slope] of patch-here > max-slope-vani or
[slope] of patch-here < min-slope-vani or count fallows-here > 0] [
      face min-one-of patches with [ LC != 3 and LC != 5 and slope <= max-slope-vani and slope >= min-
slope-vani and count fallows-here = 0] [
        Pvani_vill * distance myself + Pvani_hydro * distance one-of patches with [ LC = 100 ]
      ]
      forward 1
    ]
  ask patch-here [set LC 5
set cover cover - 7
sprout-vanillas 1]
]]

```

```

;;; FALLOWS
ask rices [
  set shape "plant"
]

ask vanillas [
  set shape "flower"
]

ask fallows [
  set shape "butterfly"
  set years years + 1
  if years = 6 [
    die]
]
end

to change_LC
ask patches with [cover < 10 and LC != 100 and LC != 5] [
  set cover cover + 1]
ask patches with [ LC > 0 and LC < 100 ] [
  ;if cover = 10 [
  ;set LC 1]
  if cover > 2 and cover < 10 and count vanillas-here = 0 [
    set LC 2]
]
end

```

## 8.7 Annexe 7 : Cartes de pente et d'exposition produites via QGis

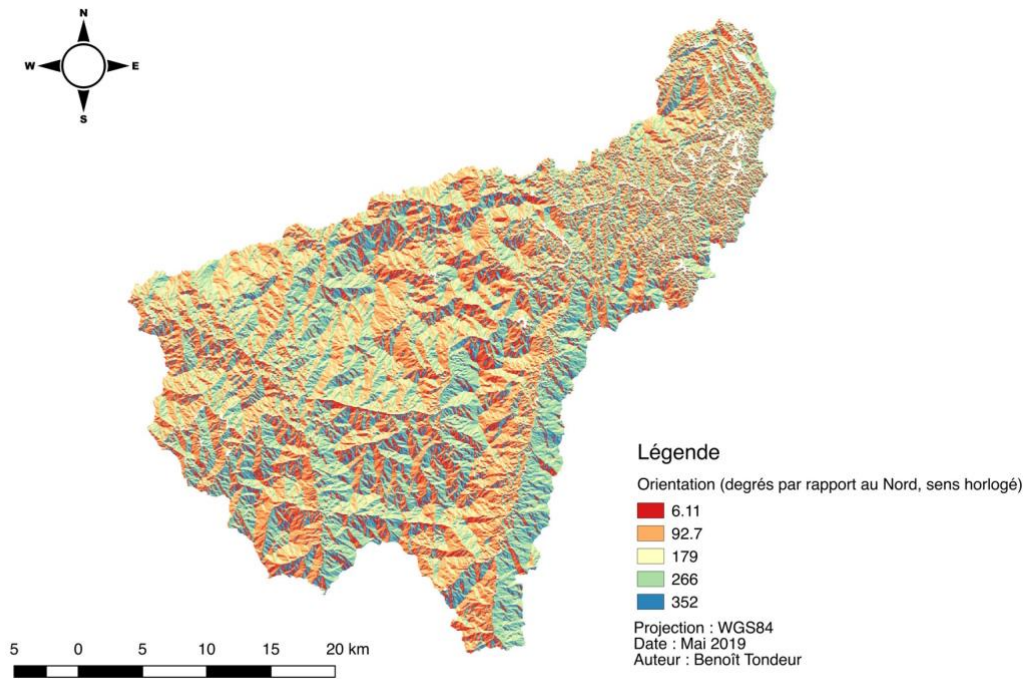


Figure 18 : Carte d'orientation des pixels dans le bassin d'Ankavia

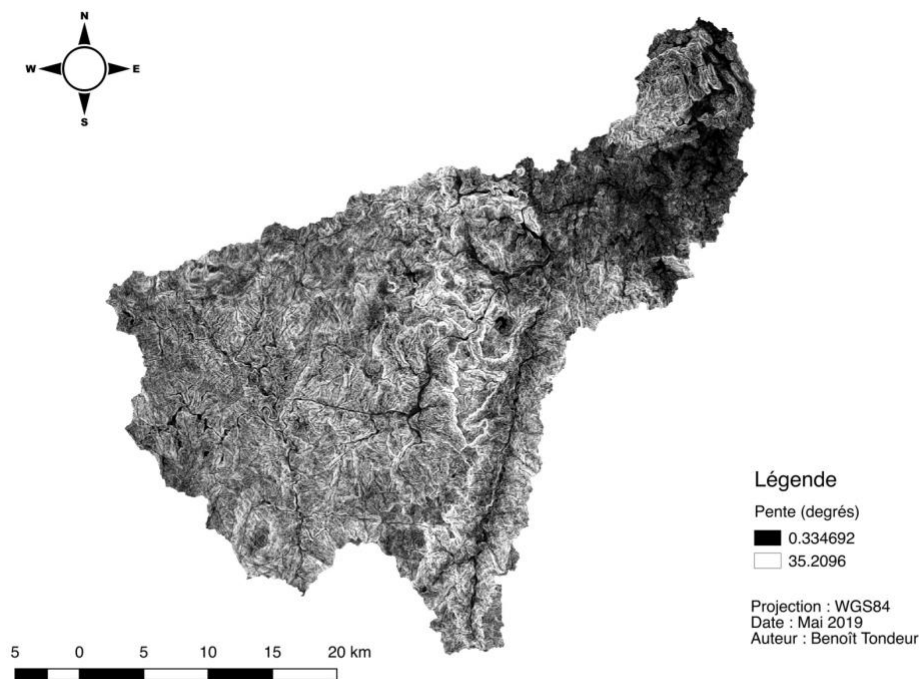


Figure 19 : Carte de pente des pixels dans le bassin d'Ankavia

## 8.8 Annexe 8 : Tableau des données des parcelles

Tableau 13 : Données disponibles sur les parcelles visitées

| Culture | Ménage | Aire [m2] | Pente [°] | Orientation [°] | Distance au cours d'eau [km] | SRTM [m] | Distance au village [km] |
|---------|--------|-----------|-----------|-----------------|------------------------------|----------|--------------------------|
| Riz     | 5      | 5415      | 24        | 3367            | 0,306                        | 92       | 0,401                    |
| Riz     | 4      | 1212      | 7         | 98              | 0,3951                       | 66       | 0,9                      |
| Riz     | 7      | 1466      | 3         |                 | 0,253                        |          | 0,392                    |
| Riz     | 11     | 7589      |           | 235             | 0,1                          | 56       | 0,784                    |
| Riz     | 17     | 3752      | 2         | 151             | 0,003                        | 64       | 2,54                     |
| Riz     | 18     | 5399      | 17        | 95              | 0,295                        | 91       | 2,490                    |
| Riz     | 19     | 1252      | 20        | 106             | 0,228                        | 97       | 2,563                    |
| Riz     | 22     | 1711      | 24        | 93              | 0,165                        | 90       | 2,609                    |
| Riz     | 21     | 1857      | 25        | 147             | 0,587                        | 239      | 3,204                    |
