



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE DES SCIENCES AGRONOMIQUES

ECOLE DOCTORALE A2E « AGRICULTURE – ELEVAGE – ENVIRONNEMENT »

Équipe d'accueil : Zootechnie et santé animale

**«Elaboration d'une méthode de suivi et de gestion
des ressources pastorales par une approche
combinée de modélisation et de télédétection »**

Présenté publiquement le 12 Avril 2018

Par

RAZAFINARIVO Tsirinirina Donnah

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences Agronomiques

Président de jury : M. RAKOTOZANDRINDRAINY Raphael, Professeur Titulaire ESSA

Directeur de thèse : M. RAKOTOZANDRINY Jean de Neupomuscène, Professeur Titulaire ESSA

Rapporteur interne : M. RANDRIANARIVELOSEHENO Arsène Jules, Professeur d'Enseignement Supérieur ESSA

Rapporteur externe : M. RAZANAKA Samuel, Professeur Directeur de Recherche CNRE

Examineur : M. RANDRIAMALALA, RAMAROLANONANA Josoa, Professeur d'Enseignement Supérieur ESSA

Examineur : Mme Rahetlah Volatsara Baholy, Professeur d'Enseignement Supérieur ESSA

Invité : M. SALGADO Paulo, Docteur CIRAD



*Fa Andriamanitra no miasa ao anatinareo na ny fikasana
na ny fanaovana hahatanteraka ny sitrapony*

Filipiana 2:13

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu pour son amour et sa grâce infinis, pour avoir été là tout au long de ma vie, plus particulièrement dans l'accomplissement de cette thèse.

Ensuite, cette thèse n'aurait pas pu être réalisée sans les contributions de nombreuses personnes. Les mots ne seront jamais suffisants pour exprimer ma reconnaissance et mes remerciements à toutes ces personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire, particulièrement à :

Vololonirina Ramalanjaona : Grâce à vous, qui avez bien coordonné le projet BIOVA qui est le promoteur de cette thèse. J'ai effectué ma thèse dans de bonnes conditions avec le projet. En passant, je tiens à remercier toute l'équipe du Projet BIOVA que ce soit à Madagascar ou à l'étranger.

Mon directeur de thèse, Rakotozandriny Jean de Neupomuscène, pour toute son aide. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa compagnie, car outre son appui scientifique, il a toujours été là pour me soutenir et me conseiller au cours de l'élaboration de cette thèse.

RAKOTOZANDRINDRAINY Raphael qui, malgré ses multiples responsabilités, a bien voulu accepter de nous faire le grand honneur de présider le jury de cette soutenance de thèse. Je réitère également mes remerciements à tous les membres du Jury : RANDRIANARIVELOSEHENO Arsène Jules, RAZANAKA Samuel, RANDRIAMALALA, RAMAROLANONANA Josoa, Rahetlah Volatsara Baholy et à SALGADO Paulo, qui ont aimablement accepté d'apporter leurs compétences dans le jury de cette thèse malgré leurs multiples obligations. Ces dernières années, je vous ai connus par le biais de vos publications. Vos travaux ont inspiré mes recherches. Aujourd'hui, c'est un honneur pour moi de vous voir évaluer cette thèse.

Paulo Salgado, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail, pour ses multiples conseils et pour toutes les heures qu'il a consacrées à cette thèse. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande disponibilité et que ses pressions m'ont beaucoup aidé à avancer dans mes travaux de la thèse

Rahetlah Volatsara Baholy pour la confiance qu'elle m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail. Je lui suis reconnaissant de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail, de sa rigueur intellectuelle, de son dynamisme, et de son efficacité certaine que je n'oublierai jamais.

Pascal Degenne, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de m'encadrer durant mon séjour au niveau de l'UMR TETIS du CIRAD à La Réunion. Je tiens à le remercier particulièrement pour son accueil chaleureux et ses compétences à modéliser et à réaliser les choses que j'ai cru impossibles au début de mon séjour. Il a su mettre en musique les paroles de ma composition scientifique

Valentine Lebourgeois, pour ses conseils avisés et l'intérêt qu'elle a porté à cette étude principalement sur la modélisation par Random Forest

Lionel le Mezo et Hélène Artus, pour les programmations d'acquisition des images satellitaires durant la thèse. Merci aussi d'avoir c  d   à mes caprices durant les traitements d'images. Merci également pour les formations et les conseils que vous m'aviez offerts. Sans vous, mes conditions de travail auraient sans doute été très différentes et beaucoup moins agréables.

Merci à tous les membres de mon comité de thèse, Emmanuel Tillard, Lionel Le Mezo, Paulo Salgado, Pascal Degenne, Jean de Neupomuscène Razotozandriny, Volatsara Baholy Rahetlah, Olga Rachel Rakotomanana, pour avoir recadr   mes hypothèses de recherches et avoir éclairci le sens scientifique de mes travaux de thèse.

Toute l'équipe de la cellule de soutien à la formation et à la recherche de l'Université d'Antananarivo, particulièrement à Dina Rabe pour la relecture des résumés en anglais des différentes parties de cette thèse

Je remercie toutes les personnes formidables que j'ai rencontrées durant mes descentes sur le terrain. Merci pour vos appuis et vos encouragements. Je pense particulièrement à Liva Radanielson, inséminateur du FIFAMANOR pour m'avoir guidé durant tous mes descentes    Tsiroanomandidy. Sans lui je n'aurais pas su les quatre points cardinaux de Tsiroanomandidy et ces alentours.

Equipes SPAD : J'ai vraiment de la chance d'être parmi les équipes SPAD. J'ai appris différentes expériences professionnelles et sociales avec tous les Spadiens.   tant doctorant du SAPD, j'étais sollicité de divers appuis techniques, merci aussi pour toutes les formations.

Ces remerciements seraient incomplets si je n'en adressais pas à l'ensemble de toute l'équipe du FOFIFA (Direction, DRZVP, Kianjasoa) pour leur soutien logistique et moral ainsi que pour la très bonne ambiance que j'ai toujours trouvée en ces lieux. Je remercie plus particulièrement RAKOTOMANANA Olga Rachel pour nos nombreuses discussions et la confiance qu'elle a manifestée à l'égard de mon travail

Enfin, je remercie tous mes proches et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse

Une pensée pour terminer ces remerciements, je passe une dédicace spéciale à ma famille :    mon père qui n'a pas pu voir l'aboutissement de mon travail, mais je sais qu'il aurait été très fier de son fils.    ma mère, mon frère, ma s  ur et particulièrement à ma femme et ma fille Eucharina, pour leur confiance, leur tendresse, leur amour qui me portent et me guident tous les jours. Merci d'avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui

SOMMAIRE

Fintina - Résumé – Abstract

Introduction générale	1
Objectifs et hypothèses	6

Chapitre 1

Présentation générale de la méthodologie	9
1.1 - Acquisition des données sur le terrain.....	10
1.2 - Modélisation et programmation informatique.....	12
1.3 - Classification radiométrique.....	14
1.4 – Elaboration de cartographie.....	17
1.5 - Gestion de pâturage.....	18

Chapitre 2

Gestion de pâturages par utilisation combinée d'un modèle de prédiction du rendement fourrager et de la télédétection : cas de la station de recherche de Kianjasoa, Madagascar	20
Fintina – Résumé – Abstract	21
Introduction	24
Matériels et méthodes	24
Résultats et discussion.....	27
Conclusion	33

Chapitre 3

Développement d'un logiciel (3C-BIOVIS) pour la détermination de la disponibilité des ressources fourragères par une approche de modélisation et télédétection.	37
Résumé – Abstract	38
Introduction	40

Matériels et méthodes	42
Résultats et discussion.....	48
Conclusion	51

Chapitre 4

L'utilisation de la télédétection pour la classification des zones de pâturage de Tsiroanomandidy (Madagascar) via l'algorithme « Random Forest ».....

Résumé – Abstract	58
Introduction	60
Matériels et méthodes	61
Résultats et discussion.....	66
Conclusion	70

Chapitre 5

Développement d'un outil cartographique pour la gestion des ressources pastorales par une approche combinée de télédétection et de modélisation.....

Résumé – Abstract	76
Introduction	79
Matériels et méthodes	80
Résultats et discussion.....	85
Conclusion	91

Chapitre 6

Discussion et conclusion générale.....	96
Conclusion.....	108

Annexe 1 : Processus de télédétection

Annexe 2 : Caractéristiques des fourrages étudiés

Annexe 3 : Etape de calcul 3C-BIOVIS

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures

Présentation générale de la méthodologie

Figure 1 : Pourcentage de bovin dans les 22 régions de Madagascar.....	4
Figure 2 : Processus de télédétection.....	6
Figure 3 : Sélection aléatoire dans la zone fonctionnelle de la parcelle.....	10

Article 1

Figure 1 : Rendement moyen en matière vert de <i>Brachiaria brizantha</i> en fonction de la période et des sites	28
Figure 2 : Relation entre rendements en biomasse du <i>Brachiaria brizantha</i> et NDVI.....	30
Figure 3 : Cartographie des zones de pâturage de la station Kianjasoa/FOFIFA.....	32

Article 2

Figure 1 : Interface du logiciel 3C-BIOVIS.....	43
Figure 1 : Répartition spatiale des zones pastorales à Madagascar.....	44
Figure 3 : Représentations graphiques des régressions entre les données agronomiques et les valeurs de NDVI pour <i>Eleusine indica</i>	45
Figure 2 : Nuage de points des valeurs réelles du rendement des différentes espèces par rapport aux valeurs prédites par le logiciel.	50

Article 3

Figure 1 : Les indices utilisés dans “ <i>Random Forest</i> ”.....	64
Figure 2 : Carte de la biodisponibilité des ressources fourragères.....	69

Article 4

Figure 1: Site de pâturage naturel (Moyen Ouest de Madagascar, mois d'avril).....	81
Figure 2 : Relation entre rendement en MS et NDVI pour <i>Pennisetum purpureum</i>).....	83
Figure 3 : Profil de disponibilité temporel de la biomasse fourragère.....	86

Figure 4 : Interface de l'outil de cartographie.....	89
Figure 5 : Modèle de cartographie de la biodisponibilité des ressources fourragères.....	91

Discussion et conclusion générale

Figure 4 : Carte de biodisponibilité du <i>Brachiaria brizantha</i> dans la station de Kianjasoa (Madagascar).....	100
Figure 5 : Courbe de biodisponibilité temporelle d'un pâturage naturel.....	102
Figure 6: Données de sortie du logiciel 3C-BIOVIS.....	103
Figure 7 : Carte de la disponibilité des ressources fourragères.....	105

LISTE DES TABLEAUX

Présentation générale de la méthodologie

Tableau 1 : Caractéristiques des bandes spectrales et résolutions de SPOT5..... 12

Tableau 2 : Constituants de la matrice de confusion 16

Article 1

Tableau 1 : Table attributaire de la carte de disponibilité du fourrage..... 33

Article 2

Tableau 2: Modèles et variables du Logiciel 3C-BIOVIS..... 48

Article 3

Tableau 3: Matrice de confusion..... 66

Tableau 2: Capacité de charge animale (UBT) suivant les surfaces occupées..... 70

Discussion et conclusion générale

Tableau 2 : Modèles prédictifs du rendement en matière verte des différentes espèces
fourragères..... 97

Tableau 3 : Coefficients de détermination..... 98

LISTE DES ABREVIATIONS

µm : Micromètre

3C-BIOVIS : Calculateur de la Capacité de Charge, et de la BIOMasse Végétale par Imagerie Satellitaire

ANOVA: ANalysis Of VAriance

BIOVA: Recyclage des BIOMasses Végétales et Animales dans les systèmes d'agriculture élevage

CART : Classification And Regression Tree

Cc : Capacité de Charge

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

cm: Centimètre

FAO: Food and Agriculture Organization

FIFAMANOR: FIompiana FAmbolena MAlagasy NORveziana

FOFIFA: FOibem-pirenena momba ny Fikarohana ampiharina amin'ny Fampandrosoana ny eny Ambanivohitra ou Centre national de la recherche appliquée au développement rural

g : Gramme

GPS: Global Positioning System

H = Nombre total d'hectares

ha : Hectare

IB : Indice de Brillance

INSTAT : Institut National de la STATistique.

IR : InfraRouge

kg : Kilogramme

LASER : Logiciel pour le Suivi des Ruminants.

m: Mètre

MinELP : Ministère de l'Agriculture de l'Elevage et de la Pêche

MIR: Moyen InfraRouge

MNDWI: Modified Normalized Difference Water Index

MS : Matière Sèche

MV : Matière Verte

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index.

NDWI: Normalized Difference Water Index

ONG: Organisation Non Gouvernementale

OOB: Out Of Bag

OTB: Orfeo Tool Box

PA: Producer Accuracy

PADR : Plan d'Action pour le Développement Rural

PIB : Produits Intérieurs Bruts

PIR : Proche InfraRouge

Pp = Production potentielle de fourrage durant une période déterminée et à l'abri des herbivores

PV : Poids Vif

Qc = Quantité de fourrage consommable

R : Rouge

SIG : Système d'Information Géographique

SPIR : Spectrométrie dans le Proche Infrarouge

SPOT : Satellites Pour l'Observation de la Terre

Tu = Taux d'utilisation

UA : User Accuracy

UBT : Unité Bovine Tropicale

UGB : Unité Gros Bétail

V : Vert

Fintina-Résumé - Abstract

FINTINA

Mitombo eo amin'ny dimy isan-jato isan-taona eo ny fihinanana proteinina azo avy amin'ny fiompiana aty amin'ny tany andalam-pandrosoana. Mifanaraka amin'izany indrindra ny eto Madagasika satria dia miisa eo amin'ny 1500 isan'andro eo ny omby vonoina mahafeno ny filàn'ny Malagasy. Izany tarehimarika izany dia vokatry ny fihitaran'ny tanan-dehibe, ny fitombon'ny ponina, ary ny fiakaran'ny harin-karena isam-batan'olona. Mitondra fiovana goavana eo amin'ny tontolon'ny fiompiana omby anefa izany toe-javatra izany, satria dia tsy mitsaha-mitombo ny filàna kanefa dia mihasarotra ny fahitana vilona. Mihena ihany koa ny vokatra omby isaky ny hekitara, nohon'ireo toe-java misy maro toy ny tsy fifehezana ny isan'ny omby tokony hifanaraka amin'ny habehan'ny kijana. Manoloana izany ary dia tokony hisy rafitra hajoro hafahana manara-maso sy mitantana ny voka-bilona, amin'ny alalan'ny tsinjolavitra avy amin'ny zanabolana sy ny maodely ara-matematika. Izany no natao moa dia mba hafahana mahazo tombony betsaka kokoa amin'ny fiompiana omby. Noho izany dia nisy ireo modely faminavinana ny voka-bilona, izay novolavolaina avy amin'ny fampitahana ny tombana « NDVI » taratra omen'ny zanabolana sy ny famokarana vilona voarefy ety an-tany. Izany dia azo avy amin'ireo vilona folo izay tena ampiasana indrindra amin'ny fiompiana omby eto Madagasikara. Izany fampitahana izany dia nanome R^2 manelanelana ny : 0,59 ho an'ny kijana misy ny vilona mifangaro *Hyparrhenia rufa* sy *Heteropogon contortus*, sy 0,89 ho an'ny kijana misy ny *Eleusine indica*. Tao anatin'izany dia nisy ihany koa ny fampitahana ny ny tombana « NDVI » omen'ny zanabolana sy ny famokarana singa mainan'ireo karazam-bilona ireo. Ratsy kokoa anefa ny R^2 ho an'ireto farany satria dia manelanelana ny 0,43 ny an'ny *Stylosanthes guianensis* ary 0,79 ny an'ny *Eleusine indica*. Ny fahafantarana ny singa maina entin'ireo karazam-bilona ireo dia ahafahana mikajy ny isan'ny omby tokony ho zakan'ny kijana tsirairay isaky ny faminavinana. Rehefa natambatra izany faminavinana isaky ny kijana izany dia nahafahana naminavina ny isan'ny omby tokony ho zakan'ny faritra iray voafetra. Natao izany faminavinàna izany tao amin'ny toeram-pikarohana Kianjasoa/FOFIFA ka nahafahana namaritra fa tokony eo amin'ny 4,52 UBT isaky ny hekitara eo ny isan'ny omby zakan'izany faritra izany. Nampiasana tamina sary tahiry azo avy amin'ny zanabolana ihany koa ireo karazana modely ireo ka nahafahana namerina nanoritra ny biloky ny voka-bilona salatsalany mandavan-taona. Ny famakafakana izany biloka izany dia nahafahana maminavina

ny tokonanan-drefy ambony sy ambany momban'ny fitrandrahana ny kijana. Nampidirana anaty fandaharana ara-informatika ireo karazana modely ireo ka nahafahana namolavola rindrambaiko fikajiana ahafahana mitily avy amin'ny zanabolana ny isan'ny omby tokony ho zakan'ny kijana iray. Misy ihany koa ny tranonkala novokarina avy amin'ireo modely ireo, izay ahafahana manoritra ny sarintanin'ireo kijana misy. Izany sarintany izany dia mirakotra ireo singa rehetra ilaina amin'ny fitantanana ny kijana toy ny habetsahan'ny vilona misy eo an-toerana sy ny isan'ny omby afaka fahanana amin'izany. Tao anatin'ity fikarohana ity, dia nisy ihany koa ny fisokajiana ireo karazam-bilona, arakaraky ny taratra vokariny hita avy eny amin'ny zana-bolana. Izany fisokajiana izany dia azo avy amin'ny fampiasana ny « *Radom Forest* » ka nahazoana fanamarinam-pisokajiana 77,6 isan-jato. Izany dia nafahana nahazo ny sarintany mamaritra ny kialo araky ny karazam-bilona misy tao anatin'ny faritra mirefy 600 kilometatra tora-droa manodidina ny Tsiroanomandidy. Rahefa ampiarahana amin'ilay fitaovanam-panoritana sarintany ity farany dia ahafahana mampitombo ny vokatra amin'ny fitantanana ny kijana sy ny omby. Afaka maminavina ny voka-bilona mandritry ny herinandro vitsivitsy aorian'ny fahazoana ny sary avy amin'ny zanabolana ihany koa ireo modely misy ao amin'ity fitaovana ity. Noho izany dia afaka fehezina ny fifindranfidran'ny omby araky ny famokaran'ireo karazana kijana misy eo an-toerana. Afaka fehezina araka izany ihany koa ny isan'ny omby tokony hiditra isaky ny kijana. Izany rehetra izany moa dia manampy amin'ireo fanapahan-kevitra lehibe ho fampandrosoana ny tontonlo ambanivohitra. Noho izany dia mitondra vokatra miabo ho an'ny fiompiana sy ho an'ny tsy fanjariana ara-tsakafo misy eto Madagasikara ity rafitra ajoro ity.

Teny manan-danja

Biby mandinika, Isa zakan'ny kijana iray, NDVI, Pastoralisma, Rafitra ara-jeografia, Rindrin'ny tany.

RESUME

Dans les pays en développement, l'accroissement de la consommation en protéines animales est estimé à 5% par année. Madagascar n'échappe pas à cette tendance par sa consommation de viande bovine qui s'élève aujourd'hui à 1500 têtes de bovin par jour. Ces chiffres sont liés principalement à la croissance démographique (3,5%), à l'urbanisation, et à l'élévation du revenu par individu. Par conséquent, cette situation engendre des changements déterminants

pour l'élevage de bovins du fait de la forte demande en viande alors que la disponibilité en ressources fourragères ainsi que leur accessibilité deviennent de plus en plus difficiles. Les surfaces pâturables deviennent plus rares et la production par unité de surface diminue du fait de certains facteurs comme la mauvaise gestion des charges animales. Face à cette situation, l'élaboration d'une méthode de suivi et de gestion des ressources fourragères par une approche combinée de modélisation et de télédétection s'avère être une méthode adéquate pour une optimisation de la production. Pour ce faire, des modèles prédictifs du rendement fourrager ont été élaborés à partir de corrélations/régressions entre les valeurs des indices de végétation « NDVI » obtenue à partir d'imagerie satellitaire et la quantité de biomasses mesurée sur le terrain. Ces modèles ont été développés sur les dix espèces de fourrages les plus utilisés à Madagascar. Les coefficients de régression R² de ces modèles sont compris entre 0,59 pour le pâturage naturel d'*Hyparrhenia rufa* et d'*Heteropogon contortus* et 0,89 pour l'*Eleusine indica*. Des corrélations/régressions entre les valeurs de « NDVI » et le rendement en matière sèche de ces espèces fourragères ont également été effectuées. Pour ces derniers, les coefficients de détermination sont moins performants allant de 0,43 pour le *Stylosanthes guianensis* à 0,79 pour l'*Eleusine indica*. Cette prédiction du rendement en matière sèche a permis de calculer la capacité de charge au niveau des parcelles. Elle permet également de calculer la capacité de charge animale à plus grande échelle comme celle qui a été effectuée au niveau de la station de Kianjasa (FOFIFA) qui est estimée à 4,52 UBT/ha. Les modèles prédictifs de rendement sont ensuite appliqués sur des images satellites archives pour reproduire le profil de biodisponibilité temporelle moyenne de ces différentes espèces fourragères. L'analyse de ce profil a permis de définir des seuils sur l'état d'exploitation des différentes parcelles de pâturage. Ces modèles sont ensuite implémentés à l'aide d'un langage de programmation informatique pour développer un outil de prédiction de la quantité de biomasses disponible et de la capacité de charge animale des parcelles. Une interface cartographique et de pilotage du modèle à partir d'une page Web a également été réalisée. Il est désormais possible de dessiner une parcelle sur fond d'image satellite, puis de faire calculer les différents indicateurs de productivité pour cette parcelle. Une classification des espèces fourragères par l'utilisation de l'algorithme « Radom Forest » a donné une précision globale de 77,6%. Cette pratique a permis d'élaborer une cartographie de la biodisponibilité spatiale des différentes espèces fourragères sur une surface totale d'environ 600 km² dans la région de Tsiroanomandidy. Une application de l'outil cartographique et de pilotage des modèles sur les résultats du « Radom Forest » va permettre une gestion efficace de l'utilisation des ressources. Les modèles peuvent aussi être utilisés comme outil prospectif permettant d'estimer la production fourragère sur plusieurs semaines

après la date d'acquisition de l'image satellite. Par conséquent, cela permet le contrôle des déplacements des animaux en relation avec la disponibilité des ressources fourragères. Cela permet également la gestion de la charge animale sur les différentes parcelles de pâturage. Ces informations obtenues seront utiles pour une prise de décision optimale des agents du développement rural. Cette étude aura ainsi un impact positif sur productivité de l'élevage en vue d'une meilleure sécurité alimentaire de la population.

Mots clés

Capacité de charge animale, NDVI, Occupation du sol, Pastoralisme, Ruminant, Système d'Information Géographique.

ABSTRACT

In developing countries, the consumption of animal protein increases by 5% per year. Madagascar follows this tendency with cattle meat intake which nowadays is estimated at 1500 animals a day. This figure resulted from the growth of population, urban planning, and the rise of income per capita. Therefore, such situation causes decisive changes to the farming process because of high demand in meat while the availability and access to forage resources tend to be more and more difficult. Pasture areas become scarce and the production per surface unit decreases due to mismanagement of animal loads. In view of this situation, setting up a method of monitoring and management of forage resource using a combined approach of modelling and remote sensing technique seem to be the most appropriate strategy to optimize production. To do so, some predictive templates of forage yields were drafted owing to correlations/regressions between values of vegetation indices « NDVI » obtained from satellite imagings and the amounts of biomass measured on the field. These templates were established from the ten most common species of forage in Madagascar. The regression coefficients R^2 of these templates range from 0.59 for nature pasture of *Hyparrhenia rufa* and *Heteropogon contortus* and 0.89 for *Eleusine indica*. Some correlations/regressions between the « NDVI » indices and the yields of dried matters out of these forages were calculated as well. As for the last, the coefficients of determination are less effective ranging from 0.43 for *Stylosanthes guianensis* to 0.79 for *Eleusine indica*. The yield prediction of dried matters has enabled calculation of the load capacity of land parcels. It has also allowed evaluation at a large scale of the animal load capacity as that was the case at the station of Kianjaso/FOFIFA which was

estimated at 4.52TLU/ha. These predictive yield templates are then applied on archived satellite images to set up profile of the average time availability of these various species. The analysis of these profiles has revealed the exploitation threshold of these land parcels. These templates are then entered and turned into a computer software to design a predictive tool for estimating the amount of available biomass and the animal load capacity of land parcels. A map and template guide from a Web page were also completed. From now on, it is feasible to draw a parcel upon a satellite image and then to calculate its related indices. The grading of forage species with the « Random Forest » algorithm has given an overall accuracy of 77.6%. This practice resulted in the draft of a space bioavailability map of these various forage species upon a whole surface of 600 km² in the region of Tsiroanomandidy. The implementation of the map and template guide basing upon results of the Random Forest has led to an effective management of resources. These templates could also serve as a prospection tool to determine forage production for several weeks from the date of reception of the satellite imaging. Consequently, it could be possible to monitor the movement of the herds in accordance with the availability of forage resources. The animal load on various pasture parcels can henceforth be managed properly. When collected, these information are useful to optimize decision-making of rural development actors. Thus, the study had a positive impact on farm productivity aiming to attain a better food safety for the population.

Keywords

Geographic Information System, Land use, NDVI, Pastoralism, Ruminant, Stocking capacity.

Introduction générale

1 - Contexte de l'étude

Dans les pays en développement, la consommation de viande s'est accrue de plus de 5% annuellement au cours de ces vingt dernières années (FAO, 2014). Cette consommation de viande est prévue croître de 1,4% par an jusqu'en 2030 à travers le monde d'après les projections de la FAO (2014). En termes énergétiques, cette consommation de viande dans les pays en développement a augmenté de plus de trois fois que celle observée dans les pays développés (Delgado *et al.*, 1999). La consommation de produits animaux est étroitement liée au niveau de vie de la population et aux Produits Intérieurs Bruts (PIB). Comme ce dernier s'est accru rapidement pendant les 20 dernières années, les niveaux de consommation de viande et autres produits animaux se sont élevés simultanément (Steinfeld *et al.*, 2006). L'augmentation des revenus va encourager une consommation plus élevée de produits d'origine animale, particulièrement dans les pays en développement (FAO, 2011). À Madagascar, les besoins en viande sont principalement couverts par l'abatage de ruminants (Rakotondravao, 2009) qui sont alimentés à partir de ressources herbagères spontanées.

Les pâturages naturels malgaches sont principalement caractérisés par leur vaste étendue. La situation pédoclimatique de la grande île offre des conditions naturelles très favorables à l'élevage de bovin. Cet élevage est notamment localisé dans les parties Sud et Ouest de Madagascar avec 60% de l'effectif du cheptel national (Minten *et al.*, 2010). Dans ces zones, la flore du pâturage naturel des plateaux est dominée par des graminées appartenant aux genres *Hyparrhenia*, *Heteropogon*, *Aristida* et *Imperata* (Granier, 1970). Malgré le cheptel très important de chaque élevage, ses potentialités sont largement sous-exploitées. Dans ces pâturages, les gains annuels en poids vif du zébu varient de 40 à 70 kg (Granier, 1968). Durant les années 70, une grande majorité de ces zones ont bénéficié de projets d'amélioration de pâturage par l'introduction de nouvelles espèces comme *Brachiaria* et *Stylosanthes* (Rasambainarivo *et al.*, 1987). Ces pâturages améliorés sont concentrés dans le Moyen-Ouest et sur les hauts plateaux, qui sont les principales zones de localisation des élevages laitiers (Robert, 1979). La productivité de ces pâturages est totalement liée à l'alternance très marquée entre la saison sèche et la saison pluvieuse. Il est à constater que Madagascar est sujet d'un phénomène d'appauvrissement floristique des pâturages par la disparition progressive des espèces les plus appetantes. Ce phénomène est couplé des effets de l'érosion et de l'extension des cultures tant sur les bas-fonds que sur les plateaux. Par conséquent, les éleveurs malgaches font face à des problèmes de restriction des surfaces pastorales et de dégradation de la qualité des pâturages. Additionnés à la mauvaise gestion des pâturages restants, ces problèmes ont un

impact considérable sur la disponibilité des ressources fourragères qui est un facteur déterminant de la viabilité de la production des ruminants. Cela engendre des changements importants sur le développement de l'élevage des ruminants, mais également sur la sécurité alimentaire de la population. Par ailleurs, la consommation carnée à Madagascar reste encore faible, car elle est en moyenne de 5,4 kg/personne/an (Rakotondravao, 2009), dont 75% sont représentés par la viande bovine (Biarmann, 2014). Sur le plan national cette consommation s'élève jusqu'à 1 500 bovins/jour, dont environ 400 têtes pour la population de la capitale Antananarivo (MinELPA, 2013). Toutefois, nous observons une flambée des prix de la viande bovine sur les marchés de la capitale depuis ces dernières années.

Il y a lieu de mentionner que les deux tiers de cet approvisionnement en viande bovine de la capitale proviennent de la région de Bongolava par le marché de zébu de Tsiroanomandidy (Figure 1). Dans cette région, les éleveurs font pâturer leur bétail dans des systèmes spatialement extensifs, caractérisés par des déplacements saisonniers entre les surfaces pâturables, et d'autres mouvements orbitaux, intra-saisonniers, autour des points d'eau. Les déplacements du bétail deviennent responsables des variations fourragères dans le temps et dans l'espace. De plus, la production fourragère est limitée par la pluviométrie très variable. Les sécheresses périodiques sont inhérentes au système, et conduisent à des disettes fourragères, pour le bétail et à l'insécurité alimentaire pour les éleveurs. Dans ce contexte, la connaissance de la biomasse disponible, et sa distribution, peut aider les éleveurs à diriger les déplacements du bétail, ainsi qu'à préciser les périodes de verdure ou d'achat d'animaux. Elle permet également d'évaluer le niveau de risque pour les prises de décision. Cependant, la nature spatialement extensive, et variable des ressources fourragères, associée aux contraintes des mouvements du bétail, nécessite une approche différente de celle des évaluations empiriques.

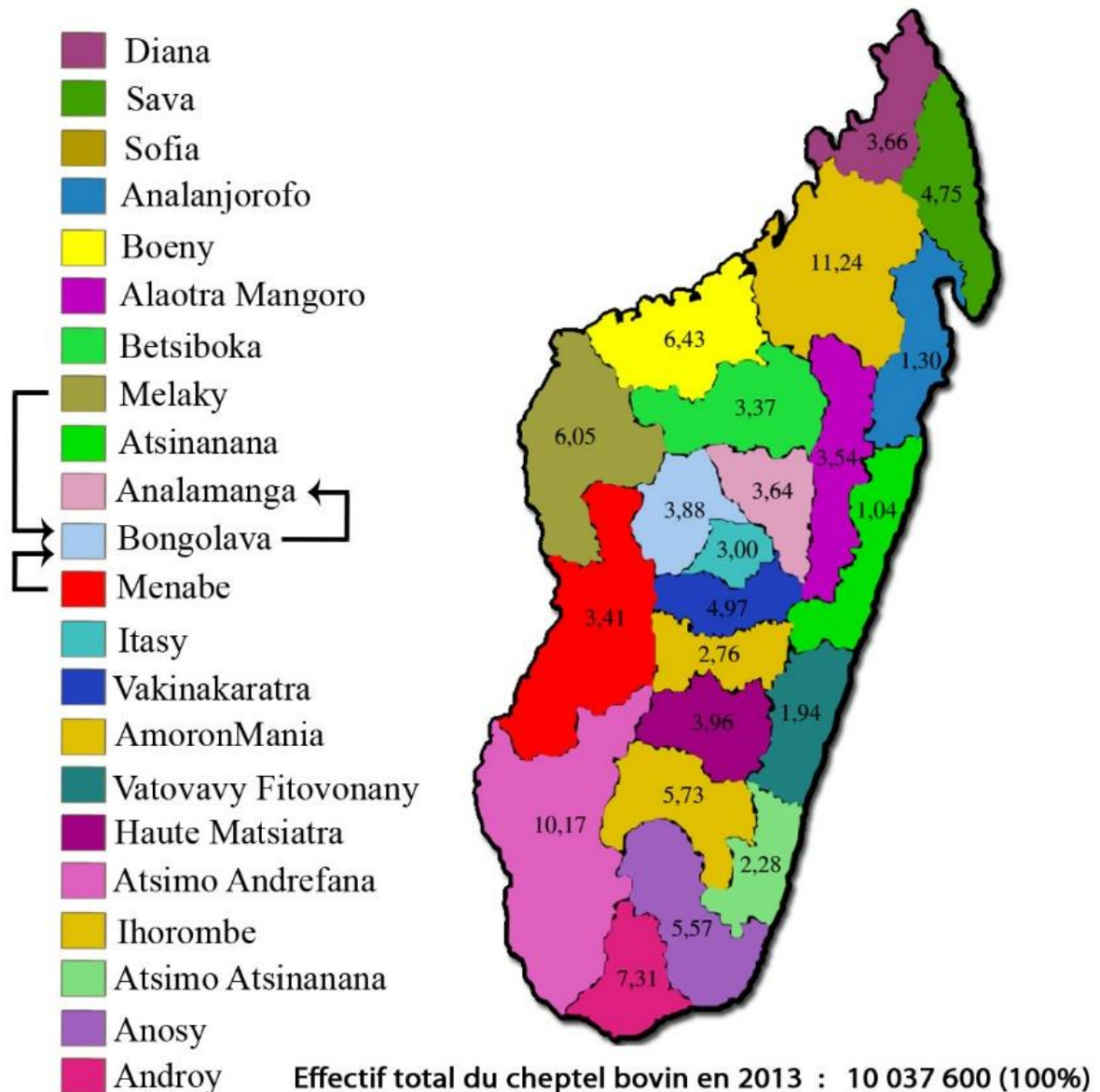


Figure 1 : Pourcentage de bovins dans les 22 régions de Madagascar (INSTAT 2014)

L'utilisation des méthodes de suivi et d'observation spatiale à partir de données de télédétection se révèle être la seule approche exploitable dans ce genre de situations. La télédétection est une discipline scientifique regroupant l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes. Comme son nom l'indique, elle suppose l'acquisition d'informations à distance, sans contact direct avec l'objet détecté (Bonn et Rochon, 1992). La télédétection utilise les propriétés d'émission ou de rayonnement des ondes électromagnétiques

par les objets. Le rayonnement électromagnétique correspond à l'ensemble des radiations émises par une source (soleil, surface terrestre, océan, atmosphère, capteur satellitaire, etc.) sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules (Université Paris1 panthéon-Sorbonne, 2008). Les ondes électromagnétiques sont en fonction de leur longueur d'onde (Figure 2). Le spectre électromagnétique s'étend des ondes radio dont la longueur d'onde peut atteindre plusieurs centaines de kilomètres, jusqu'aux rayons gamma qui ont une longueur d'onde inférieure au millième de milliardième de mètre. Entre ces deux extrêmes se trouvent les micro-ondes, l'infrarouge, le spectre visible, l'ultraviolet et les rayons X. Dans le domaine visible, chaque couleur correspond à une longueur d'onde bien précise. L'étude des couverts végétaux se fait dans les domaines du visible (0,4 – 0,7 μm), du proche infrarouge (0,7 – 1,3 μm) et du moyen infrarouge (1,58 – 1,75 μm). Dans ces domaines, le soleil constitue la source de rayonnement électromagnétique. Les récepteurs de télédétection (capteurs satellites) enregistrent le flux d'énergie solaire réfléchi par les objets de la surface terrestre (luminance). Les luminances d'une image à une autre varient selon l'éclairement reçu par la surface de l'objet (Annexe 1). Il faut les convertir en une grandeur indépendante de l'éclairement incident, la réflectance. Celle-ci est le rapport entre l'énergie réfléchi par une surface et l'énergie incidente reçue par cette même surface pour une longueur d'onde donnée. C'est une grandeur sans unité comprise entre 0 et 1 ou souvent exprimée en pourcentage (Université Paris1 panthéon-Sorbonne, 2008). Depuis quelques années, la télédétection est largement utilisée à Madagascar comme dans presque tous les pays du monde. Plusieurs domaines d'application ont recours à ce type de données pour mener à bien leurs travaux : environnement, aménagement du territoire, santé, gestion des risques et catastrophes naturelles, etc. En 1988 une étude sur les zones de pâturage naturel du moyen-ouest malgache à partir de données de télédétection a déjà été initiée par Perakis Konstantinos et Tamrv Bezounesh. Cette étude s'inscrivait sur l'estimation des extensions des différents postes de la nomenclature en terme d'occupation du sol à partir d'images satellitaires SPOT (Satellites Pour l'Observation de la Terre) . Actuellement, les données de télédétection contiennent des images multispectrales qui peuvent être acquises à différentes résolutions spatiales et temporelles, et c'est à partir de ces données que nous pouvons extraire différents indices dont l'Indice de Végétation Normalisé (NDVI, Rouse *et al.*, 1973). Le NDVI est fortement corrélé avec la densité du couvert végétal et la capacité des plantes à absorber la lumière solaire pour la convertir en biomasse. Ainsi, cet indice est très utilisé dans le suivi des couvertures végétales occupant la surface terrestre.