| Vanille | 8      | 23323     | 13        |                 | 0,699                        | 102      | 0,604                    |
| Vanille | 8      | 2538      | 12        | 184             | 0,790                        | 107      | 0,702                    |
| Vanille | 9      | 2347      | 10        | 47              | 0,729                        | 105      | 0,645                    |
| Vanille | 1      | 20691     | 6         | 198             | 0,014                        | 60       | 1,474                    |
| Vanille | 3      | 3388      | 5         | 192             | 0,267                        | 67       | 1,12                     |
| Vanille | 4      | 4238      | 10        | 247             | 0,073                        | 58       | 1,344                    |
| Vanille | 4      | 2149      | 4         | 241             | 0,362                        | 62       | 0,922                    |
| Vanille | 6      | 2652      | 0         | 112             | 0                            | 54       | 1,197                    |
| Vanille | 6      | 2007      | 5         |                 | 0,263                        | 56       | 1,175                    |
| Vanille | 7      | 830       |           | 345             | 0,205                        | 5455     | 0,312                    |
| Vanille | 10     | 4080      | 1         | 306             | 0,039                        | 54       | 0,878                    |
| Vanille | 11     | 4628      | 6         | 127             | 0,04                         | 50       | 0,729                    |
| Vanille | 12     | 1370      | 2         | 236             | 0,223                        | 50       | 0,749                    |
| Vanille | 13     | 2783      | 4         | 145             | 0,269                        | 59       | 0,808                    |
| Vanille | 13     | 1709      | 5         | 49              | 0,037                        | 58       | 1,959                    |
| Vanille | 14     | 3322      | 0         |                 | 0,031                        | 61       | 2,117                    |
| Vanille | 15     | 3392      | 2         | 18              | 0,11                         | 55       | 1,734                    |
| Vanille | 16     | 8717      | 3         | 177             | 0,061                        |          | 1,604                    |
| Vanille | 20     | 904       |           |                 | 0,249                        | 139      | 0,273                    |
| Vanille | 21     | 5193      | 14        | 138             | 0,234                        |          | 3,007                    |

## 9 Références

### 9.1 Bibliographie

- Abrami G., et ULP - FRA; CIRAD-TERA - FRA; CIRAD-FORET - FRA. « Modélisation multi-agents pour l'aménagement forestier : usages multiples dans l'écosystème forestier de Didy (Madagascar) ». Mémoire, Université Louis Pasteur, 1999.