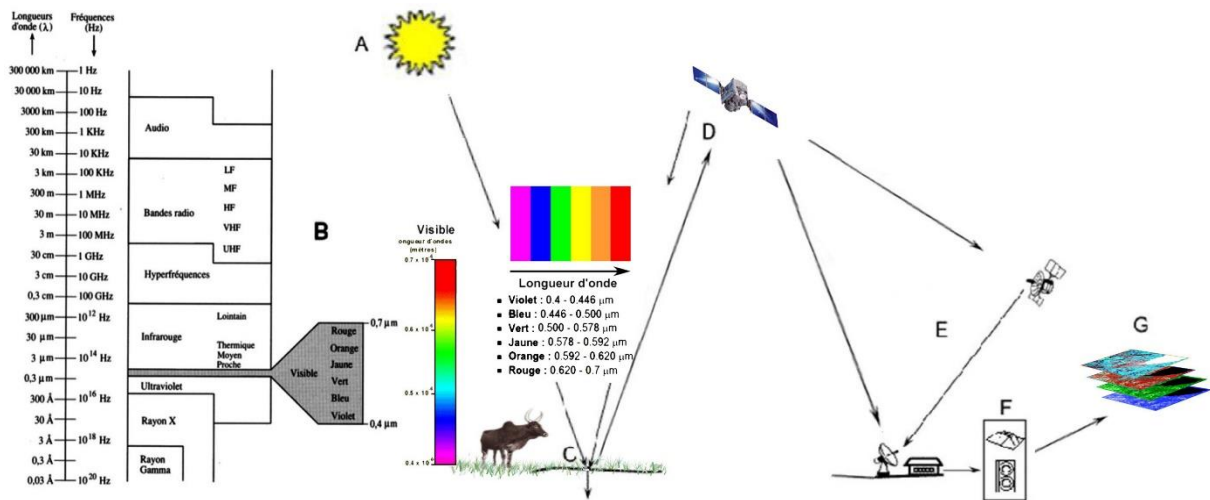


Figure 2 : Processus de télédétection (Notions fondamentales de télédétection, 2002, modifié par l'auteur)

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet régional BIOVA (Recyclage des BIOMasses Végétales et Animales dans les systèmes d'agriculture élevage), qui vise à sécuriser la production alimentaire dans les systèmes agricoles familiaux par l'acquisition de connaissances et par la promotion de techniques agro-écologiques innovantes pour une gestion optimisée des biomasses issues de l'agriculture et de l'élevage. Le projet met également en place un certain nombre d'outils innovants pour le pilotage des systèmes agricoles comme la télédétection, la spectrométrie dans le proche infrarouge (SPIR) et le système LASER pour le suivi des performances zootechniques des ruminants. La calibration et l'utilisation de ces outils de pilotage contribueront au développement de l'élevage à Madagascar pour le rendre plus productif et plus compétitif.

Objectifs et hypothèses

L'objectif général de la thèse est de développer une méthode de suivi et de gestion des ressources fourragères par une approche combinée de modélisation et de télédétection afin de contribuer au développement durable des systèmes d'élevage et à l'amélioration de la sécurité alimentaire des exploitants agricoles.

Les objectifs spécifiques sont de :

- I. calibrer et valider des modèles de prédiction de la production de biomasse fourragère à partir des NDVI, extrait d'imageries satellitaires SPOT ;
- II. développer un outil d'estimation de la capacité de charge animale et de l'état de valorisation fourragère des parcelles à partir des données de télédétection ;

- III. classifier les différentes espèces fourragères suivant leur comportement spectral ;
- IV. développer un outil de cartographie pour la prédiction spatio-temporelle de la disponibilité des ressources fourragères.

Ces objectifs seront traités dans les quatre chapitres de cette thèse qui est présentée sous format « Thèse par articles », composée de quatre articles complémentaires qui vont répondre chacun à une hypothèse de travail.

Le premier chapitre est une présentation générale de la méthodologie de collecte et d'analyse de données.

Hypothèse 1 : « Les indices de végétation « NDVI », peuvent être utilisés pour le suivi en temps réel de la variation de la quantité de la biomasse fourragère ».

Nous cherchons à confirmer cette hypothèse dans le chapitre 2 « Gestion de pâturages par utilisation combinée d'un modèle de prédiction du rendement fourrager et de la télédétection : cas de la station de recherche de Kianjasa, Madagascar ». Cet article s'articule sur le fait qu'il y a une forte corrélation entre la densité de la couverture fourragère et les NDVI. Ainsi, des données de mesures de la biomasse fourragères sur le terrain ont été couplées/corrélées à des valeurs de NDVI, obtenues à partir des images SPOT 5 pour obtenir des modèles de prédiction de la quantité de biomasses.

Hypothèse 2 : « Les indices de végétation peuvent être utilisés pour la détermination de capacité de charge animale et de l'état de valorisation fourragère des parcelles de pâturage ».

Nous cherchons à confirmer, ou à infirmer, cette hypothèse dans le chapitre 3 : « Développement d'un logiciel (3C-BIOVIS) pour la détermination de la disponibilité des ressources fourragères par une approche de modélisation et télédétection ». Dans cet article, les modèles prédictifs du rendement seront couplés aux modèles de prédiction de la quantité de matière sèche (MS) disponible. Une programmation sous langage informatique de ces modèles a été effectuée pour élaborer un outil de calcul de la capacité de charge animale et de l'état d'exploitation des parcelles de pâturage par l'utilisation d'imageries satellitaires.

Hypothèse 3 : « La combinaison de plusieurs indices à partir de la télédétection permet de différencier les espèces fourragères entre elles ».

Nous cherchons à confirmer cette hypothèse dans le chapitre 4 : « L'utilisation de la télédétection pour la classification des zones de pâturage de Tsiroanomandidy (Madagascar) via l'algorithme Random Forest ». Les Néo-canaux de SPOT 5 ont été utilisés pour adapter des méthodes de traitement au contexte de la zone d'étude. La combinaison des valeurs radiométriques des différentes bandes a permis d'aboutir à un résultat de classification le plus proche de la réalité. À partir des données de vérité terrains sur l'occupation du sol et des modèles de classification, il sera désormais possible d'élaborer une cartographie de l'occupation du sol par les différentes espèces fourragères.

Hypothèse 4 : « La combinaison de la télédétection, modélisation, et programmation informatique, permet d'avoir un outil de suivi et de gestion des ressources fourragères à grande échelle ».

Nous cherchons à confirmer cette hypothèse dans le chapitre 5 : « Développement d'un outil cartographique pour la gestion des ressources pastorales par une approche combinée de télédétection et de modélisation ». Les modèles prédictifs du rendement en Matière Verte (MV) et en Matière Sèche (MS) sont implémentés à l'aide d'un langage de programmation informatique pour faciliter l'usage de ces connaissances. Une interface cartographique et de pilotage du modèle à partir d'une page Web a été ainsi réalisée.

Enfin, le dernier chapitre du document de thèse est une discussion générale des nombreux résultats obtenus, mettant l'accent sur la contribution scientifique de cette thèse ainsi que sa contribution potentielle au développement des systèmes d'élevage à Madagascar.

Chapitre 1

*Présentation générale de la méthodologie de
collecte et d'analyse de données*

1.1 - Acquisition des données sur le terrain.

Pour la calibration des modèles prédictifs du rendement, les collectes de données agronomiques sur le terrain ont été effectuées tous les ans, durant les saisons des pluies, depuis 2013 jusqu'à la désorbitation du satellite SPOT 5 en avril 2015. Pour ce faire, 24 parcelles situées au sein des zones d'études (régions du Bongolava et du Vakinakaratra) ont été sélectionnées suivant les critères de sélection suivants : (i) la facilité d'accès, étant donné le nombre important de sites de calibration, et la courte fréquence de répétition des mesures sur le terrain (tous les 15 jours). Il s'est avéré important de définir des sites très accessibles pour pouvoir avoir le maximum de données agronomiques de terrain ; (ii) une taille des parcelles suffisamment grande, supérieure ou égale à 25 pixels (50m x 50m), afin d'éviter les effets de bordure, mais aussi de prendre en compte des marges d'erreur de la géolocalisation. Pour chaque parcelle expérimentale, trois à dix placettes de mesure (1,0 x 1,0 m) représentatives ont été choisies selon la taille et l'hétérogénéité de l'ensemble de la parcelle (Guérif *et al.*, 2008). Les placettes sélectionnées aléatoirement ont été situées dans la zone fonctionnelle de la parcelle, à au moins 10 m de chaque bordure (Figure 3) afin de garantir une localisation au sein des pixels exploitables de l'image satellite. Il est à noter que la taille d'un pixel, c'est-à-dire la résolution spatiale d'une image satellite SPOT 5 est de 10,0 x 10,0 m. Les localisations géographiques des mesures ont été obtenues avec la prise des coordonnées GPS.

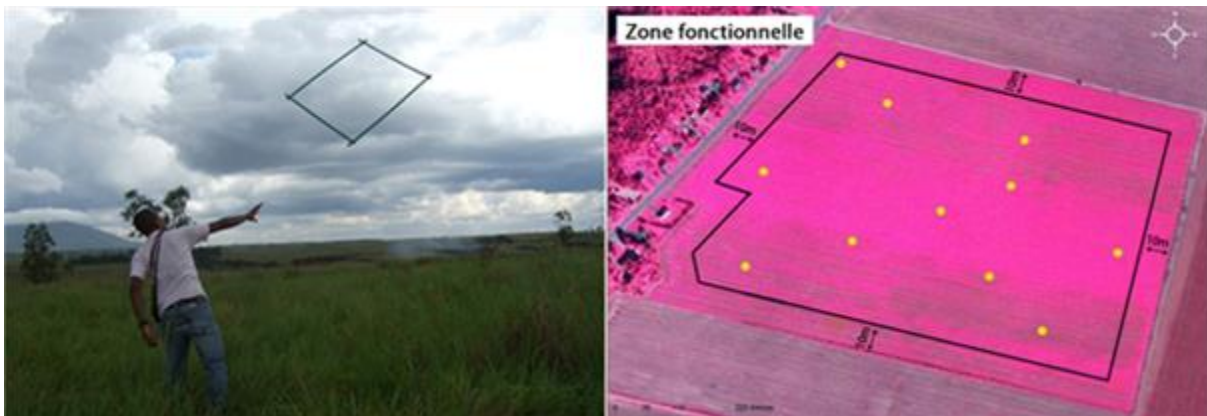


Figure 3 : Sélection aléatoire dans la zone fonctionnelle de la parcelle

Dans les placettes de mesure, les paramètres agronomiques mesurés sont : la hauteur de l'herbe, la composition botanique, le stade phénologique et la production de matière verte. Sur chaque placette, cinq mesures de la hauteur de l'herbe ont été effectuées à partir de la surface du sol à l'aide d'une règle graduée. La moyenne de ces cinq mesures a été utilisée pour la calibration du modèle prédictif de la hauteur. Des herbiers ont été effectués pour chaque espèce

pour la détermination de la composition botanique. À chaque prélèvement, les stades phénologiques des espèces constituantes sont évalués par observation visuelle. Le rendement fourrager en vert est mesuré à partir de la coupe de l'herbe à hauteur de 10 cm du sol. Cette pratique a été effectuée pour uniformiser et faciliter les prélèvements qui ont été effectués à l'aide d'une faucille manuelle. Les 10 cm restants sur le sol seront considérés en tant que parties inexploitées par l'animal dans le calcul de l'estimation du taux d'utilisation fourragère (Boudet, 1975). Un échantillon de l'herbe coupée (250 à 300 g) a été prélevé dans chaque placette et ramené au laboratoire en vue de l'analyse de la teneur en matière sèche. Le poids sec total des plantes a été déterminé selon les techniques standardisées de séchage à l'étuve à 60°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant (Dulphy et al. 1975).

Pour la calibration des modèles de classification, des prélèvements de données GPS sur chaque site de contrôle ont été effectués. Ces prélèvements consistaient à détourner chaque parcelle de pâturage naturelle et à prélever les coordonnées géographiques pour la production des polygones d'apprentissage pour la classification. Pour chaque espèce fourragère, au moins 20 sites de contrôles répartis à travers la région ont été sélectionnés pour la faisabilité et la stabilité de la classification. Ces parcelles doivent avoir une taille suffisamment grande, supérieure ou égale à 25 pixels. Ces sites doivent avoir également une prédominance d'au moins 80% d'une espèce fourragère par rapport à l'ensemble de la population. Cette prédominance a été calculée à partir de pesages des différentes espèces constituantes d'un prélèvement aléatoire effectué à l'aide d'une placette de 1 m². Au total, 107 parcelles de pâturages naturels ont été jugées exploitables pour être utilisées en tant que vérité terrain pour la classification.

Parallèlement à ces prélèvements sur le terrain, une programmation d'acquisitions d'images satellites multispectrales SPOT 5 (Tableau 1), tous les 10 jours, a été effectuée. SPOT est un programme de télédétection mis en place en 1978 par la France, en collaboration avec la Belgique et la Suède. La constellation des satellites SPOT 5 fournit des images optiques de haute résolution (10 m/pixel) et à large champ (60 km x 60 km). Elle offre une capacité d'acquisition qui permet d'obtenir une image de n'importe quel point du globe, sur une couverture complète de la terre en 26 jours. Ces images sont issues de la station de réception et de traitement d'images satellites SEAS-OI, implantée sur le site de l'Institut Universitaire de Technologie de Saint-Pierre à la Réunion. La programmation et les prétraitements des images satellites ont été effectués par un expert recruté par le projet BIOVA.

Tableau 1 : Caractéristiques des bandes spectrales et résolutions de SPOT5

Capteur	Spectre électromagnétique	Taille des pixels	Bandes spectrales
SPOT 5	Panchromatique	2,5 m ou 5,0 m	0,48 – 0,71 μm
	B1 : Vert (V)	10 m	0,50 – 0,59 μm
	B2 : Rouge (R)	10 m	0,61 – 0,68 μm
	B3 : Proche infrarouge (PIR)	10 m	0,78 – 0,89 μm
	B4 : Moyen infrarouge (MIR)	20 m	1,58 – 1,75 μm

1.2 - Modélisation et programmation informatique

Des corrélations/régressions entre les valeurs des NDVI extraits des images satellites et les mesures de la quantité des biomasses fourragères géo-référencées sur le terrain ont été effectuées. La corrélation/régression est une étude de la liaison entre deux variables quantitatives. C'est une technique statistique permettant de modéliser la relation entre une variable explicative « NDVI » et une variable à expliquer. Dans notre cas les variables à expliquer sont : la production de MV et la teneur en MS des plantes fourragères. Ainsi, le but de cette pratique est de calibrer des modèles de perte du rendement en MV d'une espèce fourragère et de la teneur en MS de cette dernière en fonction des valeurs de NDVI. Avant tout travail de modélisation, une approche exploratoire est nécessaire pour valider les conditions d'application de la régression : Normalité, mesures indépendantes et corrélation significative entre les deux variables.

Le NDVI est un indice de végétation très fortement corrélé avec la densité du couvert végétal et la capacité des plantes à absorber la lumière solaire pour la convertir en biomasse (Meneses-Tovar, 2011). Il permet de générer une image affichant la couverture végétale (biomasse relative). Cet indice repose sur le contraste des caractéristiques de deux canaux d'un jeu de données "Raster" multispectral : l'absorption du pigment chlorophyllien dans le canal rouge (R) et la haute réflectivité des matières végétales dans le canal proche infrarouge (PIR). L'indice NDVI est utilisé dans le monde entier pour : surveiller la sécheresse, contrôler et prévoir la production agricole, aider à la prévention des incendies et cartographier la désertification. L'indice NDVI est privilégié pour l'observation globale de la végétation, car il permet de compenser les changements de conditions d'éclairage, de pente de surface, d'exposition et d'autres facteurs exogènes (Lillesand, 2004). La réflexion différentielle dans les

canaux rouge (R) et infrarouge (IR) permet de contrôler la densité et l'intensité de la croissance végétale à l'aide de la réflectivité spectrale du rayonnement solaire. Les feuilles vertes affichent fréquemment une meilleure réflexion dans la plage de longueur d'onde proche infrarouge (PIR) que dans les plages de longueur d'onde visibles. Lors du stress hydrique des feuilles ou lorsqu'elles sont malades ou mortes, elles deviennent plus jaunes et ont une moindre réflexion dans la plage proche infrarouge. Les nuages, l'eau et la neige affichent un bien meilleure réflexion dans la plage visible que dans la plage proche infrarouge, alors que la différence est presque nulle pour la roche et le sol nu. Le processus Indice NDVI crée un jeu de données monocanal qui représente principalement la couverture végétale. Le calcul de cet indice est basé sur la propriété de réflectance du couvert végétal dans le spectre visible « rouge » (R) et dans le « proche infrarouge » (PIR).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{R}}{\text{PIR} + \text{R}}$$

Cet indice génère des valeurs comprises entre -1.0 et 1.0 (Tucker, 1979), qui représentent principalement la couverture végétale, où les valeurs négatives sont essentiellement générées par les nuages, l'eau et la neige et les valeurs proches de zéro essentiellement générées par la roche et le sol nu. Les très faibles valeurs de l'indice NDVI (inférieures à 0,1) correspondent aux surfaces stériles de roche, de sable ou de neige. Les valeurs intermédiaires (0,2 à 0,5) représentent des zones d'arbustes et de prairies, alors que les valeurs élevées (0,6 à 0,8) indiquent des forêts tempérées ou tropicales humides.

Dans le même principe de la variation de la réflexion dans la plage proche infrarouge (PIR) lors des stress hydriques des feuilles, des modèles prédictifs de la teneur en MS ont également été élaborés. Des régressions entre NDVI et la teneur en MS des plantes, obtenue par des analyses au laboratoire, ont été effectuées. À partir de ces régressions, des modèles ont été établis de sorte qu'à partir d'une image satellite quelconque, il a été possible d'évaluer le rendement en biomasse et la teneur en MS d'une parcelle à un instant « t » défini. Les modèles ont été calibrés à partir des données des parcelles suivies, mais validés sur d'autres parcelles différentes de celles qui ont été utilisées pour les étapes de calibration.

Ces modèles ont été ensuite utilisés sur des images satellites archivées des années précédentes, pour extraire la production spatio-temporelle des différentes espèces fourragères.

Cette pratique a permis de retracer le profil temporel de disponibilité moyenne des différentes espèces fourragères durant les 365 jours de l'année. Ainsi, à un moment donné, il est possible de déterminer une approximation de la quantité moyenne de biomasse disponible ainsi que le pourcentage en MS de ces espèces fourragères. À chaque acquisition d'image satellite, de nouveaux rendements sont produits pour mettre à jour les paramètres du profil en tenant compte de l'écart mesuré suivant les modifications engendrées par les phénomènes intervenants dans la production de la biomasse. Ce procédé permet d'estimer l'état et le mode d'exploitation de la parcelle en rapport avec le profil de référence de chaque espèce. Il permet aussi de faire une projection des productions fourragères des différentes espèces sur plusieurs semaines après la date d'acquisition de l'image satellite. Cet exercice de modélisation a permis de formaliser les connaissances acquises sous forme d'équations (Annexe 3). Les équations sont ensuite implémentées à l'aide d'un langage de programmation informatique, ce qui permet de faciliter l'usage de ces connaissances. Une interface cartographique et de pilotage du modèle à partir d'une page Web a été ensuite développée. Il sera désormais possible de dessiner une parcelle sur un fond d'image satellite, puis de faire calculer les différents indicateurs pour cette parcelle (estimation de la production fourragère, de la capacité de charge, etc.). Techniquement, l'ensemble a été programmé en langage Javascript qui est un langage permettant de réaliser des applications intégrées à des pages Web. Les bibliothèques de fonction Bootstrap et Leaflet ont été utilisées pour les parties saisies des paramètres et pour la cartographie interactive. Cette architecture logicielle permet deux modes d'usage du modèle : (i) simulations en local, c'est-à-dire sous forme de logiciel, sans connexion à l'Internet, ni serveur Web et (ii) simulations en ligne, le logiciel est alors « résident » sur un serveur Web et accessible à travers une connexion Internet. Le but de cette programmation est d'avoir une représentation graphique spatio-temporelle des différentes zones de pâturage dans un espace déterminé. Une mise à jour de la carte est effectuée à chaque fois qu'une nouvelle valeur de NDVI est introduite.

1.3 – Classification radiométrique

Pour la classification, l'algorithme « *Random Forest* » a été utilisé. Cet algorithme a été créé par Leo Breiman en 1996, et a été importé dans le logiciel libre R par Liaw et Wiener (2002), via le paquet « *Random Forest* ». Il repose sur trois principes qui le rendent très performant (Butler S., 2015). Premièrement, l'arbre de décision CART (*Classification And Regression Tree*), qui est une méthode de classification qui fonctionne par choix arbitraire. Ils partent d'une racine principale où toutes les classes à déterminer sont de même valeur. À chaque nœud, une décision de seuillage est prise pour séparer au mieux les classes. Ces décisions

établisent des règles de classification. Étant donné que le comportement spectral des couverts végétaux dépend de plusieurs facteurs comme : le type de végétation, le stade de développement, la teneur en eau et de la structure du couvert. La combinaison des réflectances dans différentes bandes permet de calculer des indices qui varient en fonction du comportement spectral de chaque espèce. Les seuils de séparations entre classes seront mis en évidence par les images satellites combinées des indices résultants. Le deuxième principe de l'algorithme « *Random Forest* » est le « *Tree Bagging* » qui est une méthode consistant à assembler plusieurs classifieurs d'un même type en un unique classifieur. Le *Tree Bagging* réunit une multitude d'arbres de décisions CART qui déterminent chacune des prédictions de classification. À la suite de quoi, les prédictions de ces arbres sont agrégées et les prédictions majoritaires sont conservées. Enfin, le troisième principe de l'algorithme, le « *Bootstrap* » qui est le fait qu'à chaque arbre CART, une partie des échantillons est prise aléatoirement avec remise parmi les observations initiales. Ainsi, chaque arbre construit est alors relativement dé-corrélé, ce qui rend les arbres indépendants les uns des autres. Les 2/3 des échantillons sont utilisés pour ces entraînements de « bootstrappés », pour le reste, ils sont utilisés dans le OOB (*Out Of Bag*), pour évaluer la pertinence de classification, un aspect de « *Random Forest* » qui permet de préjuger les erreurs de classification, avant même d'avoir fait la validation externe en utilisant le jeu de données de validation de l'utilisateur. L'ensemble de ces critères font de « *Random Forest* » un algorithme très efficace, non seulement pour traiter des données complexes et hétérogènes, mais également de gros volumes de données. Le paquet « *Random Forest* » du logiciel R est librement disponible et est utilisé dans le traitement de très nombreuses applications réelles.

Dans le domaine de l'analyse d'image satellitaire, la matrice de confusion (Tableau 2) reste la méthode la plus fiable pour vérifier la qualité de la classification. Elle est basée sur la comparaison entre les zones d'entraînement qui sont choisies et classées par l'utilisateur et ces mêmes zones d'entraînement reclassées par la modélisation. Il est admis qu'à partir de 30 échantillons par classe, le résultat de la classification peut être considéré comme stable (Girard et Girard, 2010). Par ailleurs, la matrice de confusion se compose, en ligne, des occurrences réelles d'une classe et, en colonne, des occurrences estimées par la classification (Tableau 2). Les performances de la classification sont évaluées en estimant le pourcentage et le nombre de pixels correctement classés à l'intérieur de chaque polygone test.

Tableau 2 : Constituants de la matrice de confusion

	occurrences estimées			Producer Accuracy
occurrences réelles	A	B'	C'	Total des occurrences Estimées (TOE1)
	A'	B	C''	Total des occurrences Estimées (TOE2)
	A''	B''	C	Total des occurrences Estimées (TOE3)
User Accuracy	Total des occurrences réelles (TOR 1)	Total des occurrences réelles (TOR2)	Total des occurrences Réelles (TOR3)	Total des individus (TI)

L'*Overall accuracy* (OA) donne la précision globale de la classification (Girard et Girard 1999). Il est calculé à partir de la somme des individus bien classés divisés par le total des individus.

$$OA = (A + B + C) / \text{Total des individus}$$

L'indice Kappa (Cohen 1968) donne une évaluation globale et intra-classe de la classification (Congatlon 1991) en prenant en compte le déséquilibre entre les tailles de population dans les classes. Kappa est calculé à partir de l'OA et le rapport entre les totaux des classes estimées.

$$Kappa = (OA - PE) / (1 - PE)$$

PE est le rapport entre les totaux des classes estimées et réelles

$$PE = ((TOR\ 1 * TI) + (TOE1 * TI)) + ((TOR\ 2 * TI) + (TOE2 * TI)) + ((TOR\ 3 * TI) + (TOE3 * TI))$$

Dans ce genre d'étude, il est indispensable d'évaluer la précision de la classification dans chaque classe. Ainsi, certains indices ont également été calculés.

User Accuracy (UA) évalue le nombre d'individus bien classés au sein d'une classe par rapport aux classes de référence. Il correspond au rapport entre le nombre d'individus bien classés et le total des individus de la classe elle-même.

$$UA(A) = (A / TOR 1)$$

Producer Accuracy (PA) correspond à l'erreur d'omission ($PA = 1 - OE$), et évalue le nombre d'individus bien classés par rapport aux classes estimées.

$$PA(A) = (A / TOE1)$$

Enfin, « *f-score* » est l'indice le plus important de la classification, car il indique la précision spécifique d'une espèce déterminée tout en considérant les individus de la classe, mais aussi la population tout entière. Cet indice est obtenu à partir de la moyenne harmonique des *User* et *Producer Accuracy*.

$$f\text{-score} = (UA * PA) / (UA + PA)$$

1.4 – Élaboration de cartographie

Un inventaire des ressources fourragères dans une région pastorale, spatialement extensive, doit employer au maximum des données de télédétection (FAO 2014). La cartographie est une observation transversale de l'ensemble d'un système. Elle vise à donner une image instantanée de la population à un instant défini. L'élaboration d'une cartographie du couvert végétal est un outil essentiel au suivi et à la gestion d'un milieu déterminé. Une carte caractérisant les zones de pâturage à l'échelle régionale est ainsi exploitable pour la gestion de pâturage suivant les surfaces disponibles par unité de bétail. L'algorithme RF permet une optimisation de la cartographie des surfaces de la zone d'étude (Butler 2015). Pour ce faire, la série temporelle de cinq images satellitaires optiques ainsi que les différents indices résultants ont été ouverts et classés par date et par ordre d'indice dans le logiciel QGIS (Spot5_date1 ; NDVI_date1 ; NDWI_date1 ; MNDWI_date1 ; IB_date1 ; Spot5_date2 et ainsi de suite). Cette série d'images a été concaténée par l'outil OTB (Orfeo Tool Box) de QGIS afin d'obtenir une seule image à 48 bandes. L'outil OTB est un logiciel libre qui a été financé, développé et diffusé

par le CNES pour contribuer au rayonnement des missions (Pléiades, Sentinel, etc.). C'est une bibliothèque de traitement d'images pour la télédétection conçue pour traiter de gros volumes de données de manière transparente grâce au traitement par morceaux et à des parallélisations. Pour faciliter son utilisation, OTB a été introduit dans le logiciel libre QGIS. La réalisation de la cartographie de la biodisponibilité des ressources fourragères dans les différentes zones de pâturage classées par l'algorithme RF a été effectuée par l'outil OTB de QGIS. Ainsi, les données statistiques de second ordre de l'image concaténée ont été recalculées pour pouvoir créer le modèle de classification RF. Ce modèle a été obtenu par l'application des polygones d'apprentissage contenant les vérités terrains (au moins 20 parcelles ayant une superficie supérieure 2 500 m²/classe) sur l'image concaténée en utilisant le module « Train Images Classifier (rf) » d'OTB. 20% du jeu de données d'apprentissage a été utilisé pour la validation de cette classification. Enfin, pour avoir la cartographie de la disponibilité des ressources fourragères de cette zone, le modèle RF a été lancé sur l'ensemble de l'image masquée des parties non-fourrages par l'utilisation du module « Image Classification » d'OTB. Le masque est un Raster binaire contenant les zones à classer et excluant les zones masquer telles que les routes, les villages, les terrains bâtis, les forêts, etc. La cartographie obtenue a été ensuite validée après vérification par reconnaissance qualitative des classes d'occupation du sol sur le terrain

1.5 – Gestion de pâturage

Dans un système spatialement extensif, les éleveurs doivent gérer au mieux l'utilisation de la production fourragère, de façon à obtenir, sans dégradation du milieu, une production animale rentable et durable. Il s'est avéré indispensable de comprendre le cycle sol / plante / animal pour établir un certain nombre de règles simples permettant au « système » pâturage d'exprimer son plein potentiel de manière autonome et reproductible. Le principe de base de la gestion de pâturage en rotation repose sur : (i) une forte charge animale durant un séjour aussi court que possible sur chaque parcelle pour une exploitation maximum de l'herbe durant sa qualité optimale. (ii) un niveau de charge similaire lors des différents passages et (iii) un temps de repos des plantes fourragères sur plusieurs semaines entre les deux passages du troupeau (Kleinet *al.*, 2014). Dans ce contexte, la connaissance de la biomasse disponible, et sa distribution, peuvent aider les éleveurs à mieux diriger les déplacements du bétail. Ils doivent aussi avoir des informations sur la capacité de charge des différentes parcelles de pâturage à exploiter. L'utilisation des données de télédétection couplée des modèles de simulation a permis d'estimer la quantité de biomasses disponible à un temps défini, et la production potentielle

d'une espèce fourragère déterminée (Pp). Par ailleurs, la connaissance de la taille de la parcelle de pâturage (H) et du taux d'utilisation de cette dernière par l'animal (Tu) a permis de déterminer la quantité de fourrage consommable (Qc).

$$Qc = Pp \times Tu^* \times H$$

Cette quantité a été alors traduite en effectif animal pouvant être supporté par chaque parcelle (ou capacité de charge). La capacité de charge est définie comme le nombre maximum d'herbivores qui peuvent pâturer une surface donnée, sans détérioration de la végétation, pour une période déterminée (Hervé 1989). Cette notion de charge (Cc) peut également se traduire par la relation entre le nombre d'unités animales, en Unité Bovin Tropical (UBT) ou en Unité Gros Bétail (UGB), par unité de surface. (i) L'UBT étant un animal qui peut ingérer environ 6,25 kg de matières sèches (MS) par jour, qui est équivalent d'un herbivore de 250kg pouvant ingérer environ 2,5kg de MS par 100kg de poids vif. (ii) L'UGB peut être représenté comme une vache laitière de 600 kg pouvant ingérer 3 kg de MS/100 kg de PV soit 18kg de MS par jour.

$$Cc = \frac{\frac{Qc}{\text{MS ingéré par jour}} \times \frac{100}{\text{Période}}}{\text{Poids animal}}$$

En utilisant les informations sur la biomasse fourragère disponible et les caractéristiques animales au pâturage, il est possible de calculer un taux de charge pour un type d'animal donné. Ces paramètres ont été regroupés et programmés sous langage informatique pour élaborer une méthode de suivi et de gestion de ces ressources pastorales (Annexe 3). Cette méthode a été développée sous forme d'un outil cartographique de la biodisponibilité spatio-temporelle des ressources fourragères. Les métadonnées de cette cartographie contiennent toutes les informations prédites sur les différents indicateurs indispensables pour la gestion du pâturage (estimation de production fourragère, capacité de charge, etc.).

Chapitre 2

Gestion de pâturages par utilisation combinée d'un modèle de prédiction du rendement fourrager et de la télédétection : cas de la station de recherche de Kianjasoa, Madagascar.

Publication de l'article :

Publié dans Bulletin de l'Akademia Malagache

Razafinarivo T D., Rahetlah V B., Rakotozandriny J N., Salgado P, Rakotomanana O R., Artus H., Le Mezo L., 2017, Gestion de pâturages par utilisation combinée d'un modèle de prédiction du rendement fourrager et de la télédétection : cas de la station Kianjasoa, Bulletin de l'Akademia Malagache, XCVI/1, 2016. Page 115 - 122.

Publié en tant que communication orale durant le « *World Congress Silvo-Pastoral* »

Razafinarivo Tsirinirina Donnah, Hélène Artus, Lionel le Mezo, José Herilalao Andriarimalala, Serge Nabeneza, Emmanuel Tillard, Paulo Salgado. Quantitative and qualitative evaluation of pastures in Madagascar using a NDVI and NIRS combined approach. World Congress Silvo-Pastoral Systems, 27-30 September 2016, Évora, Portugal

Publié en tant que communication affichée durant les Journées Scientifiques des doctorants

Razafinarivo Tsirinirina Donnah, Rahetlah Volatsara Baholy, Rakotozandriny Jean de Neupomuscène, Rakotomanana Olga Rachel, Hélène Artus, Lionel le Mezo, Paulo Salgado. 2015, Gestion de pâturages par utilisation combinée d'un modèle de prédiction du rendement fourrager et de la télédétection : cas de la station Kianjasoa. Poster : Journées Scientifiques des doctorants, Poster.

Gestion de pâturages par utilisation combinée d'un modèle de prédiction du rendement fourrager et de la télédétection : cas de la station de recherche de Kianjasoa, Madagascar

Razafinarivo Tsirinirina Donnah¹, Rahetlah Volatsara Baholy², Rakotozandry Jean de Neupomuscène¹, Paulo Salgado³, Rakotomanana Olga Rachel⁴, Hélène Artus⁵, Lionel le Mezo⁵.

¹Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Madagascar

²FIFAMANOR, BP 198, Antsirabe 110, Madagascar

³CIRAD, UMR SELMET, BP 319, Antsirabe 110, Madagascar

⁴Centre national de recherche appliquée au développement rural, Département de Recherches Zootechniques et Vétérinaires FOFIFA/DRZV BP:1690, Antananarivo, Madagascar

⁵CIRAD, UPR AIDA, 7 Chemin de l'IRAT, Ligne Paradis 97410 Saint Pierre, Ile de la Réunion, France

Adresse : FOFIFA/DRZV BP1690, Antananarivo ; mail : razafinarivotsiry@gmail.com

FINTINA

Misy fiantraikany lehibe amin'ny fiompiana omby eto Madagasikara ny fitombon'ny mponina. Izany moa dia noho ny fitombon'ny filàna ara-tsafako ary koa ny fihenan'ireo toerana ahafahan'ny omby miraoka vilona. Manoloana izany ary dia tokony hisy rafitra hajoro afahan'ny vokatry ny fiompiana hanome fahafaham-po ny filan'ny mponina. Eto dia ny fampiasana modely faminavinana ny famokaran'ny vilona sy ny tsinjolavitra avy amin'ny zanabolana fototra hiangana hitantanana ny kijana. Noho izany dia norefesina isaky 15 andro ny vokatry ny *Brachiaria brizantha*o anaty 1m², ary nampiarahana tamin'izany ny fahazahoana sary tamin'ny zanabolana SPOT5. Izany natao moa dia namolavolana modely haminavinana ny vokatry vilona azo avy amin'ny fampitahana vokatry *Brachiaria* eny an-toerana sy ny tombana omen'ny zanabolana. Izany fampitahana izany dia nanome $R^2=0,64$. Noho izany dia afaka vinavinaina avy lavitra tsy mila midina any an-toerana ny famokaran'io karazam-bilona iray io. Ny modely azo avy amin'ny sary roa nomen'ny zanabolana tamin'ny 26 aprily sy 6 jona 2013 dia nampiasaina mba hanamboarana saritany maneho ny famokaran'ny vilona eo amin'ireo

karazana kijana ao amin'ny toeram-pikarohana ao Kianjasoa. Ireo saritany ireo dia milaza fa ao anatin'ireo kijana rehetra misy any Kianjasoa izay mirefy 95,54ha ny fitambarany dia nahitana 321,25 sy 256,9 taonina vilona maina tamin'ireo daty roa izay voalaza eo ambony. Noho izany dia nokajiana ny isan'ny omby afaka fahanana ao amin'io toeram-pikarohana iray io sy ny isan'ny omby zakan'ny kijana tsirairay avy misy an-toerana. Izany dia afahana milaza fa mihoatra lavitra ny voka-bilona misy any an-toerana izay 659 226 taonina, manoloana ny filan'i Kianjasoa izay 287437 taonina fotsiny. Maro ary ireo soso-kevitra azo aroso ao amin'ny toeram-pikarohana ; toy ny fitehirizana ny vilona mba entina hitsinjovana ny main-tany na koa ny famarotana ireo vilona mihoatra ny filàn'omby mba ampitombo ny vokatry ara-toekarena misy ao Kianjasoa.