- An L. « Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models ». *Ecological Modelling*, Modeling Human Decisions, 229 (24 mars 2012): 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.07.010>.
- An L., et López-Carr D.. « Understanding human decisions in coupled natural and human systems ». *Ecological Modelling* 229 (2012): 1-4.
- Augusiak J., Van den Brink P. J., et Grimm V. « Merging validation and evaluation of ecological models to 'evaluation': A review of terminology and a practical approach ». *Ecological Modelling*, Population Models for Ecological Risk Assessment of Chemicals, 280 (24 mai 2014): 117-28. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.11.009>.
- Bersini H. « UML for ABM ». *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 15, n° 1 (2011): 9.
- Bousquet F., et Le Page C. « Multi-Agent Simulations and Ecosystem Management: A Review ». *Ecological Modelling* 176 (2004): 313-32.
- Bousquet F., et UCLB - FRA; CIRAD-TERA-ERE - FRA. « Modélisation d'accompagnement. Simulations multi-agents et gestion des ressources naturelles et renouvelables ». HDR, Université Claude Bernard Lyon 1, 2001. Agritrop 2-juin-2019 (Agritrop : 533497). <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00085861>.
- Castella J-C., Trung NH, et Boissau S. « Participatory simulation of land-use changes in the northern mountains of Vietnam: the combined use of an agent-based model, a role-playing game, and a geographic information system ». *Ecology and Society* 10, n° 1 (2005): 1–32.
- Cotton S., Andrianaina A., et Hending D. « Landscape and biodiversity assessment of vanilla plantations and surrounding areas in the SAVA region of Madagascar Final Report », s. d.
- Deadman P. Household Decision Making and Patterns of Land Use Change in LUCITA: An Agent Based Simulation of the Altamira Region, Brazil, *MODSIM*. Vol. 5. 2005.
- Dubus, M. « Bassin versant d'Ankavia à Madagascar - Étude hydrologique et caractérisation des débits de la rivière Antsahovy ». Mémoire, Université Catholique de Louvain, 2018.
- Gaudieux A. « Expérimentation d'une méthode à base de Systèmes Multi-Agents appliquée à la gouvernance des ressources naturelles à Madagascar et à La Réunion. » Thèse de doctorat, Université de la Réunion, 2017.
- Gaudieux A, Cazal J.D., Grondin D., Sébastien V., et Courdier R. « SIEGMAS : Un simulateur multi-agents pour l'étude des territoires de l'Océan Indien ». In *RIODD 2016*. Saint-Étienne, France, 2016. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01349988>.
- Gaudieux A., Gangat Y., Kwan J., et Courdier R. « Study of the interactions between stakeholders by a multi-agents system: Application to the governance of natural resources in Miarinarivo district (Madagascar) », *MAS' 14*, 2014.

- Getchell A. « Agent-based modeling ». *Physics* 22, n° 6 (2008): 757–767.
- Gimblett H. R. *Integrating Geographic Information Systems and Agent-Based Modeling Techniques for Simulating Social and Ecological Processes*. Oxford University Press, 2002.
- Grimm V., Augusiak J., Focks A., Frank B., Gabsi F., Johnston A., Liu C, et al. « Towards better modelling and decision support: Documenting model development, testing, and analysis using TRACE ». *Ecological Modelling* 280 (2014): 129-39.
- Grimm V., Berger U., Bastiansen F., Eliassen S., Ginot V., Giske J., Goss-Custard J., et al. « A standard protocol for describing individual-based and agent-based models ». *Ecological Modelling* 198, n° 1 (15 septembre 2006): 115-26.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.04.023>.
- Grimm V., Berger U., DeAngelis D.L., Polhill J.G., Giske J., et Railsback S.F. « The ODD protocol: A review and first update ». *Ecological Modelling* 221, n° 23 (2010): 2760-68.
- Groeneveld J., Müller B., Buchmann C.M., Dressler G., Guo C., Hase N., Hoffmann F., et al. « Theoretical foundations of human decision-making in agent-based land use models e A review ». *Environmental Modelling & Software* 87 (janvier 2017): 39-48.
- Hare M., et Deadman P. « Further towards a taxonomy of agent-based simulation models in environmental management ». *Mathematics and Computers in Simulation* 64, n° 1 (janvier 2004): 25-40.
- Heppenstall A. J, Crook A.T., See L. M., et Batty M. *Agent-based models of geographical systems*. Springer Science & Business Media, 2011.
- Le Page C, et P Bommel. « A methodology for building agent-based simulations of common-pool resources management: from a conceptual model designed with UML to its implementation in CORMAS ». *Companion Modeling and Multi-Agent Systems for Integrated Natural Resource Management in Asia*, 2005, 327.
- Le Page C., Bazile D., Becu N., Bommel P., Bousquet F., Etienne M., Mathevet R., Souchere V., Trébuil G., et Weber J. « Agent-based modelling and simulation applied to environmental management ». In *Simulating social complexity*, 499–540. Springer, 2013.
- Legg C. « CamFlores: A FLORES-type model for the humid forest margin in Cameroon ». *Small-scale Forest Economics, Management and Policy* 2, n° 2 (mai 2003): 211–223.  
<https://doi.org/10.1007/s11842-003-0016-4>.
- Manson S et Evans T. « Agent-based modeling of deforestation in southern Yucatan, Mexico, and reforestation in the Midwest United States ». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104, n° 52 (2007): 20678–20683.
- Matthews R., Gilbert N., Roach A., Polhill J., et Gotts N. « Agent-based land-use models: a review of applications ». *Landscape Ecology* 22, n° 10 (1 décembre 2007): 1447-59.  
<https://doi.org/10.1007/s10980-007-9135-1>.
- Mena C., Walsh S., Frizzelle B., Xiaozheng Y., et Malanson G. « Land use change on household farms in the Ecuadorian Amazon: Design and implementation of an agent-based model ». *Applied Geography* 31, n° 1 (2011): 210-22.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.04.005>.

- Ministère de l'environnement, de l'écologie, de la mer et des forêts. « Rapport sur l'avenir de l'environnement de Madagascar 2017 (RAEM 2017) », novembre 2015.
- Müller B., Angermueller F., Drees R., Dressler G., Groeneveld J., Klassert C., Schlüter M., Schulze J., Weise H., et Schwarz N. « Describing Human Decisions in Agent-Based Social-Ecological Models - ODD+D an Extension of the ODD Protocol ». SSRN Scholarly Paper. Rochester, NY: Social Science Research Network, 23 avril 2012. <https://papers.ssrn.com/abstract=2044736>.
- Ohab-Yazdi, Ali S., et Ahmadi A. « Using the agent-based model to simulate and evaluate the T interaction effects of agent behaviors on groundwater resources, a case study of a sub-basin in the Zayandehroud River basin ». *Simulation Modelling Practice and Theory* 87 (2018): 274-92.