Teny fototra : NDVI, *Brachiaria brizantha*, omby, isa zakan'ny kijana iray, Sarin-tany, fomba famahanana omby.

RESUME

La croissance démographique a un impact sur le développement de l'élevage bovin à Madagascar du fait de l'augmentation de la demande en viande bovine et de la réduction des surfaces des parcours fourragers. Face à cette situation, un système de gestion de pâturages est nécessaire afin d'améliorer la disponibilité fourragère et d'adapter l'offre alimentaire aux besoins des animaux. Dans cette étude, l'utilisation d'un modèle de prédiction du rendement fourrager, et de la télédétection serviront de base de raisonnement pour créer le système de gestion. Pour se faire, le rendement fourrager du *Brachiaria brizantha* a été enregistré tous les 15 jours sur des placettes de 1,0 m² en parallèle avec l'acquisition d'images satellites SPOT 5. Puis, un modèle de prédiction du rendement fourrager a été élaboré par la corrélation de la production de *Brachiaria*, mesurée sur le terrain et l'indice de végétation NDVI obtenu à partir des images satellites. Le résultat de la régression non linéaire entre ces paramètres a donné un coefficient de détermination (R²) de 0,64. Ainsi, il a été possible de prédire la production de biomasse de cette espèce fourragère à partir d'une image satellite. Le modèle apparié à deux images satellites, prises le 29 avril et le 6 juin 2013, a été par la suite utilisé pour construire une carte de disponibilité fourragère des différentes parcelles de pâturage de la station de recherche +à Kianjasoa. D'après les informations des cartes, les quantités de matière sèche (MS) dans la station répartie sur les 95,54ha de pâturage sont de 321 et 257 tonnes de MS le 29 avril et le 6 juin, respectivement. Le nombre d'animaux pouvant être alimentés durant ces dates ainsi que la

capacité de charge annuel ont été calculés. La disponibilité annuelle de fourrage dans la station (659,22 t de MS) dépasse largement les besoins annuels du troupeau de bovins (287,43 t de MS). À partir de ces évaluations, des recommandations ont été proposées comme la mise en place d'un système de conservation des fourrages pour subvenir au besoin durant les périodes déficitaires, ou la vente du surplus fourrager à d'autres fins pour valoriser la production de la station.

Mots clés : Bovin, *Brachiaria brizantha*, Capacité de charge animale, Cartographie, NDVI, Système fourrager.

ABSTRACT

The growth of population affects the development of cattle husbandry in Madagascar as the demand in beef increases and the forage production areas are reduced. In view of this situation, a system of pasture management is required to improve the forage availability and to match the food demand to the animal need. In this study, the use of a prediction model of the forage yield, and a remote sensing technique come as a basic argument to conduct a system of forage management. To do so, the yields of *Brachiaria brizantha* grown on small planks of 1,0 m² were recorded and analyzed in line with images obtained from the SPOT 5satellite every 15 days. A model of forage yield prediction was then constructed in correlation with the production of *Brachiaria*, measured on the field and the vegetation index (NDVI) obtained from satellite imagery. The calculation of the linear regression between these parameters has given a correlation coefficient (R²) of 0,64. Thus, the biomass production using satellite imagery can be predicted for this particular forage species. A model that combine two satellite pictures, taken on April 29 and on June 6, 2013, was then used to draw a forage availability map of various grasslands at the Agricultural Research station of Kianjasa. According to the information read on the map, the amount of Dried matters (DM) of the station stretching along 95,54ha of grasslands are respectively of 321 and 257 tons on April 29 and on June 6. The number of animals that could be fed between these periods as well as the yearly forage yields were calculated. The forage availability of the station (659,22 t of DM) has widely out pasted the quantity required to feed the herds (287,43 t of DM). From these assessments, recommendations were suggested to establish a system of fodder preservation to supply need during shortage periods, or in order to sell excess or for any other purpose to value up the production of the station.

Keywords : *Brachiaria brizantha*, Cartography, Cattle, Forage system, NDVI, Stocking capacity.

Introduction

Comme dans la majorité des pays en voie de développement, Madagascar connaît une forte croissance démographique, et une hausse de la consommation de protéines animales (PADR 1999). Cette augmentation de la consommation oblige Madagascar à développer les productions animales, principalement celle des bovins qui reste la première source de protéines animales des résidents de la grande île (Rafolo 1988 ; Rakotondraivo 2009). Cependant, ce développement peut se heurter à certaines contraintes comme l'indisponibilité des aliments pour le bétail et la dégradation des prairies (Jacquin et al 2010) en particulier dans les zones d'élevage extensif comme le Moyen Ouest de Madagascar. Dans ces zones, les troupeaux de bovins devraient pouvoir satisfaire ses besoins alimentaires en accédant aux ressources pastorales spontanées (Rasambainarivo et al 1987). Ainsi, une bonne gestion de ces ressources devrait être effectuée afin de minimiser les dégâts liés au surpâturage, mais également au sous-pâturage. Le besoin d'une telle gestion est imposé d'une part par la nécessité d'économiser les ressources alimentaires, qui sont limitées et, d'autre part, par la nécessité d'adaptation des systèmes de production aux changements globaux (changements climatiques, pression foncière, etc.) (Vall et al 2014). Généralement, pour une intensification de la production animale à l'échelle du territoire, il est indispensable d'utiliser des méthodes de suivi et d'observation spatiale afin d'avoir une vision globale, mais en même temps détaillée de l'ensemble. Dans la présente étude, la télédétection et la modélisation du rendement fourrager ont été utilisées pour le suivi, l'évaluation, et la gestion des couverts végétaux afin d'améliorer le système fourrager existant.

Matériels et méthodes

Zone d'étude

La zone d'étude correspond à la station expérimentale de Recherche Zootechnique et Fourragère de Kianjasoa (FOFIFA) située dans le Moyen Ouest de Madagascar. Cette zone se situe entre les Hautes-Terres centrales et le littoral occidental de la grande île à 19°03'10.4"S, 046°22'33.2"E et à environ 950 m d'altitude. Autrefois, la superficie générale de la station était de 4200 ha (Rasambainarivo et al 1980), mais seulement 1/10^e de cette superficie sont utilisés actuellement. Introduit depuis plus de 40 années dans cette zone du pays, le *Brachiaria brizantha* est devenu aujourd'hui une des espèces fourragères à propagation non contrôlée, sans

entretien, sans amendement ni repiquage ; il reste néanmoins une espèce fourragère de qualité utilisée pour l'alimentation des bovins de la station. Ainsi, plus de 75 % de la ration fourragère des bovins de la station est constituée par le *Brachiaria brizantha*, le reste étant composé d'herbes spontanées et de sous-produits agricoles ou fourrages conservés. Le climat du Moyen-Ouest se classe dans le type tropical humide caractérisé par la saison des pluies allant de décembre à mai alternée d'une saison sèche bien marquée (de juin à novembre). La température moyenne se situe entre 23°C (juin) et 29°C (décembre). La moyenne de la précipitation annuelle est de 1500 mm. Une ferme expérimentale a été installée au sein de la station de Kianjasoa dans le but d'évaluer les possibilités d'une exploitation de type familiale, par l'introduction des composants habituels reconnus à travers la région comme les bœufs de trait, les races à viande (Renitelo) ou encore les vaches laitières (Frisone), en valorisant au maximum la disponibilité fourragère et afin d'obtenir le maximum de profit. Cette ferme expérimentale compte actuellement 126 bovins.

Acquisition des données agronomiques

La collecte de données agronomiques a été effectuée durant la fin de la saison des pluies, entre avril et juin 2013. Pour ce faire, cinq parcelles situées au sein de la zone d'étude ont été sélectionnées en fonction de plusieurs critères comme la facilité d'accès, le système d'exploitation en pâture et/ou en fauche à base de *Brachiaria brizantha*, la surface et la disposition des parcelles. La surface des parcelles était supérieure à 40 x 40 m afin d'éviter les effets de bordure, mais aussi la prise en compte des marges d'erreur de la géolocalisation. Pour chaque parcelle expérimentale, trois à huit placettes de mesure (1,0 x 1,0 m) représentatives ont été choisies selon la taille et l'hétérogénéité de l'ensemble (méthode des quadrats). Les placettes sélectionnées aléatoirement ont été situées dans la zone fonctionnelle de la parcelle, à au moins 20 m de chaque bordure afin de garantir une localisation au sein des pixels exploitables de l'image satellite (taille d'un pixel de 10,0 x 10,0 m ; précision du GPS : 15 m). Les localisations géographiques des mesures ont été obtenues avec la prise des coordonnées GPS. Sur chaque placette, les paramètres agronomiques mesurés ont été : (i) la hauteur de l'herbe, (ii) la composition botanique, (iii) le stade phénologique et (iv) la production de matière verte. La hauteur de l'herbe a été mesurée à partir de la surface du sol à l'aide d'une règle graduée. La composition botanique et le stade phénologique sont évalués par observation visuelle. Le rendement fourrager en vert est mesuré à partir de la coupe de l'herbe à hauteur de 10 cm du sol. Un échantillon du fourrage (250 à 300g) a été prélevé dans chaque placette et ramené au laboratoire en vue de l'analyse de la teneur en matière sèche.

Acquisition des images satellites

Les mesures au sol ont été effectuées en parallèle avec l'acquisition des images satellites multispectrales SPOT 5 avec une résolution de 10 m, acquises tous les 10 jours. Ces images sont issues de la station de réception et de traitement d'images satellites SEAS-OI, implantée sur le site de l'Institut Universitaire de Technologie de Saint-Pierre à la Réunion. Les données de ces images ont été reliées avec les données agronomiques des dates de mesures au sol se rapprochant le plus des dates d'acquisitions de ces images.

Elaboration du modèle

La corrélation consiste à coupler les indices NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) extraits des images satellites avec les mesures de la quantité des biomasses fourragères géo-référencées sur le terrain. Le NDVI est un indice de végétation très fortement corrélé avec la densité du couvert végétal et la capacité des plantes à absorber la lumière solaire pour la convertir en biomasse (Rouse et al 1973). À partir de cette corrélation, un modèle a été établi de sorte qu'à partir d'une image satellite donnée, il est possible d'évaluer le rendement en biomasse d'une parcelle à un instant "t" défini. Le modèle a été calibré à partir des données des parcelles suivies, mais validé sur d'autres parcelles différentes de celles qui ont été utilisées pour l'étape de calibration.

Capacité de charge

À partir de ce modèle, nous pouvons estimer le nombre maximum de bovins pouvant pâturer une surface donnée sans surexploiter la végétation, c'est-à-dire la capacité de charge de la prairie (Hervé 1989). Les bovins tropicaux adultes étant des animaux dont le poids moyen varie de 200 à 400 kg, et qui consomment environ 2,5 kg de matière sèche (MS) par 100 kg de poids vif. L'unité bovine tropicale (UBT) est définie comme un bovin de 250 kg de poids vif à l'entretien, dont sa consommation journalière est conventionnellement de 6,25 kg de MS. Le concept d'Unités de Bétail Tropical est pratique pour quantifier une grande variété de différents types et tailles de bétail d'une façon standardisée. Cette notion d'unité standard peut servir pour l'estimation de la capacité de charge des différentes parcelles et du bilan fourrager suivant l'évolution du pâturage.

Traitement des données

L'acquisition des données sur le terrain s'est déroulée tous les 15 jours, entre le 26 avril et le 11 juin 2013. Durant cette même période, plusieurs images satellites ont été acquises, mais seulement deux images ont été exploitables pour le calcul de la valeur de NDVI. Le calcul de cet indice est basé sur la propriété de réflectance du couvert végétal dans le spectre visible "rouge" (R) et dans le "proche infrarouge" (PIR). Il varie entre -1 et 1 (Rouse et al 1973)

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{R}}{\text{PIR} + \text{R}}$$

Une analyse statistique par la régression non linéaire à partir du logiciel "R" a permis d'évaluer la relation entre NDVI et rendement en vert du *Brachiaria*. Le modèle obtenu est par la suite utilisé pour calculer la quantité de fourrage consommable qui est donnée par la formule;

$$Q_c = P_p \times T_u^* \times H$$

- Q_c = Quantité de fourrage consommable
- P_p = Production potentielle de fourrage durant une période déterminée et à l'abri des herbivores
- T_u^* = Taux d'utilisation
- H = Nombre total d'hectares

Le taux d'utilisation représente le pourcentage qui détermine la quantité de fourrage disponible après avoir soustrait les pertes dues à divers facteurs comme les insectes ravageurs et le piétinement des animaux. D'une façon générale le taux d'utilisation est compris entre 30 et 50%, mais dans cette étude cette valeur a été plafonnée à 50% suivant les recommandations pour les pâturages indigènes (Boudet 1975). La capacité de charge pour une période déterminée est obtenue par la formule :

$$C_c/\text{période (kg de poids vif/ha)} = \frac{Q_c}{2,5} \times \frac{100}{\text{Période}}$$

La capacité de charge en UBT est alors déterminée par la formule suivante :

$$C_c \text{ UBT} = \frac{C_c/\text{période}}{250}$$

Résultats et discussion

Influence des dates de mesure et des sites sur la production fourragère

Les rendements moyens en matière verte de *Brachiaria brizantha*, au cours de l'expérimentation dans les différents sites de calibration du modèle sont présentés dans la Figure 1. Les résultats des analyses de variance (ANOVA) montrent par leurs coefficients de détermination que 45% de la variabilité observée est expliquée par la localisation des sites d'échantillonnage et 41% par la période de coupe. Le test de Tukey HSD a révélé des effets significatifs des variables site et période ainsi que de leur interaction ($P < 0,05$). La production de biomasse de *Brachiaria* baisse significativement au-delà du mois de mai (A et B). Les sites peuvent être classés en trois groupes bien distincts (a, b et c). Les bâtons identifiés par les mêmes lettres ne sont pas significativement différents. Les valeurs indiquées sont les moyennes avec les intervalles de confiance correspondantes.

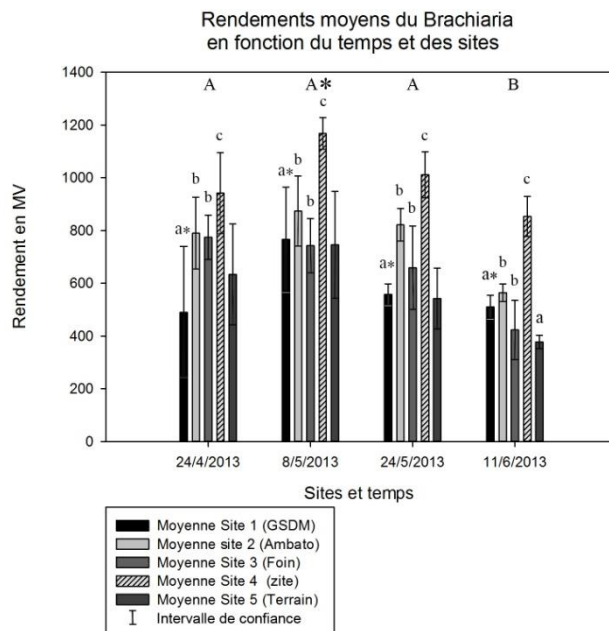


Figure 1 : Rendement moyen en matière vert de *Brachiaria brizantha* en fonction de la période et des sites.

Relation entre biomasses et NDVI

Une corrélation exponentielle positive ($R^2 = 0,64$; $N = 39$; $\text{Rendement} = 1442,93 \cdot \text{Exp}(0,82 \cdot \text{NDVI}) - 1639,07$) entre le rendement en vert de *Brachiaria brizantha* et le NDVI a été observée (Figure 2). Le modèle obtenu est validé à partir des données des parcelles différentes de celles utilisées pour la calibration. La validation consiste à tester la robustesse de l'équation empirique obtenue entre le rendement en matière verte et NDVI, en confrontant les valeurs du rendement en vert mesuré et celles du rendement théorique. Le rendement en vert

mesuré détermine le rendement réel mesuré à l'intérieur de la placette tandis que le rendement en vert théorique détermine le rendement prédit à partir du modèle obtenu. Les résidus constituent la différence entre le rendement en vert mesuré et théorique, plus les résidus s'approchent de la valeur nulle, meilleur sera le modèle. La régression entre NDVI et les paramètres agronomiques, notamment le rendement du *Brachiaria* donne un coefficient de détermination supérieur par rapport à celui obtenu par Andriarimalala ($R^2=0,52$) dans des conditions expérimentales similaires (Andriarimalala 2014). Pour justifier cette faible corrélation entre le NDVI et les paramètres agronomiques, plusieurs hypothèses ont été avancées comme (i) le jaunissement causé par les carences constatées sur les feuilles des plantes, et (ii) l'envahissement des adventices au niveau des parcelles. D'une part, la carence des feuilles a un effet direct sur les valeurs de NDVI en modifiant le niveau de réflectance dans le rouge visible (Girard et al 1999) affirment que le comportement spectral des végétaux est lié à leur composition en pigments, en particulier la chlorophylle. De plus, la carence en éléments fertilisants ou hydrique perturbe la croissance et le développement des cultures. D'autre part, l'envahissement des adventices sur les parcelles de *Brachiaria* peut également constituer un facteur de biais dans l'estimation du rendement de la biomasse par la télédétection, car elles sont prises en compte dans les calculs de NDVI en tant que végétation verte. L'établissement d'une relation empirique fiable entre indices de végétation et les données agronomiques dans l'estimation de la production exige également un réseau d'échantillonnage très dense dans le temps et dans l'espace (Bégué, 2002). De plus, il faut aussi souligner que les indices de végétation calculés à partir d'images satellites sont sensibles aux autres facteurs non liés à la végétation. Ces indices de végétation sont sensibles, par exemple, aux variations des conditions atmosphériques tels les nuages, la poussière, la brume, la vapeur d'eau et d'autres aérosols qui diminuent la valeur du NDVI (Moussa, 2005). Une étude récente réalisée dans la partie Sud de Madagascar a démontré que NDVI est fortement corrélé avec la précipitation (Rakoto, 2011). Enfin, il faut aussi considérer l'intervalle de temps entre la prise d'image satellite et l'instant où nous avons réalisé le prélèvement ; plus cette durée est longue moins le modèle sera précis. De plus, les événements (coupe, pâture, etc.) entre ces deux dates peuvent également nuire à la calibration du modèle. Néanmoins, nos résultats sont exploitables pour la détermination du rendement de biomasse notamment de celui de *Bracharia* à partir d'images satellites. La connaissance de la production de biomasse des parcelles au niveau d'un large territoire permet de mieux raisonner la gestion des pâturages en fonction de la disponibilité fourragère et de la localisation et effectifs des animaux. Face à la dégradation des pâturages et aux variabilités spatio-temporelles, une carte de biodisponibilité permettrait aux acteurs du développement rural

d'apporter des conseils aux éleveurs face au déficit de l'alimentation.

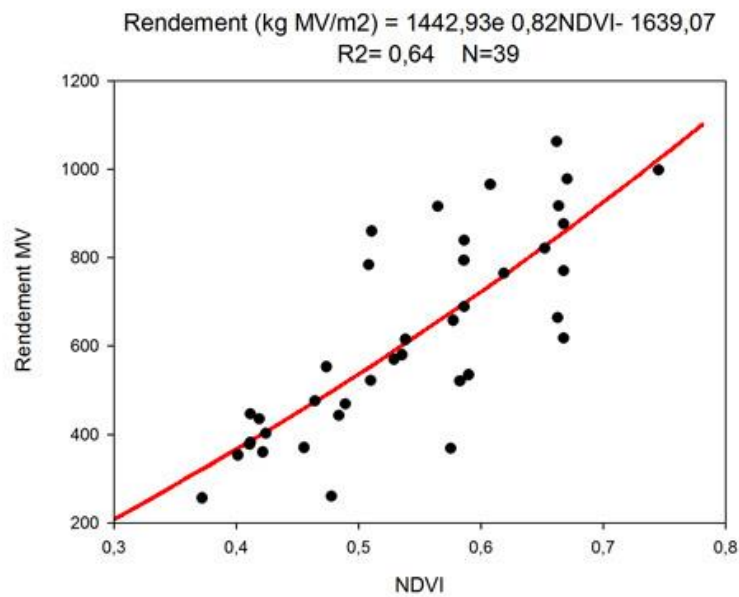


Figure 2 : Relation entre rendements en biomasse du *Brachiaria brizantha* et NDVI.

Carte de biodisponibilité

L'occupation du sol de la station de Kianjasoa est divisée en trois zones bien distinctes. Premièrement, les zones d'habitation contenant les espaces de travail et les étables, ensuite, les zones de culture, et enfin les zones de pâturage. C'est à partir de cette dernière zone que le modèle va prédire la production fourragère afin de mieux gérer le pâturage. Une carte de la disponibilité des ressources fourragères dans les différents sites de pâturage de la station a été élaborée (Figure 3). Les sites 1 à 5 ont permis la calibration du modèle ; la production des 6 sites restants a été déterminée à partir de ce modèle et des deux images satellites. Ainsi, les productions moyennes de *Brachiaria brizantha* dans toute la station le 29 Avril et 06 Juin 2013 sont respectivement 670,19 et 483,98 tonnes de MV. Ces valeurs confirment les résultats de l'ANOVA (Figure 1) sur les mesures directes du rendement sur le terrain dont nous avons observé qu'il y avait une différence significative de production fourragère entre ces dates. Ces valeurs couplées aux résultats de laboratoire ont permis par la suite de déterminer la quantité de matière sèche disponible sur chaque site à un instant "t" (Tableau 1). La connaissance de la quantité de matière sèche disponible à un instant et à un endroit définis facilite la gestion du pâturage ou du système fourrager dont la prise de décision sur la date d'utilisation du pâturage pour une utilisation optimale des ressources. La capacité de charge instantanée, en Unité Bovine Tropicale, générale de la station expérimentale (11 parcelles de pâturage) s'élève à environ 4,52

UBT/ha. Ainsi, à partir de la répartition des UBT par site, l'offre fourragère sera ajustée en fonction des besoins des animaux. Certains sites seront mis en défens temporaires (site n° 10) par la pratique de pâturage tournant afin de mieux valoriser les repousses végétales. D'autres sites seront mis en défens pendant toute la saison des pluies pour reporter la production fourragère de la période excédentaire (saison pluvieuse) à la période déficitaire (saison sèche), sous forme de réserves (foin, ensilage, report sur pied) (Klein et al 2014). Les sites restants seront utilisés d'une manière raisonnée suivant les disponibilités des ressources fourragères prédites par le modèle pour ne pas dégrader le stock fourrager. Notons ici que ces calculs de capacité de charge ont été effectués sur une base de 244 jours c'est-à-dire durant la saison où nous pouvons encore trouver de la matière verte sur les parcelles (décembre à juillet). Ainsi, il est judicieux de conserver le fourrage pour subvenir aux besoins du cheptel durant les mois restants (août à novembre). Néanmoins, la banque de fourrage est largement supérieure au besoin annuel des animaux présents dans la station. Dans ce cas, quelques perspectives pourraient être proposées comme l'augmentation du nombre d'animaux jusqu'à 430 têtes. Ou encore, la vente du surplus de fourrage d'environ 370 tonnes (MS) conservé durant les saisons sèches pour augmenter les bénéfices économiques de la station.

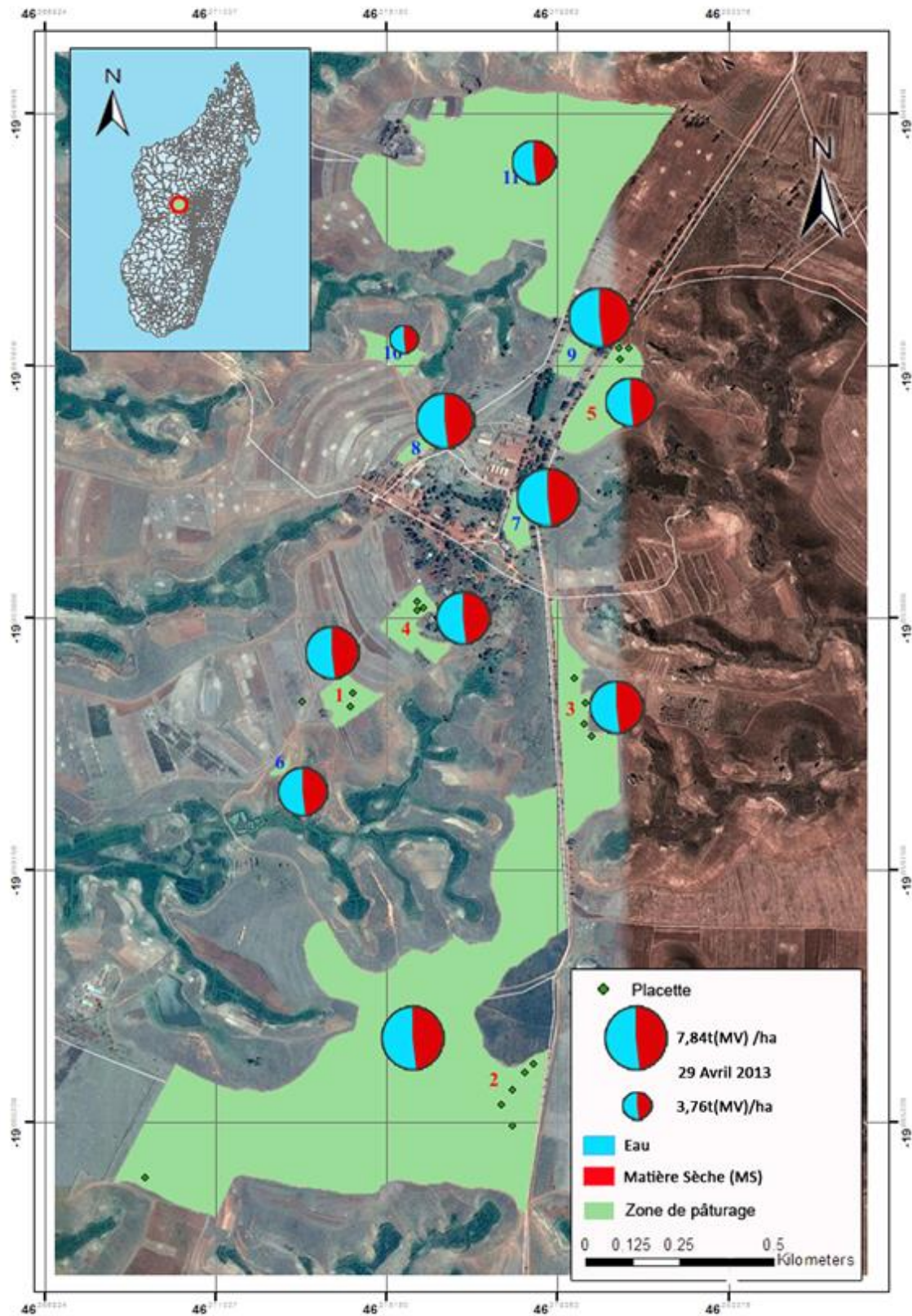


Figure 3 : Cartographie des zones de pâturage de la station Kianjasoa/FOFIFA

Tableau 1 : Table attributaire de la carte de disponibilité du fourrage

	Site 1	Site 2	Site 3	Site 4	Site 5	Site 6	Site 7	Site 8	Site 9	Site 10	Site 11	TOTAL
Production moyenne	702,35 g/m ²	785,44 g/m ²	695,39 g/m ²	702,58 g/m ²	630,21 g/m ²	657,96 g/m ²	701,38 g/m ²	740,9 g/m ²	779,03 g/m ²	272,22 g/m ²	564,41 g/m ²	668,16 g/m ²
Ecartype IC	77,64	56,15	87,76	101,58	140,11	168,19	251,45	65,52	84,87	89,88	71,08	111,88
Taille (Ha)	1,33 ha	52,3ha	5,32ha	1,72 ha	3,68 ha	0,17ha	0,84 ha	0,44 ha	0,74 ha	1,1 ha	27,9 ha	95,54 ha
Qté. MV 29 Av 2013	9,34 t	410,78t	37 t	12,08 t	23,19 t	1,12 t	5,89 t	3,26 t	5,76 t	4,29 t	157,47 t	670,19 t
Qté MS 29 Av 2013	4,48 t	196,9 t	17,73 t	5,79 t	11,12 t	0,54 t	2,82 t	1,56 t	2,76 t	2,06 t	75,48 t	321,25 t
Bovin alim 29 Av 2013	476 Bovins	823871 Bovins	7547 Bovins	797 Bovins	3273 Bovins	7 Bovins	189 Bovins	55 Bovins	164 Bovins	181 Bovins	168480 Bovins	1005042 Bovins
Qté MV 6 Juin 2013	5,79 t	294,41 t	25,93 t	9,87 t	15,56 t	0,43 t	5,11 t	1,99 t	3,60 t	2,99 t	118,30 t	483,98 t
Qté MS 6 Juin 2013	3,07t	156,27t	13,76t	5,24t	8,26t	0,23t	2,71t	1,05t	1,91t	1,58t	62,79t	256,9 t
Bovin alim 6 Juin 2013	327 Bovins	653864 Bovins	5857 Bovins	721 Bovins	2432 Bovins	3 Bovins	182 Bovins	37 Bovins	113 Bovins	140 Bovins	140160 Bovins	803838 Bovins
Qté consmbl Cc/p	9,17 t	360,87 t	36,7 t	11,86 t	25,39 t	1,17 t	5,8 t	3,04 t	5,1 t	7,59 t	192,51 t	659,22 t
Poids vif/Ha	1504 Kg/ha	59159 Kg/ha	6018 Kg/ha	1945 Kg/ha	4163 Kg/ha	192 Kg/ha	950 Kg/ha	498 Kg/ha	837 Kg/ha	1244 Kg/ha	31559 Kg/ha	108069 Kg/ha
Chg HBT	6,02	236,56	24,07	7,78	16,65	0,76	3,80	1,99	3,34	4,97	126,23	432,27

Qté. MV 29 Av 2013 : Quantité de matière verte (MV) le 29 avril 2013 (quantité prédite par le modèle).

Qté. MS 29 Av 2013 : Quantité de matière sèche (MS) le 29 avril 2013 (par analyse au laboratoire).

Bovin alim 29 Av 2013 : Nombre de bovins que le système peut alimenter à un endroit et temps définis.

Qté consmbl : Quantité de fourrage consommable durant l'année (244 jours de disponibilité de la matière verte) après avoir soustrait les pertes dues à divers facteurs comme les insectes ravageurs, le piétinement, etc.

Cc/p : La capacité de charge par kilogramme de poids vif/hectare pour une période déterminée durant la saison pluvieuse (décembre - juillet = 244 jours).

Chg HBT (saison) : La capacité de charge en unité bovine tropicale durant cette même période.

Conclusion

Cette étude effectuée à la station de Recherche Zootechnique et Fourragère de Kianjasoa (FOFIFA) a permis d'évaluer les potentialités d'un système de gestion des ressources fourragères à l'échelle territoire. L'utilisation de la télédétection et du Système d'Information Géographique (SIG) est une méthode indispensable dans ce genre d'étude afin d'avoir une vision d'ensemble, mais en même temps précise sur le système de production végétale. Un modèle de régression non linéaire entre les indices de végétation normalisée (NDVI), calculés à partir d'images satellites et le rendement en vert du *Brachiaria brizantha* a donné un $R^2=0,64$. À partir de ce modèle, le rendement moyen de cette espèce fourragère dans tous les sites pâturables de la station expérimentale a été cartographié incluant la capacité de charge en unité bovine tropicale pour chaque site. Ainsi, il a été possible de déterminer la quantité de matière sèche à un endroit et à temps précis selon les disponibilités des images satellites. Les résultats du modèle ont permis de constater que la quantité de biomasses fourragère disponible dans la station dépasse largement les besoins de l'effectif bovin existant. Ainsi, la conservation du surplus de fourrage augmentera considérablement la production de la station Kianjasoa. Cette méthode d'évaluation constitue un outil d'aide à la décision pour les acteurs du développement rural dans la gestion des ressources pastorales.

Remerciements

Nous tenons à remercier le projet BIOVA aux appuis techniques et financiers pour la réalisation de cet article.

Références bibliographiques

Andriarimalala H. J., 2014. Etude floristique de *Brachiaria* sp., *Chloris*, *Pennisetum purpureum* et élaboration d'un modèle d'estimation de leur productivité télédétection, Université d'Antananarivo écoles supérieure des sciences agronomiques département des eaux et forêts, Promotion : HAIKA, Année : 2013 - 2014.

Anne J., David S., Lacombe J.P., 2010. Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MOD IS NDVI time series/ International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 12S (2010) S3–S10, journal homepage: www.elsevier.com/locate/jag

Bégué A., 2002. Télédétection et production végétale. Paris: Université Pierre et Marie Curie. 112p.

Klein H. D., Rippstein G., Huguenin J., Toutain B., Guerin H., Louppe D., 2014. Les cultures fourragères, Editions Quae, CTA, Presses agronomiques de Gembloux.

Boudet G., 1975. Problèmes posés par l'estimation de la capacité de charge d'un "pâturage naturel" tropical, CIPEA, ILCA, Addis Abeba, Inventaire et Cartographie des pâturages tropicaux africains, Actes du Colloque de Bamako ; Mali (3 - 8 mars 1975), Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux.

Girard M., Girard C., 1999. Traitement des données de télédétection. Paris: Dunod. 97p.

Hervé D., Genin D., 1989. Capacité de charge animale ou indicateur de pression sur des ressources fourragères, Les Cahiers de la Recherche Développement, p.38 - 49.

Moussa M. M., 2005. Application des méthodes d'évaluation de rendements agricoles à l'aide des images NDVI. Niamey-Niger: Centre régional Agrhymet, Rapport de consultation. 30p.

PADR., 1999. Plan d'Action pour le Développement Rural à Madagascar, Ministère de l'élevage, Février 2000.

Rafolo A., 1987-1988. L'alimentation carnée chez les anciens Malgaches. Nouvelles du Centre d'Art et d'Archéologie, numéro 5-6 : 22-25.

Rakoto P. Y., 2011. Analyse du comportement des différents types de forêts de la partie Sud de la Région Anosy face aux variabilités de la précipitation. Mémoire d'ingénieur, ESSA, Département des Eaux et Forêts. Antananarivo. 89p.

Rakotondravao., 2009. Rapport national sur l'état des ressources génétiques animales. Madagascar ; L'état des ressources zoogénétiques dans le monde.

Rasambainarivo J. H., Rakotoarivelo J., Rakotozandrindrainy R., 1980. Utilisation de l'ensilage de maïs pour l'embouche du zébu malagasy en saison sèche (Kianjasoa). *Bulletin de l'Académie malgache*. 58(1-2). p. 126-130.

Rasambainarivo J.H., Razafindratsita R., Rakotozandrindrainy R., Rabehanitriniony M., 1987. Production des bovins sur les pâturages du moyen-ouest malgache, Revue des résultats expérimentaux et proposition de modes d'exploitation. FOFIFA - Département de Recherche Zootechniques et Vétérinaire - BP:4 - Antananarivo Madagascar.

Rouse J., Hass R., Deering W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA , nd.

Vall E., Salgado P., Corniaux C., Blanchard M., Dutilly C., Alary V., 2014. Changements et innovations dans les systèmes d'élevage en Afrique. In : Numéro spécial, Quelles innovations pour quels systèmes d'élevage ? Ingrand S., Baumont R. (Eds). INRA Prod. Anim., 27, 161-174

Chapitre 3

Développement d'un logiciel (3C-BIOVIS) pour la détermination de la disponibilité des ressources fourragères par une approche de modélisation et télédétection.

Publication de l'article :

Accepté avec révision dans un journal Madagascar Conservation and Development

Razafinarivo Tsirinirina Donnah, Rahetlah Volatsara Baholy, Rakotozandriny Jean de Neupomuscène, Ralainindriana Iavo, Andriarimalala Herilalao José, Hélène Artus, Lionel le Mezo, Salgado Paulo, 2016. Développement d'un logiciel (3C-BIOVIS) pour la détermination de la disponibilité des ressources fourragères par une approche de modélisation et télédétection, Madagascar Conservation and Development.

Publié en tant que communication orale durant le Colloque des jeunes chercheurs

Razafinarivo Tsirinirina Donnah, Rahetlah Volatsara Baholy, Rakotozandriny Jean de Neupomuscène, Ralainindriana Iavo, Andriarimalala Herilalao José, Hélène Artus, Lionel le Mezo, Paulo Salgado, 2015. Création d'un logiciel "3C-BIOVIS" pour la détermination de la disponibilité des ressources fourragères par une approche de modélisation et télédétection. Communication orale : Colloque des jeunes chercheurs, Université d'Antananarivo, décembre 2015

Publié en tant que communication affichée durant les rencontres de l'agroalimentaire en océan Indien et a gagné le premier prix du concours mon Poster en 180 secondes

Razafinarivo Tsirinirina Donnah, Rahetlah Volatsara Baholy, Rakotozandriny Jean de Neupomuscène, Ralainindriana Iavo, Andriarimalala Herilalao José, Hélène Artus, Lionel le Mezo, Paulo Salgado, 2016. Développement d'un logiciel (3C-BIOVIS) pour la détermination de la disponibilité des ressources fourragères par une approche de modélisation et télédétection. 5ème Rencontres de l'Agroalimentaire en océan Indien, QualiREG, 28 novembre au 02 décembre 2016 à IUT La Réunion (Premier prix de mon Poster en 180 secondes).

Développement d'un logiciel (3C-BIOVIS) pour la détermination de la disponibilité des ressources fourragères par une approche de modélisation et télédétection

Razafinarivo Tsirinirina Donnah¹, Rahetlah Volatsara Baholy², Rakotozandry Jean de Neupomuscène³, Ralainindriana Iavo³, Andriarimalala Herilalao José², Hélène Artus⁴, Lionel le Mezo⁴, Paulo Salgado⁵.

¹Centre national de recherche appliquée au développement rural, Département de Recherches Zootechniques et Vétérinaires FOFIFA/DRZV BP1690, Antananarivo, Madagascar

²FIFAMANOR, BP 198, Antsirabe 110, Madagascar

³Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Madagascar

⁴CIRAD, UPR AIDA, 7 Chemin de l'IRAT, Ligne Paradis, 97410 Saint Pierre, Ile de la Réunion, France

⁵CIRAD, UMR SELMET, BP 319, Antsirabe 110, Madagascar

Abstract

Cattle husbandry is a common activity practiced for several generations in Madagascar. Unfortunately, cattle farmers have not fully taken full advantage of the potentialities of this sector, mainly because of poor management of the available range lands and fodder resources. An improved cattle production could be achieved through the use of prediction tools integrating remote sensing data with modelling. Here, we present a novel tool developed to aid in husbandry management. We collected measurement field data related to fodder biomass and converted data obtained from remote sensing into fodder quantity. These data were used to program a multispectral SPOT 5 satellite to calculate correlations between the normalized difference vegetation index (NDVI) and the existing plant biomass. Using these correlations, we developed and tested several mathematic models to predict the quantity of biomass and the dry matter content. We developed a software, called 3C-BIOVIS, using computer programming and modelling of the obtained data. The tool predicts the quantity of available dry matter content within a defined rangeland and the number of animals that could be fed within a given time and

space. It was designed to support rural development stakeholders in decision-making and to advise cattle farmers in forage resource management for an optimum output.

Keywords

Cattle, Forage system, NDVI, Programming, Stocking capacity, Warning system.

Résumé

L'élevage de bovin est une activité pratiquée depuis de nombreuses générations à Madagascar. Malheureusement, les éleveurs n'ont pas su jusqu'à aujourd'hui, tirer pleinement profit des potentialités de ce secteur. La mauvaise gestion des parcours et des ressources fourragères représente une des principales causes de cette faible performance. Ainsi, l'amélioration de la production bovine pourrait être obtenue à travers l'utilisation d'un outil de prédiction de la disponibilité des ressources fourragères en utilisant une approche combinée de modélisation et télédétection. Des mesures de données agronomiques de terrain sur la biomasse fourragère ont été effectuées pour convertir les données issues de la télédétection en quantités de biomasse fourragère. Cette approche a nécessité une programmation de passage du satellite multispectral SPOT 5 en parallèle avec l'acquisition de données de terrain pour calculer des corrélations entre l'indice de végétation (NDVI) et la biomasse végétale existante. À partir des régressions, plusieurs modèles ont été élaborés et testés pour pouvoir prédire la quantité de biomasse ainsi que la teneur en matière sèche. La programmation et la modélisation informatique ont permis de développer un logiciel "3C-BIOVIS". L'outil prédit les informations sur la quantité de matière sèche disponible au niveau des parcelles et le nombre d'animaux pouvant être alimentés par chaque parcelle à une période et dans un espace déterminés, via les données obtenues des images satellites. Cet outil a été conçu pour aider les acteurs du développement rural à prendre des décisions de manière à conseiller les éleveurs sur la façon optimale de gérer les ressources fourragères.

Mots clés

Bovin, Capacité de charge animale, programmation, NDVI, Système fourrager, Système d'alerte.

Introduction

Madagascar est un pays caractérisé par de vastes zones de pâturages et de grandes variabilités spatio-temporelles quant aux précipitations. Ces variabilités font qu'il est délicat pour les éleveurs malgaches de tirer pleinement profit des ressources exploitables pour l'alimentation des ruminants. Cela affecte le développement du pays, car une grande fraction de la population subsiste grâce à l'élevage. Le cheptel bovin, symbole national de la population, est devenu la référence de l'élevage malgache. En effet, il représente une valeur en capital estimée à 36 000 milliards d'Ariary (MGA), soit environ US\$ 1,8 milliards en 2014 (Ministère de l'Élevage à Madagascar 2014). Par ailleurs, le zébu est utilisé dans les rituels des us et coutumes de la population et assure plusieurs fonctions socio-économiques. Dans certaines régions de l'île, l'importance du troupeau est une marque de prestige, une forme d'épargne et d'investissement (Ribot 1987, Kaufman 2008, Waeber et al. 2005). Les principaux atouts de la production de viande bovine sont sa qualité pour la boucherie et son faible coût de production, notamment grâce à une alimentation sur parcours basée sur des ressources naturelles renouvelables. Allant de pair avec la filière viande, la filière lait commence à se développer dans les activités d'élevage à Madagascar. En effet, elle apparaît comme l'une des filières animales présentant le potentiel de développement le plus élevé, avec une production annuelle estimée à plus de 100 millions de litres, toutes races confondues. La filière lait représente une valeur de 100 milliards de MGA (environ US\$ 50 millions en 2014) (Ministère de l'Élevage à Madagascar 2014). La production bovine actuelle est cependant encore loin du potentiel de production de l'élevage malgache. Cette faible production est généralement liée au déficit alimentaire du cheptel, surtout durant la saison sèche, pendant laquelle les éleveurs sont confrontés à un déséquilibre entre la demande et la disponibilité en fourrage aussi bien en quantité qu'en qualité. Pourtant, Madagascar dispose encore de grandes surfaces de terrain exploitable pour l'alimentation des ruminants. Une estimation de la distribution des ressources fourragères des grandes étendues éloignées reste toutefois difficile et complexe (Coughenour et Makkar 2014). La production des ruminants pourrait ainsi être améliorée par la mise en place d'un outil fonctionnel pour la gestion à grande échelle de ces ressources en utilisant des imageries satellitaires.

Cet article est destiné à présenter l'outil dénommé 3C-BIOVIS qui a été développé pour aider à la gestion des ressources fourragères par une approche de modélisation et de télédétection. Cet outil fournit des données quantifiables sur la disponibilité des ressources, pour une prise de décision optimale sur l'utilisation des parcelles et parcours fourragers. Il permet aussi de définir la quantité de fourrage vert pour alimenter le cheptel durant les saisons pluvieuses ainsi que le

surplus de fourrage qui pourrait être conservé pour les saisons sèches sous forme de foin ou d'ensilage. Ainsi, à chaque acquisition d'une image satellite, il serait possible de gérer et d'ajuster le troupeau, ainsi que son alimentation, en fonction de la disponibilité des fourrages au niveau de l'exploitation ou au niveau territorial.

Matériels et méthodes

Présentation de l'outil

Le sigle 3C-BIOVIS correspond à « Calculateur de la Capacité de Charge, et de la BIOMasse Végétale par Imagerie Satellitaire ». Il s'agit d'un outil de calcul qui permet de déterminer la quantité des ressources fourragères à partir des données obtenues par traitements d'images satellites. Le noyau de cet outil est configuré à partir de l'Indice de Végétation Normalisé (NDVI) (Rouse et al. 1974) qui est fortement corrélé avec la densité du couvert végétal. Ainsi, les utilisateurs de ce logiciel doivent avoir des notions de base en traitement d'image satellitaire, comme l'extraction de NDVI à l'aide de logiciels tels les Systèmes d'Information Géographique comme QGIS, pour pouvoir utiliser cet outil. Le logiciel 3C-BIOVIS est un modèle indicatif qui contient trois sous-modèles intégrés, à savoir le calcul de la quantité de biomasses, la teneur en matière sèche (MS) et la capacité de charge liée à la classe animale et l'espèce fourragère. Cet outil fournit des informations en temps réel sur la quantité de ressources fourragères ainsi que le nombre d'animaux pouvant être alimentés durant une année sur une parcelle géo-localisée dans une image satellite (Hervé et al. 1989). Un système d'alerte par feu tricolore permet une aide à la décision des utilisateurs du logiciel sur une éventuelle réorganisation de la gestion de l'exploitation ou du pâturage suivant la disponibilité des ressources. La couleur rouge indique un surpâturage de la parcelle. Cela signifie que la production prédite est inférieure à 1,5 tonnes de MS/ha et qu'il est recommandé pour les éleveurs d'arrêter l'exploitation de la parcelle. À l'inverse de cette surexploitation, l'outil indique une coloration verte qui désigne une production de biomasse supérieure à 3,5 tonnes de MS/ha, qui pourrait conduire à un gaspillage des ressources (Barbet-Massin et al. 2004). Entre ces deux couleurs se trouve l'orange qui indique qu'il y a assez de biomasse pour alimenter le cheptel. Par conséquent, cet outil permet d'apporter conseil aux exploitants sur la gestion et/ou la mobilité de leurs troupeaux par rapport à la disponibilité des ressources (itinéraire des parcours, charge animale). Un système de saisi des données (NDVI, date de l'acquisition de l'image satellite, coordonnées GSP, taille de la parcelle, estimation du pourcentage d'utilisation de la parcelle par l'animal, type d'animal) avec une interface facile à utiliser (Figure 1) a été élaboré donnant accès direct aux informations exploitables, sur les fourrages disponibles dans les bases de données du logiciel. Toutefois, des options supplémentaires ont été introduites, comme la possibilité d'utiliser le logiciel sans avoir accès aux données satellitaires, mais par des mesures directes sur le terrain à l'aide d'une placette de 1m². Cette option « mesure directe » a été utilisée pour tester la fiabilité de l'outil, tout en considérant les intervalles de confiance, vu les hétérogénéités intra-pixel de la biomasse. Une

autre option disponible est la possibilité d'utiliser l'outil pour d'autres espèces de ruminants (ovins et caprins) par des coefficients d'équivalence en fonction de leur consommation en aliments grossiers. Le logiciel 3C-BIOVIS est principalement conçu pour les acteurs du développement rural comme les techniciens de l'élevage, mais d'autres acteurs peuvent l'utiliser comme les coopératives d'éleveurs, les ONG, les ministères, les établissements d'enseignement ou de recherche.

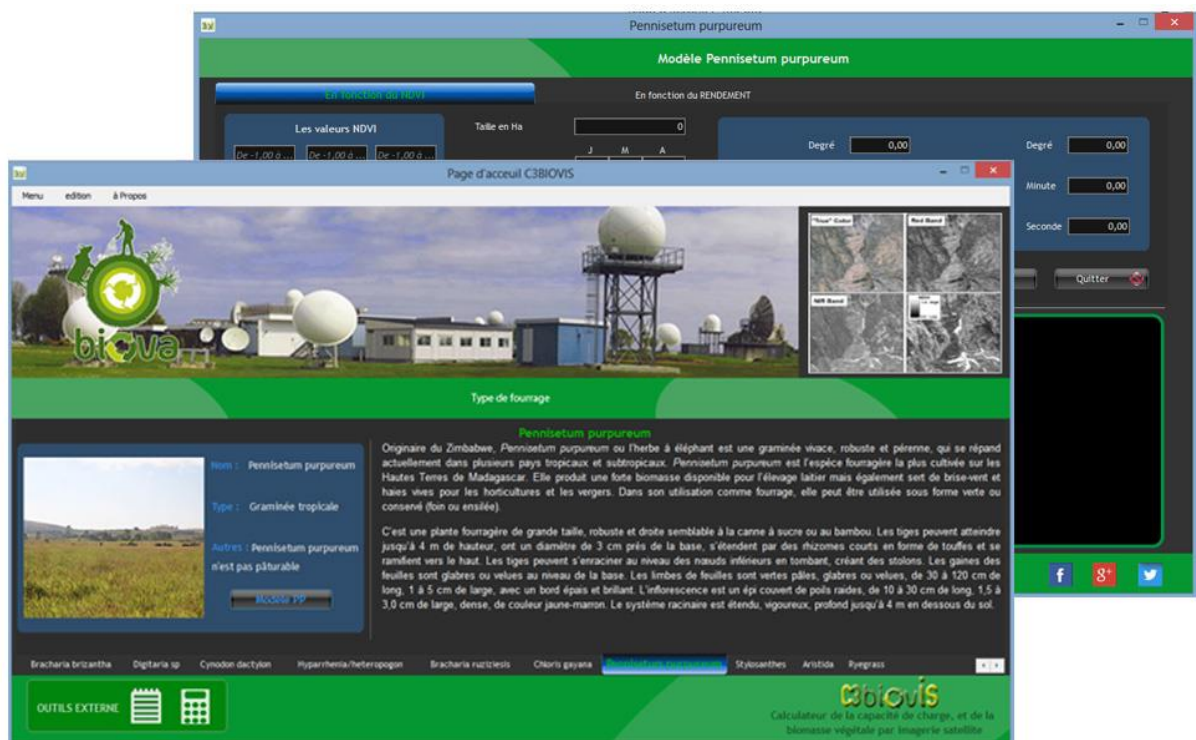


Figure 1: Interface du logiciel 3C-BIOVIS

Zones d'étude

L'outil a été calibré sur deux zones clés de l'élevage de bovin à Madagascar, à savoir les régions du Vakinakaratra et du Bongolava (Figure 2) ; ces régions représentent les deux tiers du triangle laitier malgache (Rakotozandrindrainy et al. 2004). La région du Vakinakaratra, située sur les Hautes Terres de Madagascar ($18^{\circ}59' S$ et $47^{\circ}19' E$), produit plus de 70% de la production laitière nationale (Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche 2004). De ce fait, la plupart des éleveurs cultivent des fourrages durant toute l'année pour alimenter leur cheptel. Le climat tempéré d'altitude dans cette région entraîne une forte saisonnalité dans la production des espèces fourragères tropicales et une dominance des espèces tempérées (Marcel 1986). L'optimum de température pour la photosynthèse des espèces fourragères tempérées est compris entre 10 et $25^{\circ}C$ (Murata et al. 1965), qui sont des températures caractéristiques de cette région.

Dans cette partie de l'île, les espèces tempérées comme le ray-grass, l'avoine ou l'orge, sont généralement plantées en contre-saison dans les bas-fonds en rotation avec la riziculture (Mouret et al. 2014). Les données agronomiques portant sur les fourrages usuellement utilisés en saison sèche ont donc été mesurées dans cette zone.

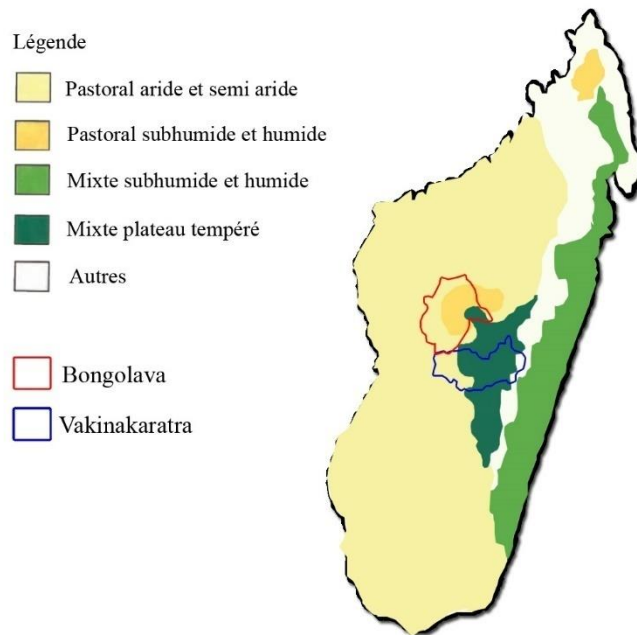


Figure 2 : Répartition spatiale des zones pastorales à Madagascar (modifié d'après Vall et al. 2014)

La région du Bongolava, située dans le Moyen Ouest de Madagascar à 18°44 'S et 46°02'E (Figure 2) a la réputation d'être plutôt orientée vers l'élevage extensif de zébus. La région assure les deux tiers de l'approvisionnement en viande bovine de la capitale par le marché de Tsiroanomandidy (Ministère de l'Élevage à Madagascar 2014). Dans cette zone, les cultures de fourrage en contre-saison sont moins pratiquées (Razafindrakoto 2010). Cependant, il existe de grandes surfaces de pâturage naturel pour alimenter les bovins, y compris les animaux en transhumance. La région est caractérisée par un climat tropical à deux saisons distinctes (sèche et pluvieuse). La température moyenne est de 30°C (Razafindrakoto 2010) qui représente l'optimum pour la photosynthèse des espèces tropicales comme *Cynodon dactylon*, *Pennisetum purpureum* et *Brachiaria brizantha* (Jolliffe et al. 1968, Archimède 2009).

Calibration du modèle de rendement de la biomasse fourragère

La calibration consiste à élaborer des modèles prédictifs de la quantité de biomasses, par des régressions statistiques entre les valeurs de NDVI, obtenues d'une série temporelle d'images SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre), et les rendements mesurés sur le terrain. Des prélèvements de biomasses aériennes ont été effectués sur des placettes de 1m² (Guérif et al. 2008), dans les zones d'étude pour paramétrer et calibrer les modèles. Les observations portaient sur la hauteur des différentes espèces fourragères et leur rendement en matière verte. Les sites ont été sélectionnés avec (i) une taille suffisamment grande, et (ii) une homogénéité des composants afin de réduire les effets d'erreurs entre les observations sur le terrain et par télédétection. Le seuil minimal de la dimension des parcelles a été fixé à 1600 m², et le nombre de points de prélèvement a été défini selon la surface des parcelles. Sur chaque point, seule l'espèce majoritaire dans la placette a été considérée pour la calibration, et un prélèvement GPS a été effectué pour la géolocalisation des points. Ces procédés ont été répétés tous les 15 jours durant plusieurs mois (6 mois x 3 années) pour pouvoir suivre l'évolution des différents stades de développement de chaque espèce. Parallèlement, une programmation pour l'acquisition d'images satellites a été effectuée par la station de réception et de traitement d'images satellites SEAS-OI sise à la Réunion. Des Indices de Végétation Différentiels Normalisés (NDVI) ont été calculés à partir des images satellites multispectrales SPOT 5 de 10 m de résolution, acquises sur un pas de temps de 10 jours, en parallèle avec les prélèvements sur le terrain. L'indice de végétation correspond à la valeur de réflectance du vert qui est fortement corrélée avec la densité du couvert végétal et la capacité des plantes à absorber la lumière solaire pour la convertir en biomasse (Meneses-Tovar 2011). Dans le domaine spectral, la végétation chlorophyllienne a toujours des valeurs de réflectance plus fortes que les autres éléments (sols, eau, minéraux). Ainsi, différentes relations de régression ont pu être calculées entre les données agronomiques caractérisant chaque type de végétation et les données spatiales (NDVI), pour obtenir des modèles de prédiction (Figure 3).

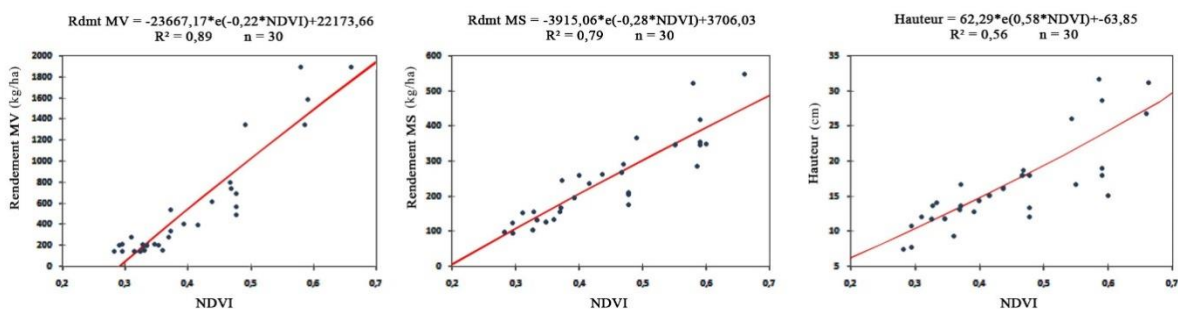


Figure 3 : Représentations graphiques des régressions entre les données agronomiques et les valeurs de NDVI pour *Eleusine indica*

Calibration du modèle de matière sèche

À chaque mesure du rendement fourrager sur le terrain, un échantillonnage de la biomasse des différents types de fourrages, en utilisant la méthode des placettes de 1m², a été effectué le long d'un transect pour réaliser les analyses de matière sèche au laboratoire. Le poids sec total des plantes a été déterminé selon les techniques standardisées de séchage à l'étuve à 60°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant (Dulphy et al. 1975). Ces poids ont alors été multipliés par le facteur approprié en relation avec la taille du quadrat afin de les convertir en kilogramme de MS/ha. Les différentes teneurs en matière sèche dans le temps sont par la suite couplés puis corrélés avec la valeur du NDVI pour obtenir un ensemble de données sur la productivité en matière sèche à partir des données satellites et de la date de prise de l'image. Un modèle de prédiction de la variation temporelle de la teneur en matière sèche en fonction de la valeur de NDVI a été calibré. Ce deuxième modèle couplé au premier donnera, à partir d'une image satellite, la teneur moyenne en matière sèche d'une parcelle déterminée à une période déterminée. Par conséquent, connaissant la surface de la parcelle, il sera possible de définir la capacité de charge animale de chaque parcelle suivant la capacité d'ingestion de matière sèche par les ruminants.

Calcul de la capacité de charge

La capacité de charge animale est un indicateur important pour exploiter les parcelles de façon rationnelle. La capacité de charge correspond au nombre d'animaux, en unité bovin tropical (UBT) ou par unité gros bétail (UGB), par unité de surface en hectares (Hervé et al. 1989). Elle dépend de la production annuelle du fourrage (kg de MS/ha), de la capacité d'ingestion du ruminant et de la durée d'exploitation du fourrage au cours de l'année. La notion de capacité de charge animale présente l'avantage de donner un ordre de grandeur du nombre d'animaux susceptibles d'être alimentés sur les parcelles, dans les limites raisonnables d'une exploitation ménageant à peu près les productions à venir. La quantité de fourrage obtenue à partir des précédents modèles est paramétrée pour caractériser la densité du bétail en fonction du taux d'ingestion de matière sèche pour chaque bovin. La production totale annuelle de certains fourrages a été déterminée par une culture mise en défend dans des enclos ; lorsqu'il n'a pas été possible d'effectuer cette pratique, les données ont été récupérées à partir de la littérature.

Modélisation et programmation

Toutes les données ont été programmées et modélisées sous un langage métier dénommé WLangage (Vandevelde 2014) de manière à ce qu'à partir de variables d'entrées basiques, il soit possible d'obtenir des informations poussées sur la disponibilité des ressources. WLangage est

un langage de programmation de quatrième génération exploitable dans des outils de développement informatique tel que WinDev. Cette version test du logiciel 3C-BIOVIS n'est exécutable que par un système d'exploitation Windows. WLangage contient des fonctions de haut niveau, qui permettent l'affectation du contenu des champs d'une fenêtre, c'est-à-dire les données d'entrées, vers les modèles stockés dans les bases de données pour ressortir ensuite les résultats des calculs. Une fois que les variables d'entrées (Tableau 1) sont saisies dans l'outil, tout le système subit un changement considérable pour faire calculer les différents indicateurs de la parcelle (Variables de sortie, Tableau 1). Ces variables d'entrées sont totalement indépendantes des autres variables. À l'opposé, les variables de sortie ont un rôle mineur dans le processus, mais elles sont les plus importantes, car elles fournissent les informations recherchées dont la productivité de la parcelle, la capacité de charge et l'indicateur traduisant la pression animale. Entre ces deux types de variables se trouvent les variables d'état, qui sont les générateurs du processus de calcul dans le logiciel.

Validation de l'outil

La validation de l'outil a consisté à confronter les valeurs de biomasse mesurées sur le terrain dans les placettes aux valeurs prédites par l'outil. Cela désigne un processus qui permet de tester la précision prédictive d'un modèle dans un échantillon test par rapport à la précision prédictive de l'échantillon d'apprentissage à partir duquel le modèle a été développé. Dans ce cas, toutes les valeurs mesurées sur le terrain ont été employées pour cette validation par la technique de la validation croisée « leave-one-out » ou « cross-validation » (Holden et al. 1996). Pour ce faire, toutes les composantes de l'échantillon « n » original ont été divisées en « n » échantillons, puis, un des « n » échantillons a été sélectionné comme ensemble de validation et les « n-1 » autres échantillons constituaient l'ensemble d'apprentissage. L'erreur quadratique moyenne a été calculée pour donner le score de performance du modèle sur l'échantillon de test. Cette opération a été répétée en sélectionnant un autre échantillon de validation parmi les « n-1 » échantillons qui n'avaient pas encore été utilisés pour la validation du modèle. L'opération a ainsi été répétée « n » fois pour qu'en fin de compte chaque sous-échantillon aura été utilisé exactement une fois comme ensemble de validation. La moyenne des « n » erreurs quadratiques moyennes a finalement été calculée pour estimer l'erreur de prédiction.

Résultats et discussion

Tableau 1: Modèles et variables du Logiciel 3C-BIOVIS

VARIABLES D'ENTREES	VARIABLES D'ETAT (Modèles prédictifs du rendement)						VARIABLES DE SORTIE
Date de l'image satellite	Nom de l'espèce	n	Modèle Rendement MV	R ²	Modèle rendement MS	R ²	
	<i>Brachiaria brizantha</i>	169	$MV = -4603,53e^{-0,29NDVI} + 4565,65$	0,64	$\%MS = 215,04e^{-5,57NDVI} + 34,82$	0,52	Rendement en MV (t/ha)
							Hauteur (cm)
Coordonnées GSP (gradient)	<i>Hyparrhenia / Heteropogon</i>	70	$MV = -3119,1e^{-0,2NDVI} + 3201,76$	0,59	$\%MS = 568,49e^{-8,12NDVI} + 35,12$	0,79	Quantité de MV disponible (t)
	<i>Eleusine indica</i>	30	$MV = -23667,18e^{-0,22NDVI} + 22173,66$	0,89	$MS = -3915,06e^{-0,28NDVI} + 3706,03$	0,79	Teneur en MS (%)
Taille de la parcelle (ha)	<i>Cynodon dactylon</i>	48	$MV = -23070,21e^{-0,12NDVI} + 22506,82$	0,79	$MS = -5396,68e^{-0,098NDVI} + 5405,97$	0,73	Rendement en MS (t/ha)
	<i>Aristida multicaulis</i>	12	$MV = -187774,42e^{-19,75NDVI} + 641,31$	0,67	$\%MS = 575,60e^{-0,38NDVI} - 437,68$	0,47	Quantité de MS disponible (t)
NDVI moyenne de la parcelle	<i>Stylosanthes CIAT 184</i>	20	$MV = -4747,71e^{-0,48NDVI} + 4199,48$	0,62	$\%MS = 266,11e^{-0,29NDVI} - 173,97$	0,43	Coordonnées GSP (Degré décimal)
	<i>Brachiaria ruziziensis</i>	30	$MV = -7066,37e^{-0,3NDVI} + 6566,83$	0,82	$MS = -1141,06e^{-0,64NDVI} + 998,54$	0,73	Nbr de têtes pouvant être alimentés à l'instant "t"
Type d'espece animale	<i>Lolium perenne 1*</i>	15	$MV = 60,62NDVI - 24,63$	0,68	$MS = 5,62NDVI - 2,18$	0,52	Nbr de têtes pouvant être alimentés/année
	<i>Pennisetum purpureum 2*</i>	17	$MV = 0,034e^{5,418NDVI}$	0,73	$MS = 0,004e^{5,84NDVI}$	0,68	Capacité de charge de la parcelle (UBT, UGB,.../ha)
Taux d'utilisation du fourrage 3*	<i>Chloris gayana 2*</i>	17	$MV = 0,045e^{5,011NDVI}$	0,71	$MS = 0,014e^{4,49NDVI}$	0,59	Verte 3t(MS)/ha > Orange > Rouge 1,5t(MS)/ha

- 1* Rahetlah 2014
- 2* Andriamanlala 2014
- 3* Boudet1975

Relation entre l'indice NDVI et le rendement des différentes espèces fourragères

Lorsque la végétation est étudiée par télédétection, les variations de la réflectance mesurées au niveau d'un capteur satellitaire sont liées aux propriétés optiques de la biomasse végétale, mais également à la structure de la végétation et au taux de recouvrement du sol. Lorsque la végétation est peu couvrante, la réponse spectrale des plantes est affectée par la réflectance des sols (Nesrine 2015). Il y a donc une grande différence entre la calibration des parcelles fourragères naturelles et celles qui sont cultivées. Il est généralement plus difficile d'avoir une bonne corrélation pour les parcours et les pâturages naturels. Néanmoins, dans les deux cas, les valeurs de NDVI présentaient toujours une forte corrélation avec la densité du couvert végétal (Figure 3). Durant les différentes calibrations, les modèles exponentiels ont donné de meilleurs résultats par rapport aux modèles linéaires. Certains auteurs suggèrent une relation non linéaire entre NDVI et quantité de biomasse (Tucker et al. 1985, Santin-Janin et al. 2009). Les coefficients de détermination entre NDVI et le rendement de biomasse végétal sont meilleurs pour les parcelles cultivées. Cependant, les parcours naturels sont moins uniformes du fait de l'envahissement par d'autres espèces d'adventices. De plus, les indices de végétation sont également sensibles à la réflectance du sol sous-jacent (Moussa 2005). Ainsi, les coefficients de détermination sont moins bons pour ces pâturages naturels. En moyenne, 70% des variabilités des mesures directes sur le terrain sont expliqués par les modèles internes du logiciel à partir des données obtenues par imagerie satellitaire. Pour le reste, soit le logiciel sous-estime, soit il surestime, mais en général, les calculs se font dans l'ensemble en prenant en considération la totalité des pixels existant au niveau de la parcelle. La figure 4 représente graphiquement le nuage de points des valeurs réelles sur le terrain, du rendement en MV (tonnes/ha) des différentes espèces par rapport aux valeurs prédites MV (tonnes/ha) par le logiciel. Le nuage de points affiche la ligne qui illustre la prédiction parfaite, où la valeur prédite correspond exactement à la valeur réelle. La distance d'un point par rapport à cette ligne à un angle idéal de 45 degrés indique le niveau d'exactitude ou d'inexactitude de la prédiction. Ainsi, les résultats issus du logiciel confirment les capacités des données satellitaires à fournir des estimations de la productivité des fourrages (Le Mézo 2012). Les modèles de l'outil s'exécutent aussi bien sur l'échantillon test que sur l'échantillon d'apprentissage durant la validation croisée.

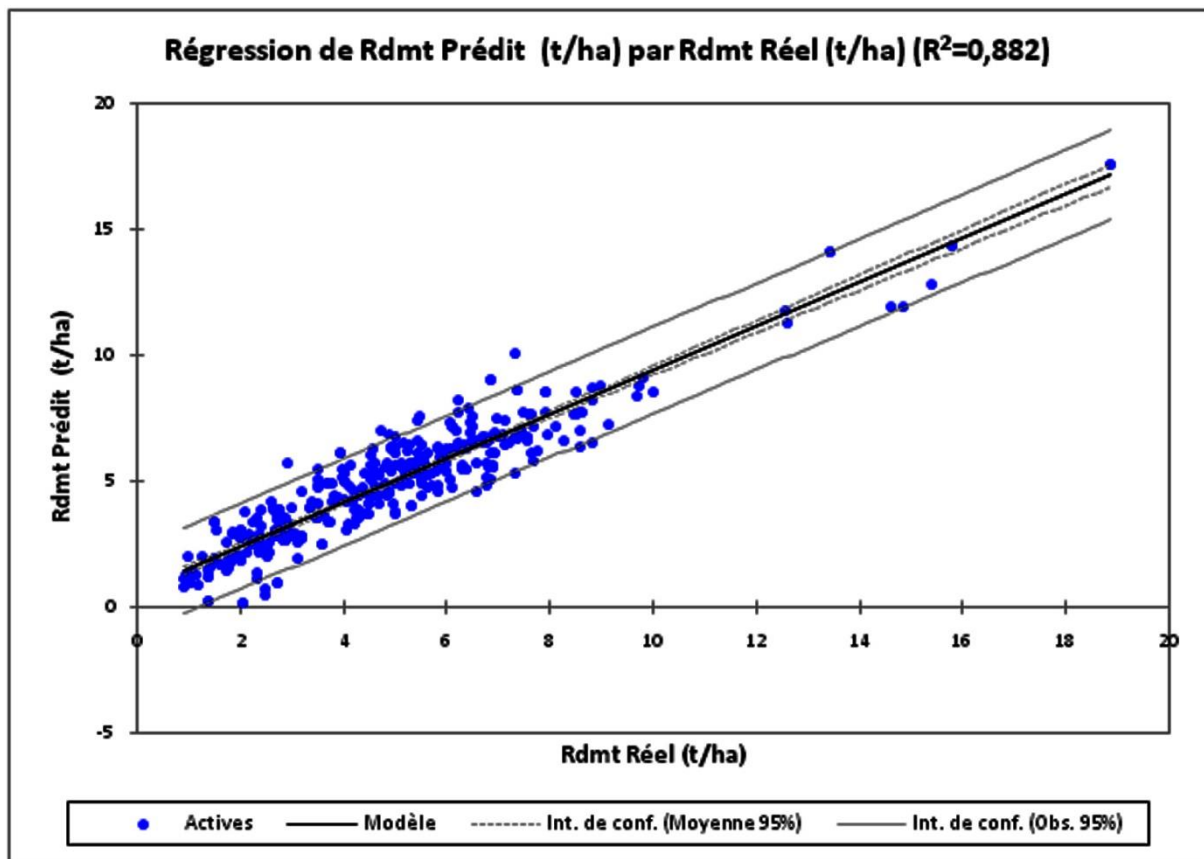


Figure 3 : Nuage de points des valeurs réelles du rendement des différentes espèces confondues par rapport aux valeurs prédites par le logiciel.