- Parker D., Manson S., Janssen M., Hoffmann M., et Deadman P. « Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review ». *Annals of the Association of American Geographers* 93, n° 2 (2003): 314-37.
- Parker T., Berger S., Manson W., Mcconnell, d'Aquino P., August P., Balmann A., et al. « Agent-Based Models of Land-Use and Land-Cover Change », 2001.
- Reulier R. « Structure paysagère et dynamiques spatiales des transferts hydro-sédimentaires. Approche par simulation multi-agents. » Doctorat, Université de Caen Normandie, 2015.
- Robinson D., Brown D., Parker D., Schreinemachers P., Janssen M., Huigen M., Wittmer H., et al. « Comparison of empirical methods for building agent-based models in land use science ». *Journal of Land Use Science* 2, n° 1 (mars 2007): 31-55.
- Schmolke A., Thorbek P., DeAngelis D, et Grimm V. « Ecological models supporting environmental decision making: a strategy for the future ». *Trends in Ecology and Evolution* 25 (2010): 479–486.
- Turner B. L., Geoghegan J., Lawrence D., Radel C., Schmook B., Vance C., Manson S., et al. « Land system science and the social–environmental system: the case of Southern Yucatán Peninsular Region (SYPR) project ». *Current Opinion in Environmental Sustainability* 19 (2016): 18-29. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.08.014>.
- Wandersee S., An L., López-Carr D., et Yang Y. « Perception and decisions in modeling coupled human and natural systems: A case study from Fanjingshan National Nature Reserve, China ». *Ecological Modelling* 229 (2012): 37-49.

## 9.2 Netographie

- Craig Reynolds. « Individual-Based Models ». Consulté le 26 septembre 2018. <http://www.red3d.com/cwr/ibm.html>.
- « Multi-Agent Systems ». Consulté le 3 janvier 2019. <http://cormas.cirad.fr/en/demarch/sma.htm>.
- « NetLogo 6.0.4 User Manual ». Consulté le 3 janvier 2019. <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/docs/>.
- « What is UML | Unified Modeling Language ». Consulté le 5 janvier 2019. <http://uml.org/what-is-uml.htm>.

## **Approche exploratoire pour la modélisation basée agent du changement d'occupation du sol dans le bassin versant d'Antsahovy, Madagascar**

**Benoît Tondeur**

### **Résumé :**

Le présent mémoire a pour objectif la mise en place d'un modèle basé-agent reproduisant la dynamique de changement d'occupation du sol dans le bassin versant d'Antsahovy à Madagascar. Il s'inscrit dans le projet GIRE-SAVA, lancé en 2017 par l'UCLouvain et le CURSA. Ce projet vise à renforcer les capacités de gestion intégrée des ressources en eau dans la région SAVA, et plus particulièrement dans le bassin versant d'Ankavia. Cette région est en effet sujette à divers risques hydriques (crues, inondations, cyclones, érosion, etc.) dont les impacts se font ressentir aux niveaux sociétal, environnemental et économique. Afin de remplir l'objectif global du mémoire, 3 objectifs spécifiques ont été définis. Premièrement, la mise en place d'une base de données comprenant des données de terrain, grâce à un séjour sur place, ainsi que des données génériques. Deuxièmement, l'analyse de ces données en vue de comprendre la dynamique sous-jacente au changement d'occupation du sol. Troisièmement, la mise en place du modèle basé-agent sur base des données et informations récoltées et analysées au préalable.

Malgré des données limitées, il a été possible de réaliser une analyse et d'implémenter un modèle via le programme NetLogo, prenant en compte les aspects physiques de l'environnement. Ce modèle représente un sous bassin versant du bassin d'Antsahovy et donne des estimations de l'évolution de l'occupation du sol, dans le temps et dans l'espace.

Il ressort de ce mémoire qu'il a été possible de créer un modèle basé-agent représentant la dynamique de changement d'occupation du sol, dont les résultats semblent correspondre aux observations. Un travail de récolte de données et d'analyse supplémentaire peut donc permettre d'améliorer davantage le modèle produit.