Variables de sortie

Le logiciel calcule le rendement fourrager moyen ainsi que la teneur en matière sèche du fourrage déterminée à la date de la prise de l'image satellitaire. Ces données ont été traitées par l'outil pour calculer la quantité de fourrage total disponible pour le bétail à cette date, mais aussi la capacité de charge optimale de la parcelle. Des coefficients de conversion ont donné des informations sur le nombre maximum d'herbivores, selon leur type (espèce animale, taille), pouvant pâturer la surface de la parcelle sans détérioration de la végétation. Les utilisateurs de l'outil peuvent ainsi équilibrer la quantité ingérée par les animaux, la productivité en matières sèches de la végétation, la gestion à long terme du pâturage et les coûts de production (Klein et al. 2014). Toutes ces données sont géo-localisées en degré décimal pour faciliter l'introduction des données dans les logiciels courants en système d'information géographique. Ainsi, il sera désormais possible de réaliser des cartes de disponibilité des ressources fourragères. Les cartes de biomasse pourraient potentiellement être utilisées à plusieurs fins comme dans la gestion de troupeau ainsi que son affouragement en fonction de la disponibilité des ressources au niveau

de l'exploitation et/ou au niveau du territoire. Mais d'autres fonctions peuvent être envisagées ; il a été démontré que ces cartes pouvaient être utilisées pour planifier les feux contrôlés dans la gestion de pâturage (Holechek et al. 1995). La quantité de biomasse utilisée comme combustible doit atteindre au moins 1500 kg/ha pour que le feu se propage (Trollope et al. 1986). Des perspectives de développement de l'élevage à Madagascar peuvent être envisagées, comme en Afrique du Sud (Coughenour et Makkar 2014), sur la diffusion de cartes de disponibilité végétale rapportées tous les 10 jours au niveau des ministères et des districts agricoles. Par conséquent, il serait possible de profiter au maximum de la disponibilité des ressources, comme dans la gestion de pâturage, pour déterminer l'instant propice de la mise à l'herbe ou de la sortie d'herbe durant une saison déterminée. Durant cette étude, la calibration du logiciel a été effectuée à partir du satellite SPOT 5, mais rien n'empêche une adaptation à d'autres satellites (par exemple, Sentinel2) qui pourraient fournir les valeurs de NDVI. Cependant, quel que soit le satellite utilisé, certains paramètres devraient être considérés lors de l'utilisation de l'outil comme : (i) l'allure générale de la prairie qui ne doit pas être trop dégradée, c'est-à-dire que l'offre fourragère ne devrait pas être trop limitée par l'envahissement des adventices ou l'apparition de zones nues ; (ii) une variation saisonnière prononcée (par exemple, le prolongement de la saison sèche) pourrait affecter la teneur en matière sèche prédite par le logiciel. Par ailleurs, le logiciel est doté d'un système de partage en ligne des résultats, relié directement à l'adresse de l'auteur. Ce système prendra en compte les évaluations, ainsi que les contributions des utilisateurs du logiciel pour une éventuelle perspective d'évaluation ultérieure des ressources fourragères à l'échelle nationale.

Conclusion

L'élevage bovin est un secteur qui présente un grand potentiel dans le développement de Madagascar. Cependant, plusieurs manques à gagner subsistent encore dans ce domaine dû à une mauvaise gestion des ressources alimentaires. Le présent article présente les différentes étapes de développement d'un logiciel appelé « 3C-BIOVIS » qui permet la prédiction du rendement des ressources fourragères par l'utilisation combinée de modèles de prédiction et de la télédétection. Le logiciel a été calibré à partir des modèles résultants des régressions entre les données agronomiques mesurées au sol et les indices de végétation (NDVI) obtenus par imagerie satellitaire. Les régressions donnent une moyenne des coefficients de détermination (R^2) d'environ 0,7 pour prédiction de la biomasse sur le terrain. Le logiciel fournit la quantité ponctuelle de biomasses ainsi que la teneur en MS de chaque parcelle étudiée. Un système

d'alerte, en feu tricolore offre une aide aux utilisateurs pour une éventuelle prise de décision sur la gestion des ressources fourragères. Il devient possible à partir de cet outil d'affirmer que les indices de végétation peuvent être utilisés pour la détermination de capacité de charge animale et de l'état de valorisation des parcelles de pâturage. Ce logiciel représente une grande innovation dans les systèmes d'élevage malgache pour la gestion des ressources fourragères à une échelle territoriale. Il sera possible de profiter au maximum de la disponibilité des ressources pour une plus grande contribution de l'élevage dans le développement du pays. Des perspectives sont déjà envisagées comme la conception mensuelle d'une carte de disponibilité des ressources dans les zones clés de l'élevage malgache. Il serait recommandable d'élargir le travail à d'autres espèces végétales et de les introduire dans les bases de données du logiciel. Ou encore, l'inventaire à l'échelle nationale des ressources disponibles dans l'outil pour une évaluation prospective de la situation fourragère.

Remerciements

Nous tenons à remercier le projet BIOVA aux appuis techniques et financiers pour la réalisation de cet article.

Références

- Andriarimalala, H. J. 2014. Étude floristique de *Brachiaria* sp., *Chloris pennisetum purpureum* et élaboration d'un modèle d'estimation de leur productivité par télédétection. Unpubl. MS thesis, Université d'Antananarivo, École Supérieure des Sciences Agronomiques. Département Élevage.
- Archimède, H., Sauvant, D., Assoumaya, C., Fanchone, A. et Boval, M. 2009. Fourrages tropicaux : Valeur alimentaire comparée aux fourrages tempérés et évaluation au pâturage. *Rencontres Recherches Ruminants* 16: 17–24. Available at <http://journées3r.fr/IMG/pdf/2009_01_01_Archimede.pdf>
- Barbet-Massin, V., Grimaud, P., Michon, A. et Thomas, P. 2004. Guide Technique pour la Création, la Gestion et la Valorisation des Prairies à la Réunion. Available at <http://publications.cirad.fr/une_notice.php?dk=522332>
- Bolton, J. K. et Brown, R. H. 1980. Photosynthesis of grass species differing in carbon dioxide fixation pathways: V. Response of *Panicum maximum*, *Panicum milioides*, and tall fescue (*Festuca arundinacea*) to nitrogen nutrition. *Plant Physiology* 66, 1: 9–100. <<https://doi.org/10.1104/pp.66.1.97>>
- Boudet, G. 1975. Problèmes posés par l'estimation de la capacité de charge d'un pâturage naturel tropical. In: Inventaire et Cartographie des Pâturages Tropicaux Africains, Actes du Colloque de Bamako, Mali (3–8 mars 1975), pp 265–267. Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux, Maison-Alfort, France. Available at <http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_06-07/08655.pdf>
- Coughenour, M. B. et Makkar, H. P. S. 2014. La conduite d'évaluations nationales des aliments pour animaux. Manuel de Production et de santé animale FAO N. 15. Rome, Italie. Available at <<http://www.fao.org/3/content/29de881a-f9a9-4aca-84f9-777cb200aa1b/i3043f.pdf>>
- Dulphy, J. P., Demarquilly, C., Henry, M., Jailler M. et Jamot, J. 1975. Perte de composés volatils lors de la détermination à l'étuve de la teneur en matière sèche des ensilages. *Annales de Zootechnie* 24, 4: 743–756. Available at <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00887512/document>

- Girard M-C., Girard M.C., 2010. Traitement des données de télédétection, Environnement et ressources naturelles, DUNOD.
- Guérif, M. et Seguin, B. 1991. Estimation de la biomasse et du rendement des cultures à partir du satellite SPOT: Résultats d'une expérimentation sur blé dur en Camargue. Séminaire Méditerranéens 4: 115–127. Available at <<http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=CI911187>>
- Hervé, D. et Genin D. 1998. Capacité de charge animale ou indicateur de pression sur des ressources fourragères. Les Cahiers de la Recherche Développement, pp.38 -49. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010013720>
- Holden, S. B. 1996. Cross-validation and the PAC Learning Model. Research Note RN/96/64, Department of CS, University College, London.
- Holechek, J. L., Pieper, R. D. & Herbel, C. H. 1995. Range Management: Principles and Practices - Second edition. Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Jolliffe, P. A. et Tregunna, E. B. 1968. Effect of temperature, CO₂ concentration, and light intensity on oxygen inhibition of photosynthesis in wheat leaves. *Plant physiology* 43, 6: 902–906. <<https://doi.org/10.1104/pp.43.6.902>>
- Kaufmann, J. C. 2008. The non-modern constitution of famines in Madagascar's spiny forests: “water-food” plants, cattle and Mahafale landscape praxis. *Environmental Sciences* 5, 2: 73–89. <<http://dx.doi.org/10.1080/15693430801912162>>
- Klein, H.-D., Rippstein, G., Huguenin J., Guerin, H., Toutain, B. et Louppe, D. 2014. Les cultures fourragères. Editions Quae, Versailles, France.
- Le Mézo, L. 2012. Caractérisation de la ressource fourragère des prairies cultivées de la Réunion par image satellite. Ph.D. thesis. Agronomie Production Végétale Environnement, VetAgro Sup, CIRAD.
- Marcel, A. 1986. Capacité oxydative et résistance à la sécheresse de différentes plantes supérieures CAM-C3-C4 et de végétaux inférieurs. *Bulletin de la Société Botanique de France. Lettres Botaniques* <<http://dx.doi.org/10.1080/01811797.1986.10824702>>

- Ministère de l'Agriculture de l'Élevage et de la Pêche 2004. Filières et Actions du Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche : Filière Lait. Fiche N. 202. Available at <http://www.inter-reseaux.org/IMG/pdf_202_Filiere_Lait.pdf>
- Ministère de l'Élevage à Madagascar 2014. Statistiques des cheptels à Madagascar. Rapport de la Direction des Ressources Animales. Available at <<http://www.mpae.gov.mg/donnees/statistique/>>
- Meneses-Tovar, C.L. 2011. L'indice différentiel normalisé de végétation comme indicateur de la dégradation. *Unasylva* 62, 2: 39–46. Available at <<http://www.fao.org/3/contents/129df418-217e-56e2-afe2-79ba574933be/i2560f.pdf#page=41>>
- Mouret, P. et Le Gal, P. Y. 2014. Evaluation participative des stratégies d'évolution d'exploitations laitières dans la région Vakinankaratra – Madagascar. Présenté pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie. UMR-Innovation, Montpellier SupAgro-INRA-CIRAD, agritrop.cirad.fr, 56 pages.
- Moussa, M.M. 2005. Application des méthodes d'évaluation de rendements agricoles à l'aide des images NDVI. Niamey-Niger: Centre régional Agrhymet, Rapport de consultation.
- Murata, Y., Iyama, J. Honma, T. 1965. Studies on the photosynthesis of forage crops. IV. Influence of air-temperature upon the photosynthesis and respiration of alfalfa and several southern type forage crops. *Proceedings of the Crop Science Society of Japan* 34, p. 58-154.
- Nesrine, C. 2015. Méthodes de classification pour la cartographie de l'occupation du sol, Journée Etats de surface pour la spatialisation, Techniques d'observation et méthodes d'analyse pour la gestion de l'eau dans les bassins versants agricoles méditerranéens. Ecole d'Hiver, ENSEGID Bordeaux-INP.
- Rahetlah, V. B., Salgado, P., Andrianarisoa, B., Tillard, E., Razafindrazaka, H., Le Mezo, L., Ramalanjaona, V.L. 2014. Relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and forage biomass yield in the Vakinankaratra region, Madagascar. *Livestock Research for Rural Development*. (in press)
- Rakotozandrindrainy, R., Razafindrajaona, J.M., Foucras, G. 2007. Diagnostic rapide à la ferme des mammites subcliniques des vaches laitières du triangle laitier des hautes terres de

- Madagascar. Ecole nationale vétérinaire de Toulouse, Revue de médecine vétérinaire. ISSN 0035-1555, INIST :3502, 35400014697149.0070, vol. 158, no2, pp. 100-105
- Razafindrakoto, H.A. 2010. Le dynamisme de l'élevage bovin dans la commune urbaine de Tsiroanomandidy, capitale du Bongolava. Unpubl. MS thesis. Université d'Antananarivo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. <http://biblio.univ-antananarivo.mg/theses2/>
- Ribot, J. 1987. Les comportements de l'éleveur et du zébu à Madagascar l'adaptation du rôle et des actions du service de l'élevage a ces comportements, Madarevue page 125-136 http://madarevues.recherches.gov.mg/img/pdf/terre-mg21_4_.pdf
- Rouse, J., Hass R., and Deering W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA
- Santin-Janin, H., Garel, M., Chapuis, J.L. & Pontier, D. 2009. Assessing the performance of NDVI as a proxy for plant biomass using non-linear models: a case study on the Kerguelen archipelago. *Polar Biology* 32, 6: 861–871. (doi:10.1007/s00300-009-0586-5)
- Vall, E., Salgado, P., Corniaux, C., Blanchard, E., Dutilly, C., Alary V. 2014. Changements et innovations dans les systèmes d'élevage en Afrique UMR Selmet, campus international de baillarguet, f-34398 montpellier, INRA Prod. Anim., 27 (2), 161-174
- Waeber, P. O., Wilmé, L., Ramamonjisoa, B., Garcia, C., Rakotomalala, D. 2015. Dry forests in Madagascar, neglected and under pressure. *International Forestry Review* 17, S2: 127–148. <<http://dx.doi.org/10.1505/146554815815834822>>

Chapitre 4

L'utilisation de la télédétection pour la classification des zones de pâturage de Tsiroanomandidy (Madagascar) via l'algorithme « Random Forest »

Publication de l'article :

Accepté avec révision dans l'acte du Forum de la recherche sur l'Agrobiodiversité

Razafinarivo Tsirinirina Donnah, Rahetlah Volatsara Baholy, Rakotozandriny Jean de Neupomuscène, Salgado Paulo, Lebourgeois, Valentine, 2017. L'utilisation de la télédétection pour la classification des zones de pâturage de Tsiroanomandidy (Madagascar) via l'algorithme *Random Forest*, Forum de la recherche sur l'Agrobiodiversité, Fianarantsoa, Madagascar.

Publié en tant que communication orale durant le Forum de la recherche sur l'Agrobiodiversité

Razafinarivo Tsirinirina Donnah, Rahetlah Volatsara Baholy, Rakotozandriny Jean de Neupomuscène, Salgado Paulo, Lebourgeois, Valentine, 2017. L'utilisation de la télédétection pour la classification des zones de pâturage de Tsiroanomandidy (Madagascar) via l'algorithme *Random Forest*, Forum de la recherche sur l'Agrobiodiversité, Fianarantsoa, Nov. 2017, Madagascar.

L'utilisation de la télédétection pour la classification des zones de pâturage de Tsiroanomandidy (Madagascar) via l'algorithme « Random Forest »

Razafinarivo Tsirinirina Donnah¹, Rahetlah Volatsara Baholy², Rakotozandriny Jean de Neupomuscène², Paulo Salgado³, Valentine Lebourgeois⁴

¹Centre national de recherche appliquée au développement rural, Département de Recherches Zootechniques et Vétérinaires FOFIFA/DRZV BP1690, Antananarivo, Madagascar

²Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Département Elevage, Université d'Antananarivo, Madagascar

³CIRAD, UMR SELMET, BP 319, Antsirabe 110, Madagascar

⁴CIRAD, UPR TETIS, Maison de la Télédétection, Montpellier, F-34093 France

ABSTRACT

Demand in animal products rises over the world, because of the growth of population, urban planning, and the rise of income. Nevertheless, this situation causes major changes on land uses, tending to reduce the surface of pasture areas. Such event decreases the availability of forage resources and the movement of cattle herds which are basic factors for animal production in some countries of the world. Madagascar, as a developing country, follows this tendency, particularly for cattle sector which is the first source of animal protein of the population. The design of a system for monitoring forage resource availability at a regional level seem to be an interesting way whether forage reserves need to meet the cattle feed. Implementing this system requires a less complex, but more reliable and easily reproducible approach, that might be applied to large field surfaces. Thus, a grading of the various pasture areas of the region of Tsiroanomandidy was conducted using a combination of remote sensing technique and modelling. The former uses the reflecting property of objects from earth surface to convert them into exploitable data and recorded into images by a multispectre satellite. The use of « *Random Forest* » algorithm on data received from SPOT 5 satellite has led to results which were close to the reality. The grading of the five most common forage spieces on nature pasture lands of Madagascar has reached an overall accuracy of 77.6%. These figures were reported to the map to determine land uses of the region and served to calculate the capacity load of the region which was of 29 752 TLU/year. This map could be used as a decision tool to improve pasture management of a region. The study needs to be deepened particularly by increasing the number of monitored parcels and satellite images for the modelling.

Key words

Geographic Information System, Land use, pastoralism, Programming, Ruminant, Stocking capacity.

RESUME

La demande en produits d'origine animale s'accroît dans le monde, du fait de la croissance de la population, de l'urbanisation, et de l'augmentation du revenu. Cependant, cette situation engendre de grands changements sur l'occupation du sol, tendant vers une réduction des surfaces de pâturages. Ce phénomène limite la disponibilité des ressources fourragères et la mobilité des troupeaux qui sont des facteurs essentiels de la production animale dans certains pays du monde. En tant que pays en développement, Madagascar n'échappe pas à cette tendance, principalement pour le secteur bovin qui est la première source de protéine animale de la population. La mise en place d'un système d'évaluation de la disponibilité des ressources fourragères à l'échelle régionale semble intéressant pour savoir si les stocks fourragers pourront satisfaire la demande des animaux. La mise en place de ce système nécessite l'utilisation d'une approche peu complexe, mais robuste, facilement reproductible, pouvant couvrir de grandes surfaces de terrain. Ainsi, une classification des différentes zones de pâturage de la région de Tsiroanomandidy a été effectuée par l'utilisation combinée de la télédétection et de la modélisation. La télédétection utilise les propriétés de réflectance des objets depuis la surface terrestre pour les transformer en données exploitables stockées dans des images satellites multi-spectrales. L'utilisation de l'algorithme « *Random Forest* » sur des données obtenues par le satellite SPOT 5 a permis d'aboutir à des résultats proches de la réalité. Les résultats de classification des cinq espèces fourragères les plus courantes dans les pâturages naturels de Madagascar ont donné une précision globale de 77,6%. Les résultats ont été cartographiés pour déterminer l'occupation du sol de la région et ont permis de calculer la capacité de charge régionale qui est de 29 752 UBT/an. Cette cartographie pourra être utilisée en tant qu'outil de décision pour améliorer la gestion de pâturage à l'échelle régionale. Cette étude mérite d'être approfondie, notamment par l'augmentation du nombre de parcelles suivies et d'images satellites utilisées pour l'étape de modélisation.

Mots-clés

Capacité de charge animale, Occupation du sol, Pastoralisme, Programmation, Ruminant, Système d'Information Géographique.

INTRODUCTION

La demande en produits d'origine animale s'accroît dans le monde, du fait de la croissance de la population, de l'urbanisation, et de l'augmentation du revenu. Cependant, parallèlement à cette situation et l'extension nécessaire des surfaces dans les systèmes de production extensifs, nous observons régulièrement une réduction des surfaces pâturables. Cette réduction entrave la disponibilité des ressources fourragères et la mobilité des troupeaux qui sont des facteurs essentiels de la production des ruminants. Ainsi, les limites de certains systèmes de production ont été approchées, voire dépassées, par les demandes accrues en aliments pour les animaux par rapport à leur disponibilité (FAO 2014). En tant que pays en développement, Madagascar n'échappe pas à cette tendance, principalement pour le secteur bovin qui est la première source de protéine animale de la population. Pour les grands troupeaux de zébu, il est indispensable d'effectuer un système d'élevage extensif, dont les besoins sont fournis à partir de ressources pastorales spontanées sur de grandes surfaces. Dans cette optique, cette étude consiste à élaborer un système d'évaluation des réserves régionales en ressources fourragères. Le besoin d'une telle évaluation est lié à la nécessité de connaître si les réserves fourragères pourront satisfaire la demande des troupeaux. Dans les systèmes spatialement extensifs, les évaluations dépendent presque entièrement des capacités à traiter les données de télédétection et de Système d'Information Géographique. Par conséquent, les données spatiales combinées aux données de terrain vont servir à déterminer les hétérogénéités présentes dans les paysages. Les éléments du paysage, dont l'abondance et la répartition de la biomasse, influent sur le fonctionnement des communautés animales et végétales présentes. La connaissance des données d'occupation fourragère du sol sous forme de cartographie pourrait servir comme outil de prise de décision pour l'optimisation de la production animale. Il est ainsi intéressant d'élaborer un système de détermination de l'occupation du sol par une approche peu complexe, mais robuste, facilement reproductibles et pouvant couvrir de grandes superficies (DeFries 2007). L'utilisation de l'algorithme « *Random Forest* » sur des images satellites optiques à haute résolution (SPOT 5) permet d'aboutir à une classification la plus proche possible de la réalité, tant d'un point de vue thématique que spatial (Schowengerdt 2007 ; Lillesand et al 2008).

MATERIEL ET METHODE

Zone d'étude

La zone d'étude concerne la zone de Tsiroanomandidy qui se trouve dans le Moyen Ouest de Madagascar, dans la région de Bongolava, à 18°44'13.1"S et 46°02'12,6"E. Le relief est donné par un vaste plateau de 800 à 950 m d'altitude constitué par un emboîtement de trois surfaces d'érosion (post-crétacé, méso-tertiaire, fini-tertiaire). Il se présente sous forme d'un vaste glacis dont la planéité est interrompue par des massifs intrusifs de granite et de gabbros (massifs d'Ambohiby à 1 542 m, et de Bevato à 1 432 m). Les interfluves sont représentés par des vallons et thalwegs, drainés par un réseau hydrographique dense (Fleuve Manambolo et ses affluents). Les conditions géographiques de cette zone sont favorables à l'élevage bovin qui est une activité pratiquée traditionnellement depuis plusieurs décennies. Ainsi, les différents systèmes d'élevage existant à Madagascar sont présents dans la région. À commencer par le système pastoral qui se caractérise par la valorisation importante des parcours naturels comme source d'alimentation des animaux. Ce système est représenté par les grands éleveurs sédentaires de zébu qui possèdent des centaines de têtes par éleveur. Pour ces éleveurs, l'importance du troupeau est une marque de prestige et une forme d'épargne. Dans cette activité, la gestion du troupeau s'effectue par une répartition de ces derniers à de petits éleveurs membres de la famille pour pratiquer le « Dabokandro » qui est une forme d'embouche à l'herbe. En général, cette pratique consiste à acheter un troupeau de zébu adulte maigre en fin de saison sèche, puis de les conduire dans des pâturages riches en quantité et en qualité d'herbage pendant une ou deux saisons de pluie (MAEP 2004). Les autres utilisateurs des ressources naturelles sont les transhumants et revendeurs de zébus provenant des régions voisines (principalement Melaky et Menabe). En principe, ces derniers suivent des itinéraires officiels des troupeaux de bœufs de commerce et de transhumance dénommés « pistes à bétail » qui sont fixés par arrêté régional, sur proposition des Chefs de Districts et des Maires concernés (MAEP 2005). Outre l'élevage de zébus, l'élevage de vaches laitières commence à être pratiqué depuis quelques dizaines d'années. Face à la pression accrue sur les ressources, en premier lieu sur la terre, les éleveurs laitiers entreprennent progressivement l'intégration agriculture élevage pour améliorer la production (Lhoste 2004). Une autre forme de système d'élevage laitier périurbain commence aussi à se développer du fait de la forte demande urbaine de proximité, et à l'insécurité qui règne en dehors de la ville. En général, les éleveurs de Tsiroanomandidy disposent d'un grand potentiel pour l'élevage de ruminant, mais le manque de technicité et d'information sur la distribution de ressources est devenu un facteur de blocage pour le développement.

Collecte des données

La classification consiste à regrouper les différentes zones de pâturages de la région de Tsiroanomandidy, en fonction de leur composition floristique et de la réflectance des images satellites correspondantes de chaque parcelle. Pour ce faire, une carte représentative des zones de cultures dans cette région, produite par le projet Sen2-Agri (<http://www.esa-sen2agri.org>), a été exploitée pour élaborer un masque de fourrage et de non-fourrage. La partie fourrage a été ensuite classée suivant les comportements radiométriques des espèces constituants (Benoit M 1988). La télédétection utilise les propriétés d'émission ou de rayonnement des ondes électromagnétiques par les objets depuis la surface terrestre pour les transformer en données exploitables. Une programmation d'acquisition d'images satellites de haute résolution « SPOT 5 » a été effectuée tous les 10 jours durant cinq mois de saison de pluies en 2014 pour pouvoir effectuer la classification. Cette pratique a nécessité également l'utilisation de l'algorithme « *Random Forest* » et de l'outil « *Orfeo Tool Box* » de QGIS pour traiter les données spatialisées au regard des données de vérité terrain. Ainsi, des prélèvements de données GPS sur des sites de contrôle, répartis à travers la région de Tsiroanomandidy, ont été effectués. Ces prélèvements consistaient à détourer chaque parcelle de pâturage naturelle et à prélever les coordonnées géographiques pour la production des polygones d'apprentissage pour la classification. Des critères de sélection ont été établis dont les principaux sont : (i) Une taille des parcelles suffisamment grande, supérieure ou égale à 25 pixels (50 m x 50 m), (ii) l'homogénéité des parcelles, avec une prédominance d'au moins 80% de la population d'une espèce majoritaire et (iii) un nombre de parcelle suffisamment élevé pour respecter la faisabilité et la fiabilité de la modélisation. Ainsi, pour chaque espèce fourragère, au moins 20 sites de contrôles ont été sélectionnés. Cependant, seules 107 parcelles de pâturages naturels ont été jugées exploitables pour être utilisées dans cette classification. Ces parcelles ont été subdivisées suivant la prédominance des espèces fourragères constituantes. Des exceptions ont été acceptées dans les critères de sélection : comme pour le nombre de parcelles de *Cynodon dactylon* et *Eleusine indica*. La taille des parcelles de pâturages représentés par ces deux espèces est généralement inférieure à 2500m² donc inexploitable pour la classification. Par conséquent, seulement une dizaine de parcelles de chacune de ces deux espèces ont répondu positives aux critères de sélection. Cependant, ces espèces représentent une place importante dans l'alimentation des bovins laitiers de cette région. Ainsi, elles ont quand même été introduites dans cette classification. Sur le critère de prédominance d'espèce, une exception a également

été acceptée sur le mélange de *Hyparrhenia rufa* et de *Heteropogon contortus*. Dans cette zone, la flore des pâturages naturels est prédominée par des parcelles composées de ces graminées. Par ailleurs, ces deux espèces sont représentées sur proportion plus ou moins égale. Ainsi, *Hyparrhenia rufa* et de *Heteropogon contortus* ont été regroupées en une seule classe. Au total, cinq principales classes ont été définies pour la classification : *Aristida multicaulis*, *Brachiaria brizantha*, *Cynodon dactylon*, *Eleusine indica* et le mélange de *Hyparrhenia rufa* et de *Heteropogon contortus*. Cette classification a été lancée sur une superficie totale de 59 791ha. Un masque de 28 280ha a été appliqué sur cette superficie pour pouvoir extraire la partie non-fourrage (Terrains bâtis, routes, forêts, etc.) de la classification.

L'algorithme « *Random Forest* »

RF est un classifieur introduit par Leo Breiman en 1996, et a été importé dans le logiciel libre R par Liaw and Wiener (2002), via le paquet *Random Forest*. Cet algorithme repose sur trois principes qui le rendent très performant (Butler 2015).

Premièrement, l'arbre de décision CART (*Classification And Regression Tree*), est une méthode de classification qui fonctionne par choix arbitraire. Il part d'une racine principale où toutes les classes à déterminer sont de même valeur. À chaque nœud, une décision de seuillage est prise pour séparer au mieux les classes. Ces décisions établissent des règles de classification. Étant donné que le comportement spectral des couverts végétaux dépend de plusieurs facteurs (type de végétation, stade de développement, teneur en eau, structure du couvert, etc.) la combinaison des réflectances dans différentes bandes a permis de calculer des indices qui varient en fonction du comportement spectral de chaque espèce. Les seuils de séparations entre classes ont été mis en évidence par les images satellites combinées des indices résultants, qui sont : NDVI, NDWI, MNDWI et IB (Figure 1).

- Le NDVI (Indice de Végétation Normalisé) permet de suivre la végétation, car il mesure l'activité physiologique des plantes. Sa formule est : $NDVI = (PIR - Rouge) / (PIR + Rouge)$ (Tucker 1979). C'est un indice qui permet d'identifier la couverture végétale verte (biomasse aérienne chlorophyllienne) et de suivre son évolution temporelle.

- Le NDWI (*Normalized Difference Water Index*) a pour formule : $NDWI = (PIR - MIR) / (PIR + MIR)$ (GAO 1996). L'indice permet de maximiser la réflectance de l'eau en utilisant les longueurs d'onde du vert, de minimiser la réflectance des masses d'eau en utilisant le proche infrarouge. L'indice peut également être utilisé pour détecter la turbidité de la surface

qui est un indicateur de la présence de chlorophylle-a (Houry et al 2012), ainsi il affecte énormément la réflectance du couvert végétal.

- Le MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*), est un indice qui permet de mettre en évidence les masses d'eau en supprimant de manière plus efficace que le NDWI le bruit des terrains bâtis, ainsi que celui de la végétation et du sol. Le NDWI de Mcfeeters a été modifié par l'utilisation du moyen infrarouge au lieu du proche infrarouge. Les masses d'eau sont ainsi mieux délimitées, par discrimination efficace des surfaces en eau et des surfaces sèches.

- L'IB (Indice de Brillance) a pour formule : $IB = \text{racine}(\text{PIR}^2 + R^2)$. Cet indice présente une sensibilité à l'humidité des sols ; l'augmentation de la teneur en eau s'accompagnant d'une diminution de la luminance de la couleur. Cet indice est donc sensible à la brillance de l'occupation du sol, dont la végétation. Il oppose les surfaces bâties très réfléchies aux surfaces absorbantes comme les sols très humides.

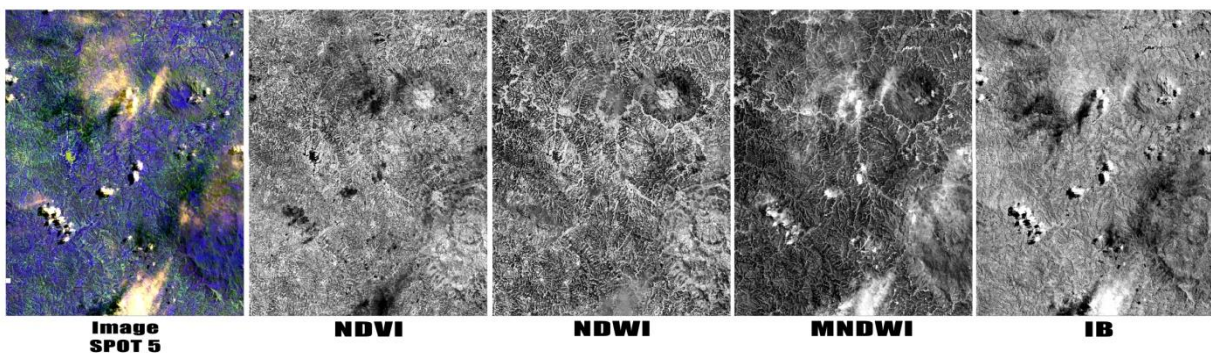


Figure 1 : Les indices utilisés dans l'algorithme « *Random Forest* »

Le deuxième principe de l'algorithme RF est le « *Tree Bagging* » (Krogh et al 1995) qui a consisté à assembler plusieurs classifieurs d'un même type en un unique classifieur. Le *Tree Bagging* réunit une multitude d'arbres de décisions CART qui déterminent chacune des prédictions de classification. À la suite de quoi, les prédictions de ces arbres ont été agrégées et les prédictions majoritaires ont été conservées.

Enfin, le troisième principe de l'algorithme, le « *Bootstrap* » qui est le fait qu'à chaque arbre CART, une partie des échantillons est prise aléatoirement avec remise parmi les observations initiales. Ainsi, chaque arbre construit est alors relativement non-corrélé, ce qui rend les arbres indépendants les uns des autres. Les 2/3 des échantillons sont utilisés pour ces entraînements de « bootstrappés », pour le reste, ils sont utilisés dans le OOB (*Out Of Bag*), pour évaluer la pertinence de classification, un aspect de RF qui permet de préjuger les erreurs de classification,

avant même d'avoir réalisé la validation externe en utilisant le jeu de données de validation de l'utilisateur. L'ensemble de ces critères font de RF un algorithme très efficace, non seulement pour traiter des données complexes et hétérogènes, mais également de gros volumes de données. Le paquet RF du logiciel R est librement utilisable et est utilisé dans le traitement de très nombreuses applications réelles.

Élaboration de la carte de biodisponibilité des ressources fourragères

Un inventaire des ressources fourragères dans une région pastorale, spatialement extensive, doit employer au maximum des données de télédétection (FAO 2014). La cartographie est une observation transversale de l'ensemble d'un système. Elle vise à donner une image instantanée de la population à un instant défini. L'élaboration d'une cartographie du couvert végétal est un outil essentiel au suivi et à la gestion d'un milieu déterminé. Une carte caractérisant les zones de pâturage à l'échelle régionale est ainsi exploitable pour la gestion de pâturage suivant les surfaces disponibles par unité de bétail. L'algorithme RF permet une optimisation de la cartographie des surfaces de la zone d'étude (Butler 2015). Pour ce faire, la série temporelle de cinq images satellitaires optiques ainsi que les différents indices résultants (Figure 2) ont été ouverts et classés par date et par ordre d'indice dans le logiciel QGIS (Spot5_date1 ; NDVI_date1 ; NDWI_date1 ; MNDWI_date1 ; IB_date1 ; Spot5_date2 et ainsi de suite). Cette série d'images a été concaténée par l'outil OTB (*Orfeo Tool Box*) de QGIS afin d'obtenir une seule image à 48 bandes. Les données statistiques de second ordre de cette image concaténée ont été recalculées pour pouvoir créer le modèle de classification RF. Ce modèle a été obtenu par l'application des polygones d'apprentissage contenant les vérités terrains (au moins 20 parcelles par espèce et ayant une superficie supérieure 2 500 m²/classe) sur l'image concaténée en utilisant le module « *Train Images Classifier (rf)* » d'OTB. 20% du jeu de données d'apprentissage a été utilisé pour la validation de cette classification. Enfin, pour avoir la cartographie de la disponibilité des ressources fourragères de cette zone, le modèle RF a été lancé sur l'ensemble de l'image masquée des parties non-fourrages par l'utilisation du module « *Image Classification* » d'OTB. Le masque est un Raster binaire contenant les zones à classer et excluant les zones masquer telles que les routes, les villages, les terrains bâtis, les forêts, etc. La cartographie obtenue a été ensuite validée après vérification par reconnaissance qualitative des classes d'occupation du sol sur le terrain.

RESULTATS ET DISCUSSION

Matrice de confusion

La matrice de confusion (Tableau 1) permet de vérifier la qualité de la classification (Congalton 1991). Elle se compose, en ligne, des occurrences réelles de références d'une classe et, en colonne, des occurrences estimées par la classification. L'*Overall accuracy* (OA) donne la précision globale de la classification (Girard et Girard 1999). Il est calculé à partir de la somme des individus bien classés divisés par le total des individus. La modélisation a donné une *Overall accuracy* de 77,6% qui indique une précision assez élevée de classification.

Tableau 1 : Matrice de confusion (Diaz 2016)

		PREDICTION					Producer Accuracy
		Aristida	Brizantha	Cynodon	Eleusine	Hyp/Het	
REFERENCE	Aristida	23	0	0	0	6	79,3%
	Brizantha	1	18	1	0	2	81,8%
	Cynodon	0	0	10	1	0	90,9%
	Eleusine	0	1	0	9	1	81,8%
	Hyp/Het	6	2	0	3	23	67,6%
User Accuracy		76,7%	85,7%	90,9%	69,2%	71,9%	

L'indice Kappa (Cohen 1968) donne une évaluation globale et intra-classe de la classification (Congalton 1991) en prenant en compte le déséquilibre entre les tailles de population dans les classes. Kappa est calculé à partir de l'*Overall accuracy* et le rapport entre les totaux des classes estimées. Ainsi, Kappa a indiqué une précision globale de 71% en prenant en considération le nombre d'individus prédit suivant la taille de l'ensemble. Selon Pontius (2000) et Oloukoi (2006), une étude de l'occupation du sol peut être validée si le coefficient kappa est supérieur à 50 %.

D'une part, « *User Accuracy* » (UA) évalue le nombre d'individus bien classés au sein d'une classe par rapport aux classes de référence. Il correspond au rapport entre le nombre d'individus bien classés et le total des individus de la classe elle-même. Notre UA affirme que nous avons une assez bonne précision de classification pour chaque espèce, car il varie entre 69,2% pour *Eleusine* et 90,9% pour *Cynodon*. D'autre part, « *Producer Accuracy* » évalue le nombre d'individus bien classés par rapport aux classes estimées. Cet indice est obtenu par le rapport entre nombre d'individus bien classés d'une espèce déterminée et l'ensemble des individus de toutes les espèces confondues. Pour cette partie, les précisions varient entre 67,6%

pour le mélange *Hyparrhenia & Heteropogon* et 90,9% pour *Cynodon*. Enfin, « *f-score* » (Figure 2) est l'indice le plus important de la classification, car il indique la précision spécifique d'une espèce déterminée tout en considérant les individus de la classe, mais aussi la population toute entière. Cet indice est obtenu à partir de la moyenne harmonique des *User* et *Producer Accuracy*. En résumé, cette classification ayant pour but de déterminer les différentes zones de pâturages de Tsiroanomandidy, effectuées à partir l'algorithme RF a donné une précision globale de 77,6%. Plusieurs auteurs attribuent de bonnes critiques sur l'usage de RF pour la classification par sa robustesse et sa facilité d'utilisation (Gislason 2006). Le meilleur résultat de classification est celui du *Cynodon dactylon* avec une précision de classification d'environ 91%. Cependant, ce résultat nécessite encore d'autres investigations, car il est obtenu à partir de seulement 11 parcelles d'entraînement. Ainsi, cette précision de classification de *Cynodon dactylon* peut encore varier au fur et à mesure que nous ajouterons d'autres parcelles dans la modélisation. La plus faible précision de classification est celle de la savane herbeuse composée d'un mélange d'*Hyparrhenia ruffa* et *Hétéropogon contortus* qui est d'environ 70% sur 30 parcelles d'entraînement. Contrairement à celle du *Cynodon*, cette précision de classification ne va plus beaucoup varier du fait du nombre de parcelles d'entraînement assez élevé. Il est admis qu'à partir de 30 échantillons par classe, le résultat de la classification peut être considéré comme stable (Girard et Girard, 2010). Cependant, la faible précision est due au fait que cette savane herbeuse recouvre une grande majorité de la région sur de très grandes hétérogénéités de proportion et de constituant tertiaire. En général, cette étude mérite d'être approfondie, notamment sur une augmentation du nombre de parcelle et d'images satellites pour la modélisation. Ou encore sur l'utilisation de nouvelles technologies en matière de satellite comme le « Sentinel » ou le couple SPOT 6 et 7.

Carte de biodisponibilité des ressources fourragères

Dans les systèmes spatialement extensifs, il s'avère utile de dresser une carte de bilan de la distribution fourragère. De telles cartes identifient les sites où les fourrages sont, soit en déficit, soit en surplus par rapport au besoin local. La carte de biodisponibilité est une cartographie permettant de géo-localiser les différentes zones de pâturage et les espèces constituantes, prédites par modélisation. Ainsi, sans aucun déplacement sur le terrain, cette carte permet une reconnaissance rapide de la région à partir des informations sur la distribution des fourrages sur de larges zones éloignées. Ce genre d'approche est principalement utile pour les parcours qui sont souvent spatialement extensifs et difficiles en termes d'accessibilité. Cependant, quel que soit le système d'élevage, le diagnostic a pour finalité d'apprécier l'adéquation entre les apports

alimentaires et les besoins quantitatifs du cheptel. Le plus souvent un cheptel donné utilise plusieurs types de ressources alimentaires et leur mode de gestion est en étroite relation avec le niveau d'intensification. Ainsi, une expertise technique dans divers aspects des systèmes de production animale, notamment en élevage, en pâturages, en géostatistique, et en systèmes de données spatiales a permis de déterminer que sur une surface totale d'environ 600 km² dans la région de Tsiroanomandidy, 31511 ha sont exploitables en tant que zones de pâturage, soit 52,7% de la surface totale. Cependant, 39,7% de cette surface sont représentés par l'*Aristida multicaulis* qui est plante typique de la savane herbeuse à faible valeur fourragère. *Aristida* est une graminée qui couvre généralement les pentes et les sommets sur des sols dégradés et érodés (Dubois 2004). Une fois lignifiée cette espèce n'est plus du tout appréciée par les bovins. Pour y remédier, les exploitants pratiquent les feux de pâturage pour stimuler une légère repousse d'herbe verte à la fin de la saison sèche lorsque de légères précipitations commencent à apparaître. Une estimation de Boudet (1977) précisait que 10 ha de savane principalement composée d'*Aristida* sont nécessaires pour couvrir les besoins d'un bovin adulte (UBT) sur une année. Ainsi, les surfaces occupées par cette espèce peuvent nourrir environ 1 250 zébus/année. Après *Aristida*, l'*Hyparrhenia* et d' *Heteropogon* sont également présentes en grande quantité dans la région de Tsiroanomandidy. Elles représentent 27,8% des surfaces pâturables, mais elles ne sont pas dominantes et la surface qu'elles recouvrent diminue au cours de la saison sèche et des années au profit de l'*Aristida*. Pour certains éleveurs la présence d'*Hyparrhenia* et d' *Heteropogon* sur une surface est un indicateur de fertilité du sol. Ainsi, ces derniers sont souvent sujets de la dynamique du changement d'utilisation de l'occupation du sol en faveur des cultures vivrières. Ces changements peuvent avoir des impacts économiques, sociaux et environnementaux dans la région. De plus, ces terres sont généralement soumises à des conflits entre l'agriculture et élevage (Ahouangansi 2017) du fait de leur potentialité d'exploitation dans les deux systèmes de production. Il existe, en outre, quelques autres graminées qui occupent une faible partie de la surface non occupée par ces espèces fourragères. Il s'agit de *Cynodon dactylon* et *Eleusine indica* qui représentent respectivement 16,4% et 10,2% des surfaces occupées par les fourrages et sont présentes en « tâche » sur les plateaux (Ranaivoarivelo 2002). La validation sur le terrain a indiqué une légère confusion de classification entre ces deux classes, ceci est probablement dû à la présence de ces deux espèces sur une même parcelle. Par contre, une grande majorité de l'*Eleusine* tend à s'implanter sur les endroits humides près du fleuve de Manambolo. Ces types de fourrages sont généralement récupérés en sac par les éleveurs laitiers dans les zones périurbaines et qui ne disposent pas de terrain pour alimenter leur cheptel en stabulation. Enfin, le *Brachiaria brizantha* qui est une espèce fourragère

introduite, représente une surface totale de 1859 ha qui équivaut à 5,9% des surfaces occupées par les fourrages. La géolocalisation de cette espèce permet de définir un zonage des élevages laitiers. En effet, les surfaces constituées de *Brachiaria* sont généralement localisées à proximité des élevages laitiers de la région. Ainsi, à partir des données statistiques sur les élevages, cette cartographie permet de déterminer la pression animale sur les ressources, c'est-à-dire le nombre de surface disponible par unité de bétail et de biomasse végétale moyenne théoriquement disponible par unité de bétail. Avec plus de données et d'investigation, ce genre d'analyse pourrait être effectuée sur la totalité de l'espace en incluant toutes les espèces végétales et animales constituantes. Notamment sur les zébus qui sont alimentés à partir de ressources naturelles spontanées. Cette analyse nécessitera l'utilisation de cartes de distribution du bétail dressées à partir des informations comme les rapports de vaccination des vétérinaires de la région pour les éleveurs sédentaires et les rapports de délivrance de passeport au niveau des communes environnante pour les éleveurs nomades. Les cartes permettent donc d'informatiser et de cartographier la disponibilité spatiale et les besoins en fourrage.

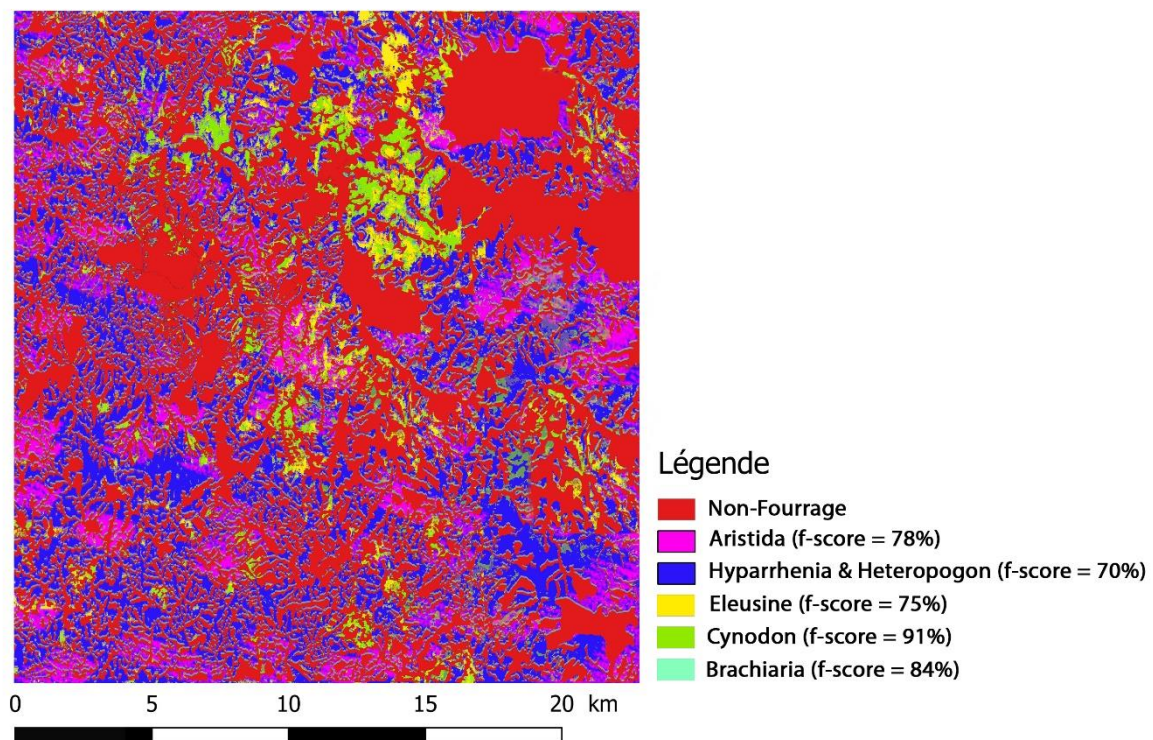


Figure 2 : Carte de la biodisponibilité des ressources fourragères

La carte des besoins fourragers des troupeaux est alors comparée avec la carte de disponibilité en ressources fourragères, pour en dresser une carte de surplus ou de déficit, qui s'avère une

connaissance utile pour le développement de la gestion des ressources à l'échelle régionale. Les résultats obtenus peuvent être extrapolés en terme de besoin animal pour pouvoir estimer le nombre d'animaux pouvant être supporté par la région. Selon la schématisation de Roberge (1988), le système d'élevage de Tsiroamandidy pourrait être classé dans le niveau 1 d'intensification de système d'élevage. Ce niveau stipule qu'il y a une légère amélioration du pâturage naturel par l'introduction d'espèce fourragère améliorante sur une petite proportion des surfaces. La quantité de biomasses produite dans ce niveau d'intensification est estimée entre 1 à 3 t MS/ha/an et la charge relative est de 1 à 2 UBT/ha/an. Ainsi, théoriquement la région de Tsiroanomandidy peut supporter une charge allant jusqu'à 29 752 zébus durant une année (Tableau 2). Quoique les données de télédétection puissent estimer la biomasse sur de larges étendues, l'ensemble de celles-ci peut ne pas être disponible par l'existence d'une topographie impraticable, ou de larges trajets. De plus, les modèles de prédiction de notre étude nécessitent encore plusieurs investigations en terme de volume de données satellitaires et de terrain pour avoir de meilleurs résultats de classification. Malgré cela, ces premiers résultats peuvent déjà être utilisés en tant que base de départ pour mieux ajuster l'offre des espèces fourragères par rapport aux besoins des animaux. La cartographie s'avère être indispensable pour une meilleure vision instantanée, transversale de l'ensemble du système en vue de faciliter le déplacement des éleveurs vers les lieux de pâturage inexploités. Ces modèles de prédiction des différentes classes des espèces fourragères peuvent être combinés à des modèles de prédiction de la quantité de biomasses fourragère (Razafinarivo 2017) pour une meilleure gestion des ressources.

Tableau 2 : Capacité de charge animale (UBT) suivant les surfaces occupées.

Occupation du sol	Superficie (ha)	Pourcentage d'occupation	Capacité de charge (UBT)
Non-fourrage	28 280,14		
<i>Aristida multicaulis</i>	12 509,89	39,7	1 250,98
<i>Hyparrhenia / Heteropogon</i>	8 760,08	27,8	13 140,12
<i>Cynodon dactylon</i>	5 167,81	16,4	7 751,73
<i>Eleusine indica</i>	3 214,13	10,2	4 821,20
<i>Brachiaria brizantha</i>	1859,15	5,9	2 788,73
TOTAL	59 791,22	100	29 752,76

Conclusion

Il est souvent difficile, voire impossible, de gérer la production fourragère dans les systèmes d'élevage spatialement extensifs du fait de l'insuffisance de données à grande échelle. Ainsi, la

présente étude a contribué à une amélioration du système d'élevage extensif de la région de Tsiroanomandidy Madagascar, par l'utilisation combinée de la télédétection et de la modélisation. Une série temporelle d'images satellitaires optiques à haute résolution spatiale SPOT 5 a été utilisée pour créer une carte d'occupation du sol par l'utilisation de l'algorithme RF. Ces procédés ont permis d'effectuer une classification des différentes espèces constituantes des pâturages à une précision globale de 77,6%. Une cartographie de la répartition spatiale des différentes espèces fourragères tirée de cette classification a été utilisée pour calculer la capacité de charge de la région. Il est fort probable que cette approche soit utile dans beaucoup de domaines comme la gestion des ressources fourragères, la gestion des conflits entre les agriculteurs et les éleveurs, l'aménagement du territoire, etc. Plusieurs scénarios pourront être testés en fonction des besoins des utilisateurs suivant la disponibilité des surfaces par catégorie d'espèce fourragère. Cependant, cette étude est loin d'être exhaustive et mérite d'être approfondie, notamment sur l'augmentation du nombre de parcelles et d'images satellites pour conforter les travaux de modélisation. Il est également envisageable d'utiliser de nouvelles technologies en matière de satellite comme le couple SPOT 6 et 7 ou encore « Sentinel ».

Remerciements

Nous tenons à remercier le projet BIOVA aux appuis techniques et financiers pour la réalisation de cet article.

Références bibliographiques

- Ahouangansi M. 2017 Résoudre durablement les conflits agriculteurs-éleveurs, Libre Afrique <http://www.librefrique.org/MauriacAHOUANGANSI-conflits-agriculteurs-eleveurs-200217>
- Benoit M., Girard C., Vaubernier E. 1988 Comparaison du comportement spectral de prairies permanentes en Lorraine avec leur type d'utilisation. *Agronomie*, EDP Sciences, 1988, 8 (3), p. 265-272.
- Boudet G. 1977 Désertification ou remontée biologique au Sahel. *Cah. ORSTOM Série Biol.*, 12 (4): p. 293-300
- Breiman L. 2001 Random forests. *Machine learning*, vol. 45, no 1, p. 5-32.
- Butler S. 2015 Optimisation de la cartographie des surfaces agricoles en Afrique de l'Ouest (Koumbia, Burkina-Faso 2014), Rapport de stage de Master 2 Télédétection et Géomatique appliquées à l'environnement, Université Paris-Diderot Paris 7, Laboratoire d'accueil : Cirad, UMR TETIS, 63 p.
- Cohen J. 1968 Weighted kappa: Nominal scale agreement with provision for scaled disagreement or partial credit. *Psychological Bulletin* 70(4): 213-220.
- Congalton R. G. 1991 A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, 37, 35-46. [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- DeFries R., Achard F., Brown S., Herold M., Murdiyarso D., Schlamadinger B., de Souza C. 2007 Earth observations for estimating greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries. *Environmental Science and Policy* 10(4): 385-394.
- Diaz S. 2016 Cartographie de l'occupation du sol et caractérisation des cultures à partir de séries temporelles Sentinel-2/-1 et d'images THRS sSpot6 : application à la région des hautes terres malgaches, Rapport de stage de Master 2 Géomatique, Université Paul Valéry Montpellier 3, Laboratoire d'accueil : Cirad, UMR TETIS, 76 p.
- Dubois C. 2004 Gestion des ressources pastorales et pratiques d'alimentation des bovins dans les bassins versants d'Imamba-Ivakaka (Lac Alaotra, Madagascar), Ecole nationale vétérinaire de Lyon, Thèse n° 143

- FAO 2014 La conduite d'évaluations nationales des aliments pour animaux, par Michael B. Coughenour & Harinder P.S. Makkar. Manuel de Production et de santé Animales FAO No. 15. Rome, Italie.
- Gao B C. 1996 NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 58: 257-266
- Girard M. C., Girard C. M. 1999 Le traitement des données de télédétection. Dunod, Paris, 529 p. + CD-Rom.
- Gislason P. O., Benediktsson J. A., Sveinsson J. R. 2005 Random Forest for land cover classification. *Pattern Recognition Letters*, 27 (4), 294-300
- Houry L., Clement R., Isenmann M., Porteret J., Jacqueminet C. 2012 Application de la télédétection et de l'analyse spatiale pour le développement d'indicateurs de pression sur les zones humides Rhône-Alpines, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint Etienne, Université Jean Monnet de Saint Etienne. 101 pages
- Krogh A., Vedelsby J. 1995 Neural network ensembles, cross validation and activelearning. In D. S. Touretzky G. Tesauro and T. K. Leen, eds., *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 231-238, MIT Press.
- Lhoste P. 2004 Les relations agriculture-élevage. *Agriculture / Elevage : NORD-SUD*, Cirad-DS, délégué aux sciences de l'animal.30p.
- Liaw A., Wiener M. 2002 Classification and Regression by Randomforest. *R News*, 2, 18-22. <http://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>
- Lillesand T. M., Kiefer R. W., Chipman J. W. 2008 *Remote sensing and image interpretation*. Hoboken, NJ, USA: Wiley.
- MAEP 2004 UPDR – Océan consultant, Actions du Ministère du Ministère, Filières de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche, , filière bovins à viande, Mise à jour : Juillet 2004
- MAEP 2005 Textes législatifs et réglementaire sur les secteurs domaniaux et foncier, Agriculture, élevage et pêche. République de Madagascar, Ministère de l'agriculture de l'élevage et de la pêche. Janvier 2005, 901 pages.

- Mc Feeters S. K. 1996 The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing* Vol. 17, Iss. 7, <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Oloukoi J., Mama V. J., Agbo F. B. 2006 Modélisation de la dynamique de l'occupation des terres dans le département des collines au Bénin. *Téledétection*, 6(4), 305-323.
- Pontius R. G. 2000 Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 66(8), 1011-1016
- Ranaivoarivelo N. 2002 Elevage bovin et exploitation d'un espace agropastoral dans le sud-ouest de Madagascar (région de Sakaraha). Thèse de doctorat en Géographie, Université Louis Pasteur de Strasbourg : 259p.
- Rasambainarivo J. H., Razafindratsita R., Rakotozandrindrainy R. 2004 Country Pasture / Forage Resource Profiles <http://www.fao.org/waicent/faoinfo/agricult/agp/agpc/doc/counprof/Madagascar/madagascarfr.htm>.
- Razafinarivo T.D., Rahetlah V.B., Rakotozandriny J.N., Salgado P., Degenne P. 2017 Development of a cartographic tool for the management of pastoral resources through a combined approach of remote sensing and modeling, *Livestock Research for Rural Development* 29 (11) 2017, <http://www.lrrd.org/lrrd29/11/raza29204.html>
- Roberge G. 1988 L'intensification fourragère et l'irrigation en milieu tropical sec, *Sénégalaise des Recherches Agricoles et Halieutiques - Vol. 1 - no1*
- Schowengerdt R.A. 2007 *Remote sensing: models and methods for image processing*. Oxford, UK: Elsevier/Academic Press
- Tucker C.J. 1979 Red and photographic-infrared 1/near combinations for monitoring vegetation *Remote Sens Environ* 8(2) 127-150

Chapitre 5

Développement d'un outil cartographique pour la gestion des ressources pastorales par une approche combinée de télédétection et de modélisation

Publication de l'article :

Publié dans le journal « *Livestock Research for Rural Development* »

T D Razafinarivo, V B Rahetlah, J N Rakotozandriny, P Salgado, P Degenne, 2017. Development of a cartographic tool for the management of pastoral resources through a combined approach of remote sensing and modeling, *Livestock Research for Rural Development* 29 (11) 2017, <http://www.lrrd.org/lrrd29/11/raza29204.html>

Publié en tant que communication orale durant les Doctoriales 2017

Razafinarivo Tsirinirina Donnah, Rahetlah Volatsara Baholy, Rakotozandriny Jean de Neupomuscène, Salgado Paulo, Degenne Pascal, 2017. Development of a cartographic tool for the management of pastoral resources through a combined approach of remote sensing and modeling, Les Doctoriales, Saovinandriana Nov 2017.

Publié en tant que communication affichée durant les Doctoriales 2017

Razafinarivo Tsirinirina Donnah, Rahetlah Volatsara Baholy, Rakotozandriny Jean de Neupomuscène, Salgado Paulo, Degenne Pascal, 2017. Développement d'un outil cartographique pour la gestion des ressources pastorales par une approche combinée de télédétection et de modélisation, Les Doctoriales, Saovinandriana Nov 2017.

Développement d'un outil cartographique pour la gestion des ressources pastorales par une approche combinée de télédétection et de modélisation

Razafinarivo T D¹, Rahetlah V B², Rakotozandriny J N², Salgado P³, Degenne P⁴

¹Centre national de recherche appliquée au développement rural, Département de Recherches Zootechniques, Vétérinaires et Piscicoles FOFIFA/DRZVP, BP1690, Antananarivo, Madagascar

²École Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Madagascar

³CIRAD, UMR SELMET, BP 319, Antsirabe 110, Madagascar

⁴CIRAD, UMR TETIS, 7 Chemin de l'IRAT, Ligne Paradis, 97410 Saint Pierre, Ile de la Réunion

Adresse : FOFIFA/DRZV BP1690, Antananarivo ; mail : razafinarivotsiry@gmail.com

Résumé

La croissance démographique et l'urbanisation engendrent une augmentation de la demande en produits d'origine animale alors que la disponibilité en ressources fourragères se réduit. Un système d'évaluation et de suivi pour estimer la quantité de biomasses fourragères disponibles est indispensable. Ainsi, une approche combinée de télédétection, modélisation et programmation informatique a été utilisée pour créer un tel outil cartographique. Pour cela, des mesures de données agronomiques sur le terrain sont couplées avec des données d'imagerie satellitaire pour élaborer des modèles de prédiction. Les modèles obtenus sont ensuite utilisés sur plusieurs images satellites archivées pour retracer le profil de disponibilité temporel des différentes espèces fourragères via la juxtaposition de 4 066 extraits d'indices de végétation (NDVI) obtenus à Madagascar. À chaque acquisition d'image satellite, les paramètres de l'équation du profil temporel sont modifiés, pour calculer de nouveaux rendements de biomasse, par l'assimilation dans les modèles de prédiction des données obtenues via l'imagerie satellite. L'état d'exploitation de la biomasse et la capacité de charge animale des différentes parcelles de

pâturages, prédits par les modèles, constituent des données d'aide à la décision pour une gestion optimale de l'usage des parcelles. Les modèles sont ensuite implémentés et intégrés à une interface cartographique et de pilotage à partir d'une page Web. Ainsi, il est possible de dessiner une parcelle sur fond d'image satellite, puis de calculer les différents indicateurs pour cette parcelle. À travers la même interface Web, ces modèles peuvent aussi être utilisés comme outils de prospective permettant d'estimer la production fourragère sur plusieurs semaines après la date d'acquisition de l'image satellite. Cet outil a été conçu pour aider les acteurs du développement rural de Madagascar à conseiller les éleveurs sur la façon optimale de gérer les ressources fourragères.

Mots-clés

Capacité de charge animale, Madagascar, NDVI, Pâturage, Programmation, Ruminant, Système d'Information Géographique.

Abstract

Population growth coupled with urbanization are generating determining changes into livestock development owing to the increasing demand of animal products whereas forage resources are becoming scarce. In this alarming context, a monitoring and evaluation system seems to be necessary to estimate above-ground forage biomass quantity. Therefore, a combined approach of remote sensing, modelization and computer programming is used to create a cartography tool for forage resources quantity estimation. This tool was developed based on ground agronomic measurements data coupled with satellite-images data to elaborate forage biomass quantity prediction models. These models were then applied to several archived satellites images to track temporal profile production of different forage species through juxtaposition of 4 066 vegetation index (NDVI) extracts. For each satellite image acquisition, temporal profile equation parameters were modified to calculate new biomass yields through assimilation of data obtained from satellite-image-prediction. Biomass exploitation status and animal carrying capacity of different pasture plots predicted by these models are helpful data in decision-making for optimal management of plots utilization. Models were thereafter implemented in a cartographing and piloting interface from a Web page. Therefore, it is possible to draw a plot on satellite image as background and to calculate different indicators for this plot. Through the same interface Web, these models can be utilized as a prospective tool for the estimation of

forage production over several weeks from satellite image acquisition date. This tool was conceived to assist rural development actors in counseling livestock farmers for optimal management of forage resources.

Key words

Geographic Information System, Madagascar, NDVI, Pasture, Programming, Ruminant, Stocking capacity.

Introduction

La croissance démographique et l'augmentation des revenus, ainsi que l'urbanisation, engendrent des changements déterminants sur le développement de l'élevage par ses multiples effets directs et indirects. L'analyse de ces changements a mis en exergue deux tendances antagonistes : d'une part, la demande en produits d'origine animale, en qualité et en quantité, a augmenté considérablement. D'autre part, les dynamiques d'occupation des territoires agropastoraux font que la disponibilité du foncier pour la production de fourrages et/ou autres aliments pour les animaux, ainsi que l'accessibilité à ces produits, deviennent des enjeux majeurs (Hailu 2015). En tant que pays en voie de développement, Madagascar n'échappe pas à ces deux tendances. Ainsi, la valorisation optimale des ressources herbagères pour l'alimentation des ruminants s'avère être la solution à prioriser. Qu'il s'agisse de prairies naturelles ou temporaires, l'herbe présente une alternative alimentaire économiquement intéressante du fait, d'une part, de son faible coût de production et, d'autre part, de ses faibles coûts d'utilisation notamment en pâturage. Cependant, divers processus doivent être maîtrisés pour éviter le risque d'indisponibilité des ressources herbagères. Il s'agit par exemple de déterminer le moment propice de mise à l'herbe des animaux ou encore la détermination de la capacité de charge optimale des différentes parcelles de pâturage. La non maîtrise de ces recommandations aura pour conséquence soit une baisse des performances animales par manque de ressources, soit la distribution de fourrages conservés ou d'aliments concentrés, plus coûteux. Par ailleurs, il existe aussi un risque de gaspillage de ressources fourragères si la production n'est pas utilisée au bon moment du cycle végétatif des plantes. Ainsi, la création d'un outil cartographique dynamique pour estimer la disponibilité des ressources fourragères à partir de données satellites pourrait contribuer à une meilleure gestion de ces ressources.

Des modèles statistiques permettant d'effectuer une projection de la production fourragère sur plusieurs semaines offrent la possibilité d'un raisonnement optimal sur l'utilisation des ressources. Le principe de l'outil consiste à faire une assimilation de données du rendement fourrager des différentes espèces calculées via les Indices de Végétation Normalisés (NDVI) dans un modèle de croissance d'herbe. À chaque acquisition d'image satellite, de nouveaux rendements sont calculés pour ajuster les paramètres du modèle prédictif. Ainsi, il sera possible de mieux gérer la mobilité des troupeaux suivant la disponibilité des ressources, dont la production et la répartition spatiale varient au cours de l'année.

Matériels et méthodes

Contexte général

L'élevage de ruminant occupe une place importante dans l'économie de Madagascar. Son développement est en liaison directe avec la richesse des pâturages qu'il exploite (Bossier 1969). Cependant, nous constatons que les surfaces dédiées à l'alimentation des ruminants diminuent considérablement. Ces diminutions sont causées principalement par le problème de concurrence dans l'utilisation de l'espace (Brondeau 2003), de l'absence de législation sur l'affectation des parcelles de pâturage, et de la dégradation des pâturages par les feux de brousse trop fréquents (Dubois 2004). Face à cette situation critique, des systèmes d'évaluation et de suivi à grande échelle s'avèrent indispensables. L'emploi de l'imagerie par télédétection semble adapté pour évaluer les conditions de végétation des parcours de troupeaux du fait de la large couverture fournie, de sa capacité à examiner des régions éloignées potentiellement inaccessibles, et de recevoir l'information à des fréquences temporelles plus élevées que celles de l'échantillonnage sur le terrain. Depuis les années 70, l'imagerie par télédétection a été employée pour évaluer les conditions de végétation des parcours. Par exemple, Rouse et al (1973) ont appliqué l'imagerie par balayage multi-spectral pour l'examen du verdissement et mis au point un indice de végétation corrélé à la biomasse végétale. Depuis ces premiers essais, plusieurs approches différentes ont été développées pour examiner les conditions des parcours et quantifier la biomasse disponible. Par ailleurs, l'élevage de zébus occupe une place importante dans la vie sociétale de la population rurale malgache, en lien avec ses multiples rôles et attributs (capital, épargne, symbole de richesse, etc.). Le pastoralisme (Figure 1) est l'un des principaux systèmes permettant aux éleveurs de subvenir aux besoins de leurs troupeaux (Köhler-Rollefson 2012). Ce système repose sur les quatre caractéristiques suivantes : (i) la mobilité, (ii) le pâturage extensif, (iii) l'utilisation de terres communes et (iv) l'utilisation de races locales (IIRR et CTA 2015). Généralement, les éleveurs sont contraints de parcourir de longues distances pour assouvir les besoins de leurs troupeaux. Ces déplacements peuvent être : (i) saisonniers, en fonction de la disponibilité des ressources qui varie selon les saisons, ou (ii) quotidiens, les éleveurs profitent de différents sites de pâturage disponibles. Par ailleurs, il y a aussi les déplacements vers les marchés de vente d'animaux vivants où les animaux arrivent souvent amaigris et sont vendus à bas prix. Les éleveurs tiennent compte de la disponibilité en herbe pour décider des endroits où déplacer leurs troupeaux. Pendant longtemps, les éleveurs sont

contraints d'évaluer et de mesurer la biomasse disponible par des mesures fastidieuses et onéreuses. Ainsi, la mise en place d'un outil d'évaluation plus facile à mettre en œuvre s'avère être très intéressante pour intensifier la production de bovins.



Figure 1 : Site de pâturage naturel (Moyen Ouest de Madagascar, mois d'avril)

Élaboration des modèles de disponibilité fourragère

Le noyau de l'outil de suivi dynamique est configuré à partir des Indices de Végétation Normalisés (NDVI ; Rouse et al 1974) des fourrages, calculés à partir des données acquises par satellite. SPOT (Satellites Pour l'Observation de la Terre) est un programme de télédétection mis en place en 1978 par la France, en collaboration avec la Belgique et la Suède. La constellation des satellites SPOT fournit des images optiques alliant haute résolution et large champ. Elle offre une capacité d'acquisition qui permet d'obtenir une image de n'importe quel point du globe, sur une couverture complète de la terre en 26 jours. Dans cette étude, une série temporelle d'images SPOT 5 corrélée à des données de terrain échantillonnées ont permis d'élaborer des modèles prédictifs du rendement à partir des valeurs de NDVI (Razafinarivo et al 2016). Le NDVI est un indice de végétation qui estime la densité foliaire, en matière verte (MV) et la capacité des plantes à absorber la lumière solaire pour la convertir en biomasse. Le calcul de cet indice est basé sur la propriété de réflectance du couvert végétal dans les spectres visibles rouge et proche infrarouge obtenues à partir des images satellites. Ainsi, à partir de ces

modèles prédictifs du rendement de la biomasse, et d'une image satellite, il sera possible de déterminer le rendement des espèces fourragères de différents sites sans nouvelle mesure sur le terrain (Rahetlah et al 2013).

Élaboration du profil temporel de biodisponibilité fourragère

La capacité de production de la biomasse fourragère, c'est-à-dire de la partie aérienne de la plante, dépend du développement successif de ses différents organes et de l'accumulation de la matière sèche dans chacun de ces organes (Tayeb 1995). Ces phénomènes sont liés à des éléments internes (ex : photosynthèse) et externes (ex: rayonnement solaire) à la plante, et qui interviennent conjointement à la fabrication de la matière sèche. Il est donc opportun d'avoir un outil de mesure ponctuelle de l'évolution de la productivité végétale sans pour autant considérer les antécédents de ces phénomènes qui vont définir la production actuelle. Cette évolution de la production fourragère peut être obtenue à partir de plusieurs mesures dans le temps et dans l'espace pour une espèce déterminée en calculant la moyenne et les tendances de celles-ci suivant les phénomènes intervenant. L'obtention de données via cette méthode est fastidieuse et nécessite plusieurs années de mesures sur le terrain.

Les images satellites disponibles actuellement permettent de mesurer l'évolution de l'activité végétale au cours des différentes saisons. Ainsi, plusieurs images satellites archivées lors des années précédentes (38 images) ont été utilisées pour reproduire l'évolution dans le temps de la production fourragère de différentes espèces. Pour ce faire, les modèles prédictifs du rendement à partir des valeurs de NDVI ont été utilisés sur ces images, pour extraire la production spatio-temporelle des différentes espèces fourragères. Cette pratique permet de retracer le profil temporel de disponibilité moyenne des différentes espèces fourragères durant les 365 jours de l'année. La même procédure a été utilisée sur l'évolution de la teneur en matière sèche (MS) à partir des modèles de prédiction de la teneur en MS des différentes espèces (Figure 2). Ainsi, à un moment donné, il est possible de déterminer à partir de ces courbes une approximation de la quantité moyenne de biomasses disponibles ainsi que le pourcentage en MS des différentes espèces fourragères.

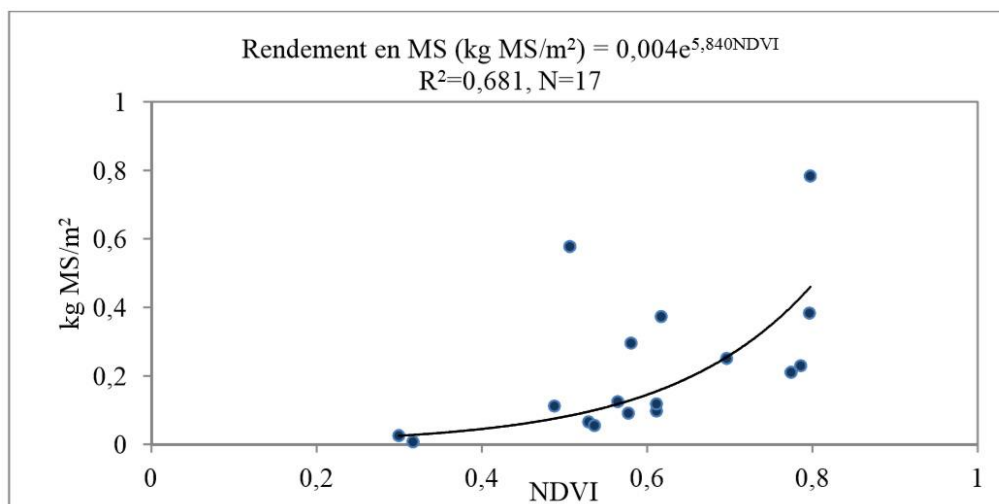


Figure 2 : Relation entre rendement en MS et NDVI pour *Pennisetum purpureum* (Andriarimalala, 2014)

Calcul de la capacité de charge animale

La capacité de charge animale est un indicateur important pour valoriser les parcelles de façon rationnelle. Il permet d'avoir une idée sur le nombre d'animaux, en unité bovin tropical (UBT) ou unité gros bétail (UGB), pouvant être alimentés par unité de surface (hectare) (Hervé et al 1989). L'UBT et l'UGB sont des variables créées à partir de coefficients permettant de comparer entre eux les différents animaux et de les additionner. L'UGB correspond à un animal dont les besoins en énergie sont de 3 000 UF telle une vache d'environ 600 kg de Poids Vif (PV) et qui peut ingérer jusqu'à 3,0 kg de MS par 100 kg PV. En zone tropicale, une UBT correspond à un bovin de 250 kg PV à l'entretien, consommant 2,5 kg de MS par 100 kg PV. Des coefficients de conversion ont été établis sur divers animaux domestiques herbivores de sorte qu'un bovin adulte, un cheval ou un chameau correspondent à l'UBT et qu'un ovin ou un caprin correspondent à 0,12 UBT (Boudet 1975). La capacité de charge d'une parcelle dépend de la production annuelle du fourrage (kg MS/ha), de la capacité d'ingestion du ruminant et de la durée d'exploitation du fourrage dans l'année. La production annuelle des différentes espèces fourragères est obtenue à partir de l'intégrale de la courbe du profil temporel de disponibilité fourragère entre les bornes 0 et 365 jours (Figure 3). Les modèles prédictifs du rendement obtenus à partir des valeurs de NDVI permettent d'avoir la production en MS par unité de surface (Figure 2). La notion de capacité de charge animale présente l'avantage de donner un ordre de grandeur du nombre d'animaux susceptibles d'être alimentés sur chaque parcelle, dans les limites raisonnables d'une exploitation ménageant à peu près les productions à venir.

Modélisation

Dans notre étude, l'utilisation de la modélisation a consisté à regrouper tous les paramètres précédents (production de MV et MS, profil temporel de disponibilité, capacité de charge animale, etc.), en un seul paramètre de sorte qu'à chaque fois qu'une donnée est entrée, des modifications sont produites dans les modèles de la base de données de l'outil pour ressortir les résultats du calcul. L'outil commence par utiliser les modèles prédictifs du rendement en MV et en MS à partir des valeurs de NDVI. Puis, le profil temporel de disponibilité fourragère (figure 3) génère aussi une autre valeur de référence de la quantité de MV et MS en fonction de la date de prédiction. Ensuite les données du rendement des différents fourrages obtenues à partir des valeurs de NDVI sont assimilées dans le profil de disponibilité temporel des différentes espèces fourragères. Ainsi, à chaque acquisition d'image satellite, de nouveaux rendements sont produits pour mettre à jour les paramètres du profil en tenant compte de l'écart mesuré suivant les modifications engendrées par les phénomènes intervenant dans la production de la biomasse.

Ce procédé permet d'estimer l'état et le mode d'exploitation de la parcelle en rapport avec le profil de référence de chaque espèce. Il permet aussi de faire une projection des productions fourragères des différentes espèces sur plusieurs semaines après la date d'acquisition de l'image satellite. Enfin, le nombre d'animaux pouvant être alimentés par les ressources disponibles dans chaque parcelle est estimé à partir de la production de MS prédite par les modèles et la capacité d'ingestion des animaux. Ainsi, il est possible de gérer la mobilité des troupeaux suivant la disponibilité des ressources, dont la répartition spatiale varie au cours de l'année. Cet exercice de modélisation a permis de formaliser les connaissances acquises sous forme d'équations. Les modèles sont ensuite implémentés à l'aide d'un langage de programmation informatique, ce qui permet de faciliter l'usage de ces connaissances.

Une interface cartographique et de pilotage du modèle à partir d'une page Web a été réalisée. Il est à présent possible de dessiner une parcelle sur fond d'image satellite, puis de faire calculer les différents indicateurs pour cette parcelle (estimation de production fourragère, capacité de charge, etc.). Techniquement, l'ensemble a été programmé en langage Javascript qui est un langage permettant de réaliser des applications intégrées à des pages Web. Les bibliothèques de fonction Bootstrap et Leaflet ont été utilisées respectivement pour les parties saisies des paramètres et pour la cartographie interactive. Cette architecture logicielle permet deux modes

d'usage du modèle : (i) simulations en local, c'est-à-dire sur un ordinateur personnel sans connexion à l'internet ni serveur Web et (ii) simulations en ligne, le logiciel étant alors résident sur un serveur Web et accessible à travers une connexion Internet. Le but de cette programmation est d'avoir une représentation graphique spatio-temporelle des différentes zones de pâturage dans un espace déterminé. Une mise à jour de la carte est effectuée à chaque fois qu'une nouvelle valeur de NDVI est introduite.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Profil de disponibilité temporel de la biomasse fourragère

Pour les systèmes d'élevage spatialement extensifs, les données de télédétection sont très intéressantes, principalement pour les parcours avec faible accessibilité. Cependant, des données-clés de terrain sur les ressources fourragères sont nécessaires pour la calibration et la validation des modèles et de l'outil. Les analyses ont porté principalement sur les valeurs minimales et maximales des indices de végétation NDVI des différentes espèces fourragères durant les différentes saisons de l'année. Ces données NDVI ont été extraites de plusieurs images satellites archivées depuis les six dernières années. Elles se rapportent à des parcelles de pâturage naturel permanent dans plusieurs sites de la zone d'étude. En somme, 4 066 indices de végétation ont été extraits sur 38 images satellites et 107 parcelles de pâturage. Ces indices ont permis de retracer les courbes de disponibilité temporelle de 7 espèces de fourrages les plus courantes à Madagascar (Figure 3). Plusieurs variations de la valeur de NDVI ont été enregistrées pour une même espèce fourragère à une même date. Ceci est probablement dû aux différents facteurs qui affectent la valeur de NDVI comme les variations de la réflectance mesurées au niveau d'un capteur satellitaire qui sont liées aux propriétés optiques des feuilles (Girard et al 1999), ou la structure de la végétation et le taux de recouvrement du sol selon les stades phénologiques (Bramley et al 2011). Lorsque la végétation est peu couvrante, la réponse spectrale des plantes est affectée par la réflectance des sols. Le signal mesuré par le capteur intègre généralement les réflectances du sol et de la végétation. D'autres hypothèses sont également signalées comme les effets des variations pédoclimatiques dans les différents sites, ou aussi les effets du pâturage des parcelles avant ou après la prise des images qui ont un impact sur la réflectance du couvert. Quoi qu'il en soit, les indices de végétation, insérés au fil du temps, couplés/corrélés à la production de biomasse fourragère, forment une courbe d'une allure sigmoïde, dont la dynamique dépend des conditions du milieu (température, rayonnement, alimentation hydrique et nutrition minérale) et dont l'allure est caractéristique de l'espèce. La

courbe de croissance est caractérisée par l'enchaînement de trois phases de développement pour chaque cycle de végétation : une croissance initiale exponentielle pendant la constitution de l'appareil foliaire ; une courte phase intermédiaire linéaire pendant laquelle l'élongation des organes est maximale ; une phase finale de ralentissement jusqu'à la biomasse maximale correspondant à l'accumulation de la matière sèche et une diminution considérable de matière verte. La vitesse de croissance maximale varie peu pour une région donnée, quels que soient la famille et le type morphologique (Klein 2014). Ainsi, les paramètres de l'équation de ces courbes sont modifiés suivant les valeurs de réflectance du couvert (NDVI). De nouveaux rendements sont prédits par le modèle en gardant toujours la même allure, suivant les nouvelles valeurs de MV et de MS à l'instant de la prédiction. Par projection, ce modèle permet d'avoir une approximation de la production fourragère sur une période de plusieurs semaines après la date d'acquisition de l'image satellite. Cette approche se sert des rendements modélisés sur des dates écoulées et coïncidant avec les conditions historiques du milieu simultanément à des estimations actuelles afin de prédire la biomasse fourragère future (Alhamad et al 2007).

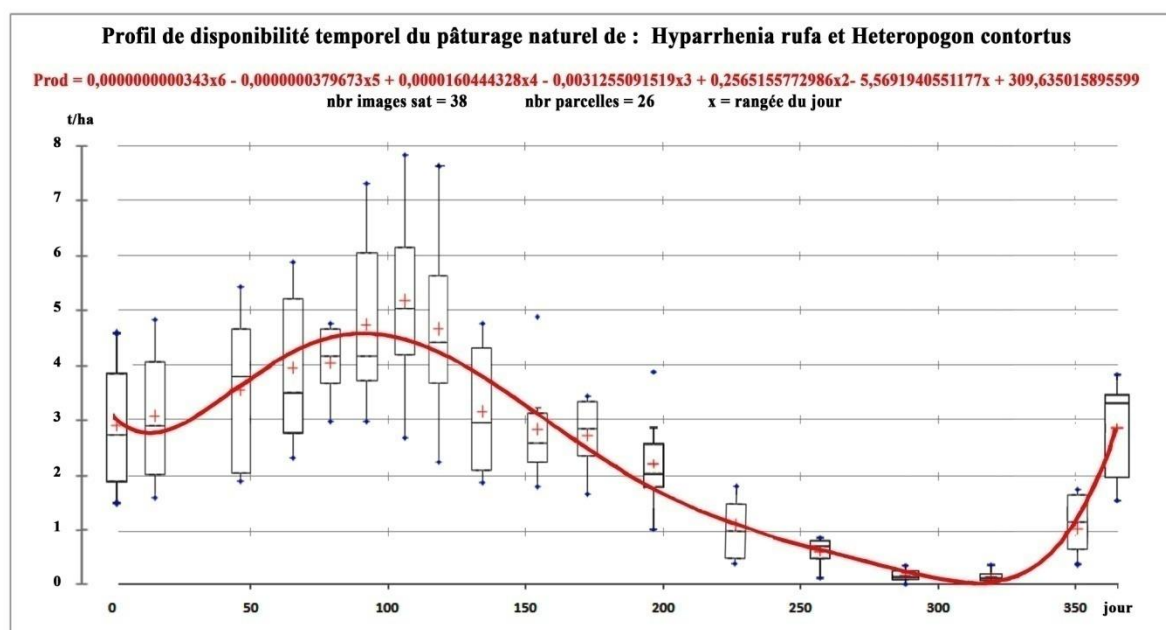


Figure 3 : Profil de disponibilité temporel de la biomasse fourragère de 2 fourrages (entre le 01 Janvier et le 31 Décembre) Bongolava, Madagascar

Indicateurs colorés pour une décision optimale des exploitants

Lors de l'étape de calcul des prédictions de la production fourragère des parcelles d'une même espèce sur une image satellite, nous avons constaté que la majorité des valeurs du rendement des parcelles isolées (sous-exploitées) est regroupée au-dessus du 3^{ème} quartile de la boîte à

moustache, contrairement à celles qui sont sur les bords des routes (surexploitées) qui sont plutôt regroupées en dessous du 1^{er} quartile (Figure 3). Ce constat nous a permis d'élaborer des seuils pour définir l'état d'exploitation d'une parcelle après chaque prédiction. Par conséquent, à chaque prédiction du rendement supérieure au 3^{ème} quartile de la boîte à moustache sur un point déterminé de la courbe, l'outil annonce une sous-exploitation de la parcelle. Cela désigne une faible pression animale qui pourrait conduire à un gaspillage des ressources fourragères sans aucune intervention des éleveurs. Cette faible pression est représentée par la coloration verte affichée à chaque délimitation de parcelle dans l'outil.

À l'inverse de cet événement, une prédiction du rendement inférieure au 1^{er} quartile signifie un surpâturage de la parcelle. Par conséquent, des décisions doivent être prises par les éleveurs sur un arrêt immédiat de l'exploitation de la parcelle. Ces parcelles seront colorées automatiquement en rouge par l'outil. Entre ces deux couleurs se trouvent les parcelles colorées en orange. Elles représentent les parcelles ayant des rendements prédits aux alentours de la courbe de référence. Cela indique qu'il y a assez de biomasses pour alimenter le cheptel.

Dans la pratique, les éleveurs doivent laisser un temps de repos aux parcelles qui sont colorées en rouge, pour envoyer les animaux vers les parcelles colorées en vert. Ces indicateurs colorés (Figure 5) peuvent aussi être utilisés comme une « fenêtre de pâturage » (Delagarde 2009) par les utilisateurs de l'outil. Les limites quantitatives maximales et minimales à une période donnée correspondent à des quantités d'herbe au-dessus et en-dessous de laquelle il n'est pas conseillé de pâturer la prairie pour assurer une production animale individuelle satisfaisante. En effet, un excès d'herbe par rapport aux besoins du cheptel entraîne une dégradation de sa valeur alimentaire par vieillissement, alors qu'un manque d'herbe conduit par contre à une chute de la production et une dégradation de la prairie par surpâturage (Grignard et al 2015). Cet outil peut aider les exploitants à définir l'instant propice de mise à l'herbe des animaux. Une mise à l'herbe trop précoce peut compromettre le développement futur du pâturage, tandis qu'une mise à l'herbe tardive conduira à un gaspillage de ce dernier. La hauteur de l'herbe à la sortie des animaux va conditionner la repousse (Lefèvre 2010). Une hauteur résiduelle limitée après pâturage conduit à réduire les pertes par sénescence. La durée entre deux passages sur la même parcelle constitue un des ajustements possibles du système fourrager (Pousset 2009). Par conséquent, la qualité de l'herbe offerte à l'animal dépend de ces deux paramètres.

Capacité de charge animale pour un ajustement de l'offre à la demande fourragère

Les systèmes d'exploitation des parcelles fourragères ou des parcours sont liés à la notion de charge animale qui traduit la relation entre le nombre d'animaux et le pâturage disponible. Le taux de charge se résume par le nombre d'unités animales par unité de surface. Il dépend à la fois de la quantité d'herbe disponible, de sa vitesse de croissance, et de la quantité d'herbe volontairement ingérée par l'animal. Cette quantité est déterminée à partir de modèles de prédiction de la MS, qui est spécifique pour chaque espèce fourragère. Le taux d'utilisation du pâturage (Boudet 1975) représente le pourcentage de fourrage disponible après avoir soustrait les pertes dues à divers facteurs comme les insectes ravageurs et le piétinement des animaux. Ce taux d'utilisation est saisi par l'utilisateur de l'outil avec la valeur moyenne de NDVI et la date d'acquisition de l'image satellite (figure 4). À chaque acquisition d'image, la capacité de charge optimale des parcelles est estimée de sorte que les exploitants puissent ajuster le nombre d'animaux sur les différents sites de pâturage après la prédiction pour optimiser la production.

Quand l'offre fourragère n'est pas assez abondante, ou que la charge animale est trop élevée, la consommation par tête diminue et devient inférieure à la capacité d'ingestion. Dans ces conditions, le gain de poids individuel diminue fortement et la végétation risque de se dégrader. À l'inverse, une sous-exploitation de la parcelle provoque un gaspillage et une accumulation des refus conduisant à l'embroussaillage. L'ajustement de l'offre à la demande passe par des décisions d'ajout ou de retrait des animaux de la parcelle de pâturage, lorsque les seuils de déséquilibre au niveau parcellaire sont atteints. Cela permet d'éviter de se retrouver en situation d'excès ou de pénurie d'herbe.

Sous un autre angle de vision, ces données sur les charges animales peuvent aboutir à la notion de trésorerie fourragère (Bourgeois et Krychowski 1981). Comme dans les flux monétaires, le suivi et la comptabilisation des besoins et des dépenses en termes fourragers dans le temps permettent d'établir à tout moment la situation de trésorerie. Ainsi, les besoins fourragers en termes de MS d'une région peuvent être estimés par rapport à la demande pour ensuite établir la différence et déterminer la quantité à importer ou à exporter selon le cas. D'autant plus qu'actuellement, la fréquence d'acquisition d'images satellites est de plus en plus courte, comme le couple Sentinel 2A et 2B qui permet d'obtenir des images tous les cinq jours. Ainsi, ces acquisitions vont permettre d'effectuer des mises à jour régulières de résultats de l'outil pour une exploitation plus précise des données. Enfin, les bonnes pratiques d'exploitation du pâturage conduisent à la durabilité du système ; l'évolution et la durée de vie de la prairie dépendent beaucoup du taux de charge animale, de la stabilité des chargements en adéquation à la pression réelle selon les saisons et les pratiques (Duru et al 1994).

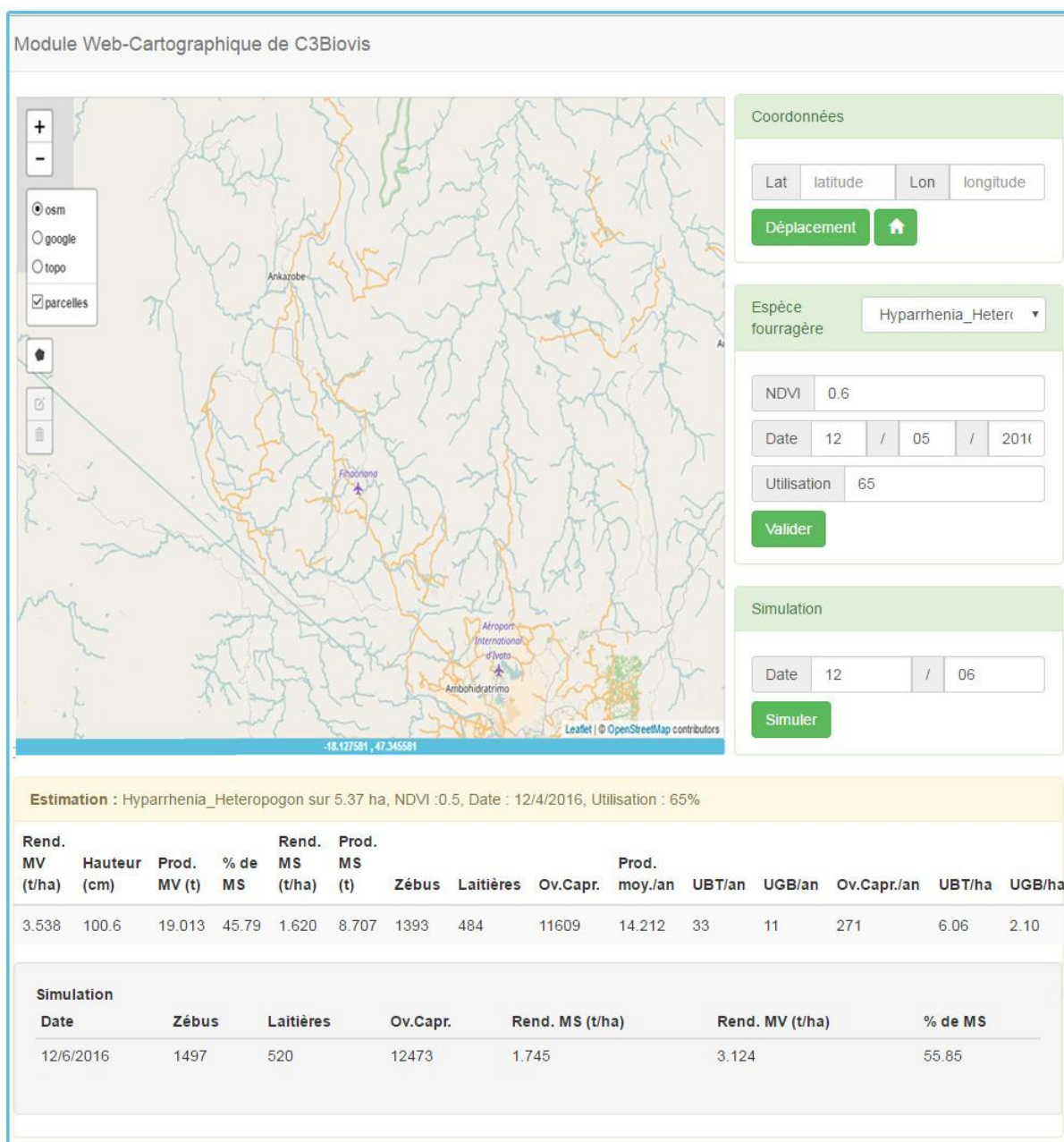


Figure 4 :Interface de l'outil de cartographie

Cartographie automatique de la biodisponibilité fourragère

Cet outil a été développé pour saisir des données issues d'acquisitions satellitaires et produire des cartes de la disponibilité de ressources fourragères pour le bétail. Il permet de numériser des parcelles de pâturage géo-localisées sur trois fonds de cartes prédéfinis au choix (Open Street Map, Google Earth, ou Topographique), tout en générant les métadonnées sur la productivité et la charge animale que celles-ci peuvent supporter. Les données sur l'état

d'exploitation des sites de pâturages sont traduites automatiquement en indicateur coloré (vert, orange, rouge) pour faciliter la lecture. En somme, cet outil représente une structure de données reconstituées pour rendre compte des phénomènes localisés dans le temps et dans l'espace pour faciliter la prise de décision.

Dans les systèmes spatialement extensifs, il s'avère utile de dresser des cartes de bilan en aliments pour animaux, comme cela a été effectué dans de nombreux pays (Fillol et al 2008). De telles cartes (Figure 5) identifient les sites où les aliments pour animaux sont, soit en déficit, soit en surplus, ce qui peut être résolu par les déplacements du bétail. Ainsi, des cartes de la distribution du bétail pourraient être dressées sur la base des informations sur l'emplacement des pastoralismes, ou des données démographiques de la région. La carte des besoins est alors comparée avec une carte de disponibilité en aliments pour animaux, pour en dresser une carte de surplus ou de déficit, qui s'avère une connaissance utile pour la planification des itinéraires de parcours.

À plus large échelle, ces cartes de distribution du bétail peuvent être utilisées simultanément sur plusieurs régions afin d'évaluer la répartition spatiale des besoins alimentaires du bétail en relation avec la demande. Ces pratiques pourraient être utilisées pour définir les zones importatrices de fourrage, mais aussi de classer les activités selon la disponibilité fourragère (embouche, naisseur, laitière, etc.). Pour finir, cet outil permet d'apporter des conseils à distance aux exploitants sur la gestion et/ou la mobilité de leurs troupeaux par rapport à la disponibilité des ressources (itinéraire des parcours, charge animale, etc.). Des cartes de disponibilité temporelle des ressources fourragères dans les zones clés de l'élevage peuvent être imprimées et distribuées régulièrement suivant les acquisitions des images satellites.

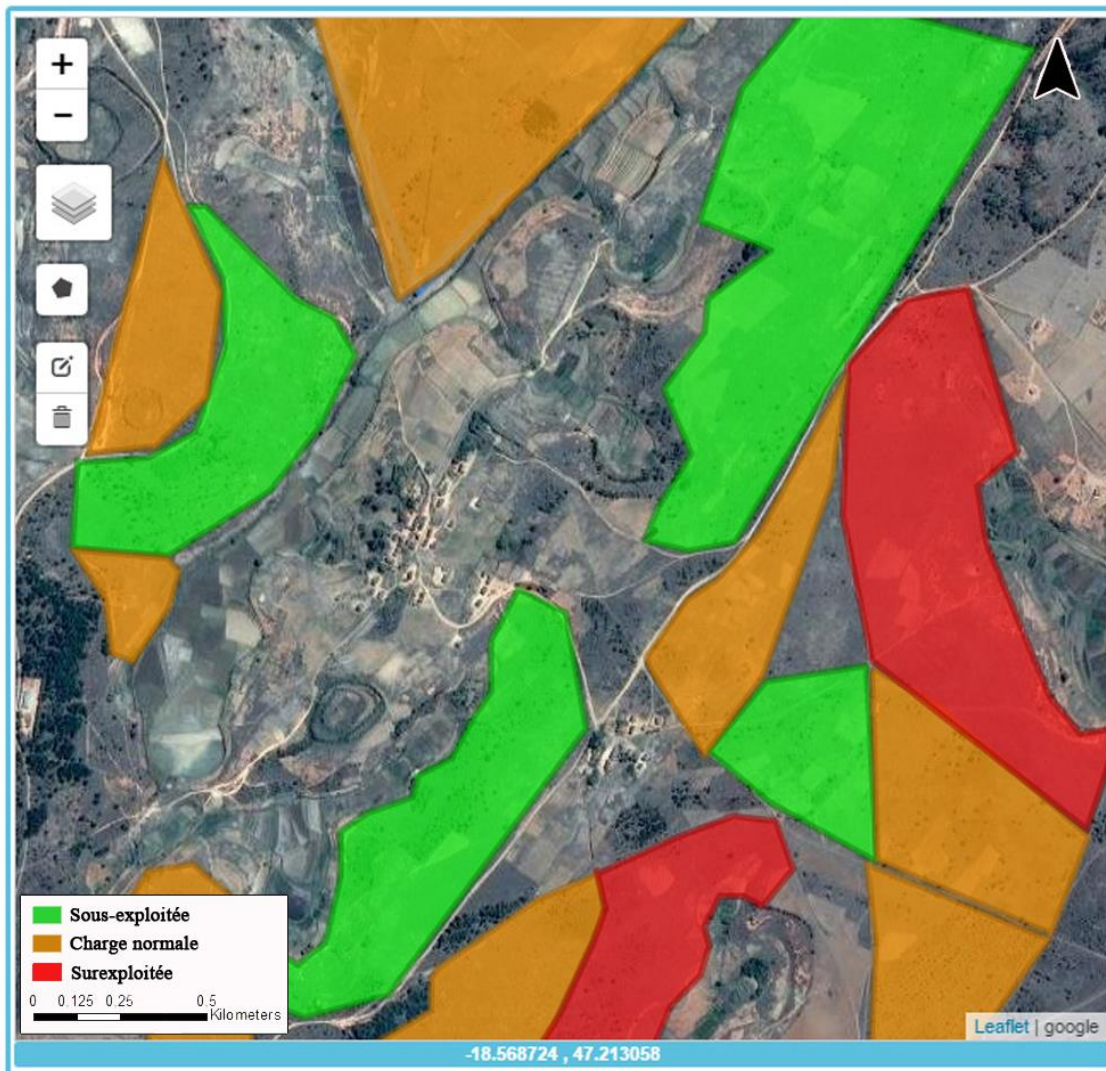


Figure 5 : Modèle de cartographie de la biodisponibilité des ressources fourragères

Conclusion

Les résultats de cette étude montrent qu'il est nécessaire de renouveler les approches pour estimer la quantité de biomasse des fourrages disponible ainsi que la capacité de charge animale des zones de parcours à Madagascar. Une modélisation couplée de programmation informatique a permis d'élaborer un outil cartographique de la disponibilité de ressources fourragères à partir des données de télédétection. Ces cartes permettent de faire des estimations de stocks de MS par type de végétation, par parcelle de pâturage ou pour l'ensemble d'une zone déterminée. Cet outil représente une innovation technologique au service du développement rural. Il permet un ajustement du nombre d'animaux sur les différents sites de pâturage suivant les résultats de prédiction obtenus à partir de la moyenne des valeurs NDVI des sites à étudier. Cet outil de cartographie peut être généralisé à d'autres pays, il est disponible sur <http://biova-project.org/c>

[3biovis/](#). Des perspectives sont envisagées comme la création et la diffusion mensuelle de cartes de la disponibilité des ressources fourragères dans les zones clés de l'élevage de ruminants à Madagascar. Actuellement, l'indice de végétation moyen de la parcelle est saisi par l'utilisateur, mais il est aussi envisagé de le calculer automatiquement à partir de serveurs de traitement d'images satellites disponibles à distance, afin d'obtenir les valeurs de NDVI les plus récentes possibles de la zone à étudier.

Remerciements

Nous tenons à remercier le projet BIOVA aux appuis techniques et financiers pour la réalisation de cet article.

Références bibliographiques

Alhamad M N, Stuth J, Vannucci M 2007 Biophysical modelling and NDVI time series to project near-term forage supply: spectral analysis aided by wavelet denoising and ARIMA modelling. *Int. J. Remote Sens*, 28: 2513–2548.

Boudet G 1975 Problèmes posés par l'estimation de la capacité de charge d'un "Pâturage naturel" tropical. CIPEA, ILCA, Addis Abeba, Inventaire et Cartographie des pâturages tropicaux africains. Actes du Colloque de Bamako, Mali (3 - 8 mars 1975), Institut d'Élevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux.

Bourgeois A, Krychowski T 1981 L'adaptabilité des exploitations laitières : essai d'appréciation de certaines de ses composantes, à partir de 12 cas de Maine-et-Loire" (pour le chapitre consacré à la trésorerie fourragère). *Fourrages*, 88, 1-37.

Bosser J 1969 Graminées des pâturages et de cultures à Madagascar. *Mémoires Orstom n°35* : 440 p.

Bramley R G V, Le Moigne M, Evain S, Ouzman J, Florin L, Fadaili E M, Hinze C J et Cerovic Z G 2011 Spatial variation in response to 'reduced input' spray programs for powdery mildew and botrytis identified through whole-of-block experimentation, *Australian Journal of Grape and Wine Research*. 17, 316-326.

Brondeau F 2003 La gestion des ressources agro-sylvo-pastorales face au développement des périmètres irrigués de l'Office du Niger. Organisation spatiale et gestion des ressources et des territoires ruraux. Actes du colloque, Montpellier, 8 p.

Delagarde R 2009 Outils et indicateurs pour calculer et concilier ingestion des vaches laitières et valorisation de l'herbe au pâturage. INRA, Agrocampus Ouest, UMR1080, Production du Lait, F-35590 Saint-Gilles ; remy.delagarde@rennes.inra.fr,

Dubois C 2004 Gestion des ressources pastorales et pratiques d'alimentation des bovins dans les bassins versants d'Imamba-Ivakaka (Lac Alaotra, Madagascar). Université Claude-Bernard, Ecole Nationale Vétérinaire de Lyon, Thèse n° 143, 116 p.

Duru M, Bellon S, Chatelin M, Fiorelli J 1994 Propositions pour l'aide à la gestion des ressources fourragères: une approche système articulant enquête, expérimentation et

simulation. In Recherches-système en agriculture et développement rural, Symposium international, Montpellier, France, Cirad-Sar, p. 104-109.

Fillol E, Metais T, Gomez A 2008 Using remote sensing to estimate the quantity of biomass in the Mali-Niger Sahel region to assist in the management of pastoral activities. Action Contre la Faim – Internal report. p. 89 - 121.

Girard M, Girard C 1999 Traitement des données de télédétection. Paris: Dunod. 97p.

Grignard A, Stilmant D, Kohnen H 2015 Gestion intensive du pâturage. Département Agriculture et Milieu naturel ; Unité Systèmes agraires, Territoire et Technologies de l'information ; Centre wallon de Recherches agronomiques – Lycée Technique Agricole d'Ettelbruck, Luxembourg.

Hailu M 2015 Nourrir le bétail en Afrique, Indispensable fourrage. Le magazine du développement agricole et rural des pays ACP, Spore n°174.

Hervé D, Genin D 1989 Capacité de charge animale ou indicateur de pression sur des ressources fourragères. Les Cahiers de la Recherche Développement, p.38 -49.

IIRR et CTA 2015 Des troupeaux en mouvement vers des marchés en mouvement : Créer des marchés profitables pour les éleveurs africains. Institut international pour la reconstruction rurale, Nairobi, et le Centre technique de coopération agricole et rurale, Wageningen, Pays-Bas. 208p. <http://publication.cta.int./fr/>

Klein H D, Rippstein G, Huguenin J, Guerin H, Toutain B, Louppe D 2014 Les cultures fourragères. Versailles, Editions Quae. Agricultures tropicales en poche, 264p.

Köhler-Rollefson I 2012 Policy brief: Capitalizing on pastoralism to feed people and achieve livestock sector sustainability. IIED,5 p. <http://tinyurl.com/nqmkhln>.

Lefèvre C, Favre E, Chanel M 2010. Cahier technique de l'agriculture durable : Optimiser le temps de repousse. Bulletin technique, Réseau GAB/FRAB, 7 p.

Pousset J2009 Le pâturage "tournant" importation, conception et conduite. Document Biodoc n°21. Edition juin 2009. 12 p.

Rahetlah V B, Salgado P, Andrianarisoa B, Tillard E, Razafindrazaka H, Le Mézo L, Ramalanjaona V L 2013 Relationship between normalized difference vegetation index (NDVI)

and forage biomass yield in the Vakinankaratra region, Madagascar. *Livestock research for rural development* 26 (5) n°95.

Razafinarivo T D, Salgado P, Rahetlah V B, Rakotozandriny J N, Rakotomanana O R, Artus H, Le Mezo L 2016 Gestion de pâturages par utilisation combinée d'un modèle de prédiction du rendement fourrager et de la télédétection : cas de la station Kianjasoa. Communication orale : *Bulletin de l'Akademia Malagasy*, XCVI/1 2016, 145 p.

Rouse J, Hass R, Deering W 1974 Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA, nd, p. 309-317.

Tayeb A H 1995 Bases physiologiques de l'élaboration du rendement. Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc, 24 p.

Chapitre 6

Discussion et conclusion générale

À Madagascar, les besoins en viande de la population sont principalement couverts par la viande des zébus (Rakotondravao, 2009). Ces zébus sont élevés sur des systèmes spatialement extensifs, caractérisés par un déplacement continu des animaux sur des surfaces constituées de ressources naturelles spontanées. Par conséquent, des techniques de suivi et d'évaluation de la biomasse fourragère ont été élaborées afin d'aider les acteurs pour les prises de décision concernant la gestion de ces ressources. L'utilisation des données de télédétection particulièrement pour la détermination de la production en biomasse s'est révélée la seule approche faisable dans ce genre d'étude (FAO, 2014). Étant donné que l'indice NDVI est fortement corrélé avec la densité du couvert végétal (Rouse *et al.*, 1973), des modèles de prédiction du rendement à partir de régression statistiques ont été effectués (Razafinarivo *et al.*, 2016). Les modèles de prédiction ainsi que les coefficients de détermination de ces régressions sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Modèles prédictifs du rendement en matière verte des différentes espèces fourragères

Nom de l'espèce	n	Modèle pour le rendement en Matière Verte	R ²
<i>Brachiaria brizantha</i>	169	Rendement = $-4603,53e^{-0,29NDVI} + 4565,65$	0,64
<i>Hyparrhenia / Heteropogon</i>	70	Rendement = $-3119,1e^{-0,2NDVI} + 3201,76$	0,59
<i>Eleusine indica</i>	30	Rendement = $-23667,18e^{-0,22NDVI} + 22173,66$	0,89
<i>Cynodon dactylon</i>	48	Rendement = $-23070,21e^{-0,12NDVI} + 22506,82$	0,79
<i>Aristida multicaulis</i>	12	Rendement = $-187774,42e^{-19,75NDVI} + 641,31$	0,67
<i>Stylosanthes CIAT 184</i>	20	Rendement = $-4747,71e^{-0,48NDVI} + 4199,48$	0,62
<i>Brachiaria ruziziensis</i>	30	Rendement = $-7066,37e^{-0,3NDVI} + 6566,83$	0,82
<i>Lolium multiflorum</i> ¹	15	Rendement = $60,62NDVI - 24,63$	0,68
<i>Pennisetum purpureum</i> ^{1,2}	17	Rendement = $0,034e^{5,418NDVI}$	0,73
<i>Chloris gayana</i> ²	17	Rendement = $0,045e^{5,011NDVI}$	0,71

Dans ce genre d'étude, il est souvent difficile d'avoir des coefficients de corrélation élevés (Di Bella, 2002). Plusieurs hypothèses ont été avancées pour justifier ces faibles coefficients comme le jaunissement causé par les carences constatées sur les feuilles des différentes plantes. La carence des feuilles a un effet direct sur les valeurs de NDVI en modifiant le niveau de réflectance dans le rouge visible. Girard *et al.* (1999) affirment que le comportement spectral des végétaux est lié à leur composition en pigments, en particulier la

¹Rahetlah, 2014 (Relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and forage biomass yield in the Vakinankaratra region, Madagascar)

²Andriamanlala, 2014 (Etude floristique de *Brachiaria* sp., *Chloris* *Pennisetum purpureum* et élaboration d'un modèle d'estimation de leur productivité télédétection)

chlorophylle. De plus, la carence en éléments fertilisants ou hydriques perturbe la croissance et le développement des cultures. D'autres paramètres peuvent également avoir un effet sur les coefficients de détermination des modèles, comme l'hétérogénéité des parcelles. En tant que pâturage naturel, la majorité des parcelles de calibration sont envahies par d'autres espèces de plantes qui vont influencer l'estimation du rendement par la télédétection. De plus, il faut aussi souligner que les indices de végétation calculés à partir d'images satellites sont sensibles aux autres facteurs non liés à la végétation. Mougenot *et al.* (2001) ont observé que le sol sous-jacent des couverts végétaux a une influence sur la régression établie entre les indices de végétation et le rendement sur le terrain. Enfin, l'établissement d'une relation empirique fiable entre indices de végétation et les données agronomiques exige également un réseau d'échantillonnage très dense dans le temps et dans l'espace (Bégué, 2002).

Une augmentation du rendement en vert entraîne un accroissement du rendement en MS et de la hauteur du couvert végétale. Ainsi, des corrélations ont été effectuées entre la teneur en MS (Cayrol *et al.*, 2000), la hauteur (Andriamanalala, 2014) et ces indicateurs normalisés.

Tableau 3 : Coefficients de détermination

R ² (NDVI/Paramètres agronomiques)	N	Matière verte	Matière sèche	Hauteur
<i>Brachiaria brizantha</i>	169	0,64	0,52	0,42
<i>Hyparrhenia / Heteropogon</i>	70	0,59	0,79	0,30
<i>Eleusine indica</i>	30	0,89	0,79	0,55
<i>Cynodon dactylon</i>	48	0,79	0,73	0,63
<i>Aristida multicaulis</i>	12	0,67	0,47	0,40
<i>Stylosanthes CIAT 184</i>	20	0,62	0,43	0,32
<i>Brachiaria ruziziensis</i>	30	0,82	0,73	0,61
<i>Lolium multiflorum</i> ³	15	0,68	0,52	0,61
<i>Pennisetum purpureum</i> ^{3,4}	17	0,73	0,68	0,66
<i>Chloris gayana</i> ⁴	17	0,71	0,59	0,68

Cependant, les coefficients de détermination des régressions entre l'indice de végétation et la teneur en MS sont moins performants que celles de la matière verte (MV). De même pour la hauteur qui est moins représentée par la valeur de NDVI. Cette faible valeur du coefficient

³ Rahetlah, 2014 (Relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and forage biomass yield in the Vakinankaratra region, Madagascar)

⁴Andriamanalala, 2014 (Etude floristique de *Brachiaria* sp., *Chloris Pennisetum purpureum* et élaboration d'un modèle d'estimation de leur productivité télédétection)

de détermination de la régression entre la hauteur et le NDVI est probablement due aux taux de recouvrement du sol qui n'affecte en rien la hauteur, contrairement à la valeur de NDVI (Bramley *et al.*, 2011). De plus, la hauteur de la biomasse n'a aucun effet sur la variation de la réflexion dans la plage proche infrarouge (PIR). Ces relations globales développées entre les indices de végétation et les paramètres agronomiques (Tableau 3) peuvent être utilisées pour exploiter les images satellites afin de produire des cartes de la disponibilité de la biomasse fourragère (Figure 4).

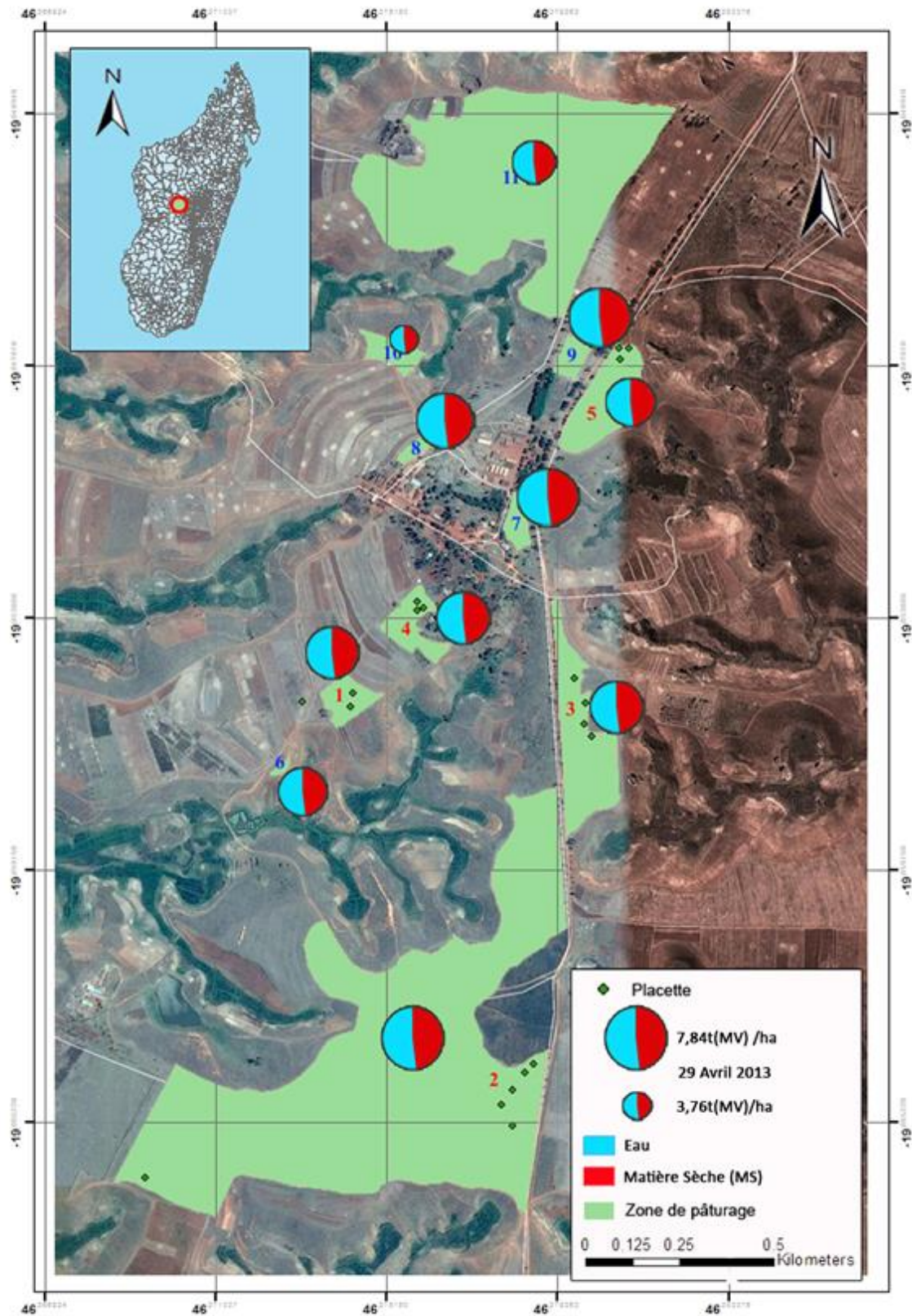


Figure 4 : Carte de biodisponibilité du *Brachiaria brizantha* dans la station de Kianjasoa (Madagascar)

Une fois que la quantité de la biomasse fourragère est déterminée à travers les modèles de prédiction, cette quantité devra alors être traduite en effectifs d'animaux qu'elle pourra supporter. Le taux de charge (ou capacité de charge) peut être défini comme le nombre d'animaux pouvant être réparti sur une surface de terrain donnée pour une période spécifique. La capacité à paître ou la capacité de charge peut être définie comme le taux de charge maximal pour une surface donnée, utilisée année après année, sans endommager la végétation ni les ressources associées (sol, qualité de l'eau, etc.) (Holechek *et al.*, 2001). En utilisant les informations sur la biomasse fourragère disponible, les caractéristiques animales au pâturage, il est désormais possible de calculer un taux de charge pour un type d'animal donné (bovin, ovin, caprin). D'un point de vue sécurité alimentaire, l'utilisation de ces cartes (Figure 4) inclut le contrôle du déplacement des animaux en relation avec la disponibilité fourragère durant la saison de croissance des plantes. Il permet ainsi de gérer au mieux le pâturage ou le système fourrager, dont la prise de décision sur la date d'utilisation de chaque parcelle pour une utilisation optimale des ressources. Cette carte permet aussi le contrôle de la charge animale, d'une année sur l'autre, à travers la zone d'étude. La répartition de la capacité de charge sur chaque site permet aussi d'ajuster l'offre fourragère en fonction des besoins des animaux. Certaines parcelles seront mis en défens temporaires (parcelle n° 10, Figure 4) par la pratique de pâturage tournant afin de mieux valoriser les repousses végétales. D'autres parcelles seront mis en défens pendant toute la saison des pluies pour reporter la production fourragère de la période excédentaire (saison pluvieuse) à la période déficitaire (saison sèche), sous forme de réserves (foin, ensilage, report sur pied) (Klein *et al.*, 2014).

Sur cette cartographie, il est également à remarquer qu'à la même date (29 avril 2013) et pour une même espèce fourragère (*Brachiaria brizantha*), il y a une grande variabilité de la production des différentes parcelles de pâturage de 3,76 t de MV/ha à 7,84 t de MV/ha. Les parcelles n° 9 et n°10 illustrent bien cet exemple, car ces deux parcelles ont à peu près les mêmes tailles, alors que les rendements sont totalement différents. Ces rendements sont respectivement 7,78 t de MV/ha et 3,76 t de MV/ha. Cette grande variabilité est due aux différences de mode d'exploitation de ces deux parcelles. La parcelle n° 10 est surexploitée ce qui fait sa faible productivité contrairement à la parcelle n°9 qui est sous-exploitée. Le profil de la disponibilité temporelle (Figure 5) de cette espèce fourragère peut très bien représenter cette différence d'état d'exploitation (Razafinarivo *et al.*, 2017). Ainsi, ce profil permet de définir un seuil sur l'exploitation normale de cette espèce. En dehors de ce seuil, la parcelle est soit sous-exploitée soit surexploitée.

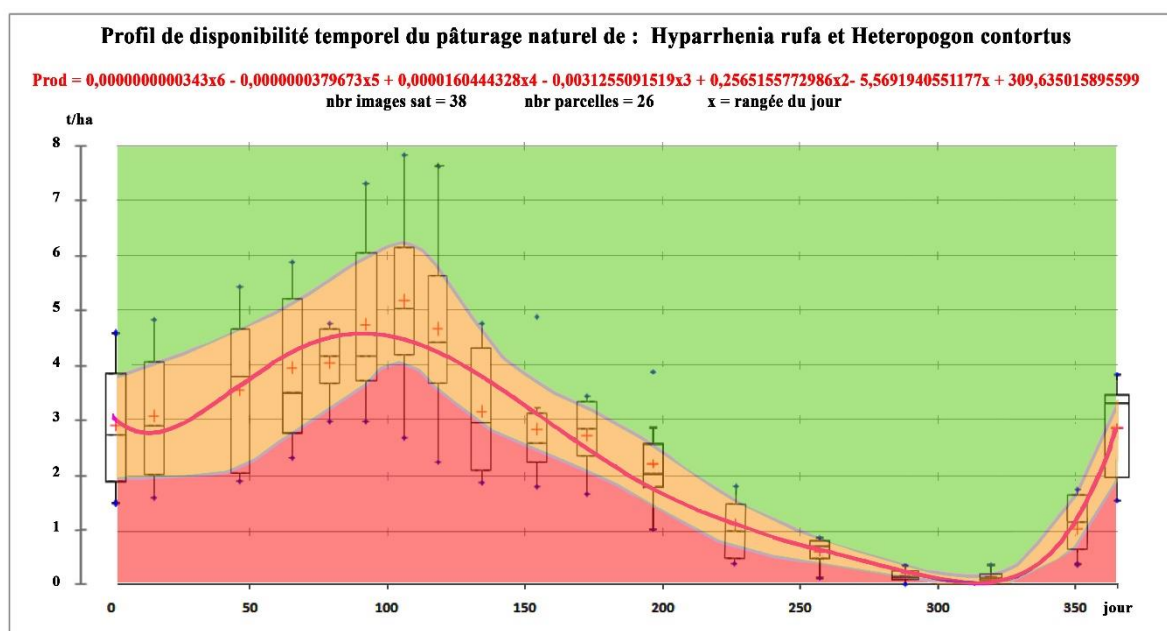


Figure 5 : Courbe de biodisponibilité temporelle d'un pâturage naturel

Le profil de biodisponibilité est une représentation graphique de la moyenne de production temporelle d'une espèce fourragère déterminée. Les profils des sept espèces de fourrage les plus utilisées à Madagascar (Annexe 2) ont été produits à partir des modèles prédictifs du rendement et de 4 066 indices de végétation extraits sur plusieurs images satellites archivées depuis les six dernières années. Lors de la prédiction de la production des différentes parcelles de pâturage permanent à partir des modèles prédictifs et des images satellites archivées, il a été constaté que la majorité des valeurs du rendement des parcelles isolées (sous-exploitées) été regroupée au-dessus du 3^{ème} quartile de la boîte à moustache, contrairement à celles qui sont sur les bords des routes (surexploitées) qui étaient plutôt regroupées en dessous du 1^{er} quartile (Figure 5). Ce constat a permis d'élaborer des seuils pour définir l'état d'exploitation de la parcelle. Par conséquent, à chaque prédiction du rendement, la valeur prédite est projetée dans le profil temporel de production pour estimer l'état d'exploitation de chaque parcelle. Pour faire marcher cette projection, les modèles ont été programmés sous langage informatique « *WLangage* » (Vandeveld, 2014) pour développer le logiciel 3C-BIOVIS « Calculateur de la Capacité de Charge, et de la BIOMasse Végétale par Imagerie Satellite » (Figure 6). C'est un outil qui permet d'estimer la quantité de ressources fourragères à partir des données obtenues par traitements d'images satellites. Cet outil fournit des informations en temps réel sur la quantité de ressources fourragères ainsi que le nombre d'animaux pouvant être alimentés sur une parcelle (Hervé *et al.*, 1989). Un système d'alerte en feu tricolore (Figure 5) permet une aide à la décision des utilisateurs du logiciel sur la gestion

du pâturage suivant l'état d'exploitation des parcelles. Premièrement, la couleur verte qui indique une sous-exploitation de la parcelle. Cela désigne une faible pression animale qui pourrait conduire à un gaspillage des ressources fourragères sans aucune intervention des éleveurs (Klein *et al.*, 2014). À l'inverse de cet événement, une prédiction du rendement inférieure au 1^{er} quartile du profil de biodisponibilité indique un surpâturage de la parcelle. Par conséquent, des décisions doivent être prises par les éleveurs comme l'arrêt immédiat de l'exploitation de cette parcelle. Cet événement est représenté par un indicateur « rouge » affiché sur le logiciel. Entre ces deux couleurs se trouve l'indicateur « orange » (Figure 6). Cet indicateur représente les parcelles ayant des rendements prédits aux alentours du profil de référence. Cela indique qu'il y a assez de biomasses pour alimenter le cheptel. Dans la pratique, les éleveurs doivent laisser un temps de repos aux parcelles qui sont colorées en rouge, et orienter les animaux vers les parcelles colorées en vert. Ces indicateurs colorés peuvent aussi être utilisés comme une « fenêtre de pâturage » (Delagarde, 2009) par les utilisateurs de l'outil.

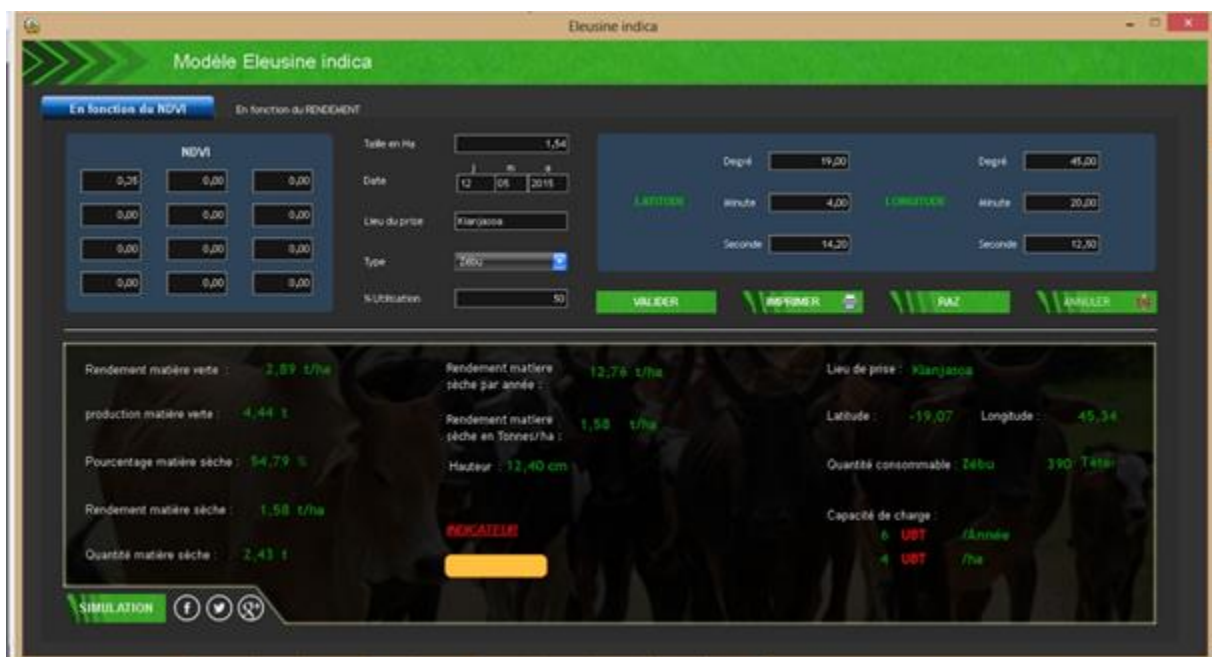


Figure 6 : Données de sortie du logiciel 3C-BIOVIS

Dans les systèmes spatialement extensifs, qui sont souvent difficiles en termes d'accessibilité, il s'avère indispensable de dresser des cartes de la disponibilité fourragère. De telles cartes identifient les parcelles où les fourrages sont, soit en déficit, soit en surplus. Elles permettent de géo-localiser les différentes zones de pâturage et les espèces constituantes. Ainsi, sans aucun déplacement sur le terrain, ces cartes (Figure 7) permettent une reconnaissance rapide de la région à partir des informations prédites sur la distribution des fourrages sur de larges zones éloignées. La classification effectuée à partir de l'algorithme « *Random Forest* » a

donné une cartographie d'une précision globale de 77,6%. Le meilleur résultat est celui du *Cynodon dactylon* d'une précision de 91,0%. La plus faible précision de classification est celui de la savane herbeuse composée d'un mélange d'*Hyparrhénia ruffa* et d'*Hétéropogon contortus* qui est de 70% sur 30 parcelles d'entraînement. Cette faible précision est due au fait que cette savane herbeuse recouvre une grande majorité de la région sur de très grandes hétérogénéités et de proportion. Ce genre d'approche est principalement utile pour les parcours qui sont souvent très vastes. Cependant, quel que soit le système d'élevage, ce diagnostic a pour finalité d'apprécier l'adéquation entre les apports alimentaires et les besoins quantitatifs du cheptel. Ainsi, sur une surface totale d'environ 600 km² dans la région de Tsiroanomandidy, 31 511 ha sont exploitables en tant que pâturage, soit 52,7% de la totalité. Cependant, 39,7% de cette surface sont représentés par l'*Aristida multicaulis* qui est une savane herbeuse à faible valeur fourragère. *Aristida* est une graminée qui couvre généralement les pentes et les sommets sur des sols dégradés et érodés (Dubois, 2004). Après l'*Aristida*, l'*Hyparrhenia* et l'*Heteropogon* sont présentes en grande quantité dans la région de Tsiroanomandidy. Elles représentent 27,8% des surfaces pâturables, mais elles ne sont pas dominantes et la surface qu'elles recouvrent diminue au cours de la saison sèche et des années au profit de l'*Aristida*. Pour certains éleveurs la présence d'*Hyparrhenia* et d'*Heteropogon* sur une surface est un indicateur de fertilité du sol. Ainsi, ces derniers sont souvent sujets de la dynamique du changement d'utilisation de l'occupation du sol en faveur des cultures vivrières. Il existe, en outre, quelques autres graminées qui occupent une faible partie de la surface non occupée par ces espèces fourragères. Il s'agit du *Cynodon dactylon* et de l'*Eleusine indica* qui représentent respectivement 16,4% et 10,2% des surfaces occupées par les fourrages et sont présente en « tâche » sur les plateaux (Ranaivoarivelo *et al.*, 2002). Enfin, le *Brachiaria brizantha* qui est une espèce fourragère introduite représente une surface totale de 1 859 ha qui équivaux à 5,9% des surfaces occupées par les fourrages. La géolocalisation de cette espèce permet de définir le zonage pour les élevages laitiers. En effet, les surfaces constituées de *Brachiaria* sont généralement localisées à proximité des élevages laitiers de la région.

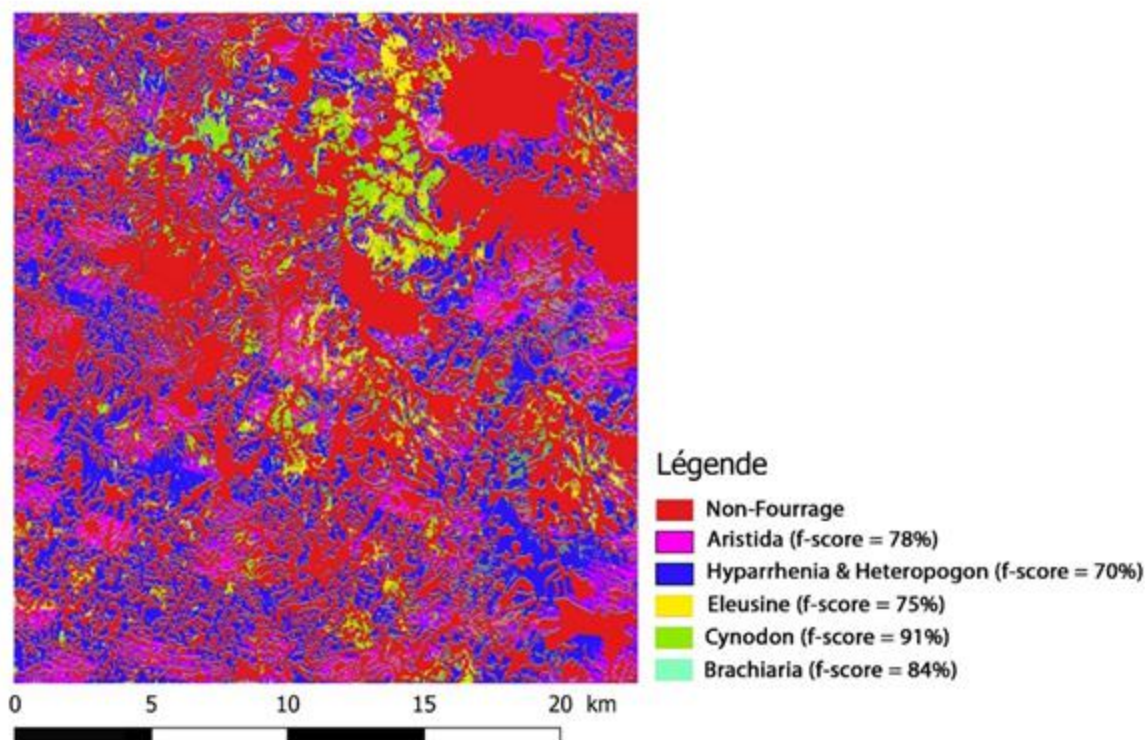


Figure 7 : Carte de la disponibilité des ressources fourragères

Lorsque la biodisponibilité spatiale des différents types d'espèces fourragères est définie, il devient possible de déterminer la production sur chaque parcelle par l'utilisation des modèles de prédiction du rendement (Razafinarivo *et al.*, 2016). Ces modèles ont été implémentés à l'aide d'un langage de programmation informatique, ce qui permet de faciliter leur usage. Une interface cartographique et de pilotage du modèle à partir d'une page Web a été réalisée <http://biova-project.org/c3biovis/>. Il est ainsi possible de dessiner une parcelle sur un fond de carte, puis de faire calculer les différents indicateurs pour cette parcelle (estimation de production fourragère, capacité de charge, etc.). L'ensemble de ces méthodes permet un inventaire des ressources fourragères à différentes échelles. Les informations obtenues sous forme de carte à partir de ces inventaires seront utiles pour les politiques de développement rural et pour les agents d'appui-conseil, notamment pour la gestion des ressources pastorales à l'échelle territoriale. Cela inclut le contrôle des déplacements des animaux en relation avec la disponibilité en fourrage durant la saison de croissance (Tainton, 1988). Il sera ainsi possible de profiter au maximum de la disponibilité de ces ressources et de déterminer l'instant propice de la mise à l'herbe, ou de la sortie d'herbe durant les différentes saisons (Dumont *et al.*, 2007). Au niveau des pâturages communautaires villageois, ces informations permettent une

attribution des différentes zones de pâturage, comme la mise en défens temporaires dans la pratique de pâturage tournant afin de mieux valoriser les repousses végétales (Stäheli *et al.*, 2010). Cela permettra également le contrôle de la charge animale sur les différentes parcelles de pâturage, mais également sur l'ensemble d'un territoire, à une échelle régionale. Dans le cas pratique de l'élevage à Madagascar, la production de cartographie bimensuelle sur les « pistes à bétail » des itinéraires officiels (MAEP, 2005) pourrait améliorer considérablement la production animale. Par conséquent, la capacité de charge régionale dans ces zones pourra ainsi être déterminée pour une contribution à la sécurité alimentaire de la population de Madagascar. À partir de ces informations, les décideurs peuvent ainsi formuler et exécuter des activités de développement durable pour l'élevage, mais peuvent également entamer des procédures pour l'adaptation des systèmes fourragers aux changements climatiques. Cependant, certains paramètres doivent encore être considérés pour l'utilisation de ces cartes. Par exemple, les caractéristiques territoriales peuvent avoir une influence sur le mode d'utilisation de la végétation par les troupeaux d'animaux. Les pentes de terrain peuvent représenter un facteur primaire pour l'accessibilité au fourrage par les animaux. Pour les bovins, les pentes escarpées sont difficiles à gravir et de ce fait, l'utilisation du fourrage par les bovins sur des pentes à plus de 60% est, en général, très faible. Holechek *et al.* (2001) fournissent des directives à prendre en compte pour la réduction de la capacité à paître pour les bovins, basées sur le pourcentage de pente. De 0% à 10%, pas de réduction ; de 11% à 30% et de 31 à 60%, réduction de 30% à 60% de la capacité à paître ; les pentes supérieures à 60% sont considérées inaccessibles pour les bovins et donc la capacité à paître est réduite de 100%. Dans leurs directives pour la réduction de la capacité à paître des ovins, Holechek *et al.* (2001) recommandent que les pentes de plus de 45% soient considérées comme inutilisables. Un autre facteur de terrain pouvant influencer l'utilisation du fourrage sur le terrain est son caractère inégal ou rocailleux. Les bovins évitent généralement les surfaces rocheuses. Hohlt *et al.* (2009) ont observé que les bovins préfèrent paître sur des types de sol et des régions où la couverture rocheuse est inférieure à 30%.

À part la gestion de la charge animale, une analyse approfondie des cartes de disponibilité fourragère permet l'aménagement du territoire pour mieux gérer les conflits entre l'agriculture et l'élevage. Ces informations pourront également servir pour améliorer la précision des impacts de l'élevage sur l'environnement (Ramachandra *et al.*, 2005). D'autres utilisations peuvent également être envisagées à partir de ces cartographies. Il a été démontré que ces cartes peuvent être utilisées pour limiter les feux de brousse (Heady, 1975 ; Holechek

et al., 1995) qui est un fléau dévastateur de la production agricole à Madagascar. En effet, chaque année une grande majorité des territoires malgaches sont sujets de ces feux de brousse. Les paysans estiment que cette pratique facilite la préparation des terrains pour les activités d'agriculture sans pour autant mesurer les conséquences négatives de cette pratique. Ces feux sont également réalisés par les pastoralistes pour éliminer les plantes d'*Aristida* lignifiées qui ne sont plus appréciées par les bovins (Dubois, 2004). Cette pratique favorise la stimulation des repousses d'herbe verte à la fin de la saison sèche lorsque de légères précipitations commencent à apparaître. Des études ont montré que la quantité de biomasses utilisée comme combustible doit atteindre au moins 1 500 kg/ha pour que le feu se propage (Trollope *et al.*, 1986). Par conséquent, la connaissance de la quantité de biomasses à partir des informations obtenues par ces cartographies pourrait être utilisée pour limiter la propagation de ces feux.

Pour conclure ce chapitre de discussion générale, l'utilisation de méthodes de suivi et d'observation spatiale à partir de données de télédétection s'est révélée être une approche exploitable pour la gestion à temps réel de la biomasse fourragère. Par ailleurs, il s'avère également possible d'estimer la production fourragère sur plusieurs semaines après la date d'acquisition de l'image satellite. Cette estimation est le produit de l'implémentation du profil de la disponibilité fourragère aux résultats de prédiction des modèles prédictifs du rendement (Razafinarivo *et al.*, 2017). Il est également à noter que les différentes méthodes développées dans cette thèse sont spécifiques à une estimation quantitative des ressources fourragères. La qualité des espèces fourragères n'est pas considérée par les différents modèles de prédiction. Ainsi, le fait d'ajuster le nombre d'animaux en fonction de la capacité de charge d'une parcelle ne signifie pas obligatoirement que les besoins nutritionnels des animaux sont comblés par la parcelle.

CONCLUSION GENERALE

Cette thèse a permis d'évaluer les potentialités de gestion des ressources fourragères dans un système spatialement extensif par une méthode combinée de modélisation et de télédétection. L'utilisation de la télédétection et du Système d'Information Géographique (SIG) est une méthode indispensable dans ce genre d'études afin d'avoir une vision d'ensemble, mais en même temps précise sur les systèmes de production fourragère. Ces connaissances ont été couplées avec de la modélisation et la programmation informatique afin de faire fonctionner des prédictions à distance. Cette méthode est basée principalement sur la calibration et la validation de modèles prédictifs du rendement issus des indices de végétation extraites d'imagerie satellitaire. Les prélèvements et le traitements de données ont été premièrement obtenus en milieu contrôlé, à la station de recherches zootechniques et fourragères de Kianjasoa, située dans le Moyen Ouest de Madagascar (région Bongolava). Les paramètres nécessaires pour la calibration sont la couverture de la canopée, la teneur en matière sèche (MS) et la hauteur de la plante. Un choix au hasard du couvert le long du transect s'avère particulièrement important pour cette calibration. Ceci a permis la mesure des variations au sein de la parcelle et donc des évaluations sur la précision des estimations. Ainsi, il a été démontré que les données issues de SPOT 5 peuvent être utilisés pour le suivi de la biomasse sur le terrain. Ces résultats répondent donc à la première hypothèse de nos travaux de thèse : « Les indices de végétation peuvent être utilisés pour le suivi en temps réel de la variation de la quantité de la biomasse fourragère ». Une fois le processus validé, d'autres calibrations ont été effectuées à plus grande échelle, sur une portion active de la région de Tsiroanomandidy d'une superficie totale de 600 Km². Durant ces trois années, 428 prélèvements de rendement géo-localisé de dix espèces fourragères les plus utilisés à Madagascar ont été effectués. Cela a permis de calibrer et valider des modèles de prédiction de la production des paramètres agronomiques tels que le rendement en MV et en MS, ainsi que la hauteur de ces espèces fourragères. En moyenne, les coefficients de détermination (R^2) des régressions statistiques entre les valeurs de NDVI et les rendements de biomasses sur le terrain est de 0,70 (0,59 à 0,89). En prenant en considération tous les pixels d'une parcelle, ces coefficients de détermination sont suffisants pour la prédiction du rendement. Cependant, l'utilisation de ces modèles sera limitée qu'aux types d'herbacés pour lesquels ils ont été calibrés. Ainsi, il s'avère désirable d'élargir le travail à d'autres espèces végétales, tels que d'autres espèces d'herbacées ou des espèces ligneuses. De plus, le nombre de points disponibles pour effectuer les calibrations reste encore limité. Ainsi, d'autres prélèvements et observations seront nécessaires pour confirmer que la calibration demeure

stable à travers le temps et l'espace. Dans cette étude, la quantité de biomasses prédite a été traduite en effectifs d'animaux (charge animale) que la parcelle pourra ensuite supporter. Pour faciliter l'utilisation des modèles, une programmation informatique a été effectuée de sorte qu'à partir d'une image satellite quelconque il sera possible de calculer la capacité de charge et d'évaluer l'état d'utilisation d'une parcelle. Ainsi, un outil d'aide à la décision des exploitants a été développé pour une meilleure utilisation des ressources fourragères. Les données obtenues dans la sortie de cet outil confirment la deuxième hypothèse : « Les indices de végétation peuvent être utilisés pour la détermination de capacité de charge animale et de l'état de valorisation des parcelles de pâturage ». Par ailleurs, une classification des espèces constituantes des pâturages naturels de Madagascar par l'utilisation de l'algorithme « *Random Forest* » a également été effectuée dans cette thèse. Cette classification a donné une précision globale de 77,6% sur 107 parcelles d'entraînement. Les parcelles qui ont été classifiées sont constituées des cinq espèces de végétaux qui ont répondu positifs aux critères de classification. Les résultats obtenus ont ainsi vérifié la troisième hypothèse : « La combinaison de plusieurs indices à partir de la télédétection permet de différencier les espèces fourragères entre elles ». Cependant, plusieurs améliorations des résultats de classification sont envisagées comme l'augmentation du nombre de parcelle et d'images satellites pour la modélisation. Il est également envisagé d'élaborer d'autres procédures de classification adaptées au contexte de Madagascar. Les résultats obtenus sur la disponibilité spatiale des ressources fourragères à l'issue de cette classification sont représentés sous forme cartographique. Couplée aux résultats de sorties de l'outil de prédiction de la disponibilité temporelle des ressources fourragères, cette cartographie permettra d'avoir une meilleure gestion des parcours fourragères. Cet outil de prédiction de la disponibilité des ressources est présent également sur le lien <http://biova-project.org/c3biovis/>. Ce qui confirme la quatrième hypothèse : « La combinaison de la télédétection, modélisation et programmation informatique, permet d'avoir un outil de suivi et de gestion des ressources fourragères à grande échelle ». Les cartes, de disponibilité du rendement de la biomasse fourragère, obtenues pourraient potentiellement être utilisées à plusieurs fins. Elles sont utilisées principalement pour la gestion des parcours et de la faune, telles que le contrôle des déplacements d'animaux et la capacité de charge. Il a été démontré que ces cartes peuvent être utilisées pour la planification des feux contrôlés. Cependant, cette étude est loin d'être exhaustive. Ainsi, plusieurs perspectives sont envisagées comme le calcul automatique de la moyenne de NDVI des parcelles sélectionnées dans l'outil de prédiction en ligne. Par conséquent, les valeurs de NDVI les plus récentes possible de la zone à étudier seront fournies automatiquement par des serveurs de traitement d'images satellites disponibles à

distance. Il est également envisageable d'intégrer une méthode d'estimation de la capacité des ruminants à paître sur les couvertures rocailleuses et les pentes. Étant donné qu'il existe actuellement des images satellites à haute résolution qui peuvent fournir des informations sur le degré d'inégalité ou la couverture rocailleuse de terrain. Cette thèse ouvrira donc d'autres pistes de recherche pour le développement de l'élevage.

Références bibliographiques

- Andriarimalala H. J., 2014. Etude floristique de *Brachiaria* sp., *Chloris Pennisetum purpureum* et élaboration d'un modèle d'estimation de leur productivité télédétection, Université d'Antananarivo écoles supérieure des sciences agronomiques département des eaux et forêts, Promotion : HAIKA Année : 2013-2014.
- Bégué A., 2002. Télédétection et production végétale. Paris: Université Pierre et Marie Curie. 112p.
- Biarmann M., 2014. Complexité de la normalisation, service vétérinaire / ministère de l'élevage. <http://www.newsmada.com>
- Bonn F., Rochon G., 1992. Précis de télédétection : principes et méthodes, UREF/AURELF/ Presses de l'Université de Québec, Vol. 1.
- Bramley R.G.V., Le Moigne M., Evain S., Ouzman J., Florin L., Fadaili E.M., Hinze C.J. Cerovic Z.G., 2011. Australian Journal of Grape and Wine Research . 17, 316-326.
- Carriere M., 1996. Impact des systèmes d'élevage pastoraux sur l'environnement en Afrique et en Asie tropicale et subtropicale aride et subaride. Rapport, 70 p.
- Cayrol P., Chehbounib A., Kergoatc L., Dedieua G., Mordeleta P., Nouvellond Y., 2000. Grassland modeling and monitoring with SPOT-4 vegetation instrument during the 1997–1999 SALSA experiment, CESBIO (CNRS/CNES/UPS), 18 av. E. Belin, bpi 2801, 31401 Toulouse Cedex 4, France, Agricultural and Forest Meteorology 105, p. 91 – 115.
- Delagarde R., 2009. Outils et indicateurs pour calculer et concilier ingestion des vaches laitières et valorisation de l'herbe au pâturage. INRA, Agrocampus Ouest, UMR1080, Production du Lait, F-35590 Saint-Gilles ; remy.delagarde@rennes.inra.fr
- Delgado C., Rosegrant M., Steinfeld H., Ehui S., Courbois C., 1999. Livestock to 2020 : The next food revolution. International Food Policy Research Institute (IFPRI), Washington D.C., USA.

- Di Bella C.M., 2002. Utilisation de données satellitaires couplées à un modèle de fonctionnement pour l'évaluation de la production prairiale à l'échelle nationale. Thèse National de Recherche Agronomique Paris- Grignon. 138 p.
- Dubois C., 2004. Gestion des ressources pastorales et pratiques d'alimentation des bovins dans les bassins versants d'Imamba-Ivakaka (Lac Alaotra, Madagascar), Ecole nationale vétérinaire de Lyon, Thèse n° 143.
- Dumont B., Farruggia A., Garel J.P., 2007. Pâturage et biodiversité des prairies permanentes INRA, Unité de recherches sur les herbivores, Theix, 63122 Saint-Genès-Champanelle, Unité expérimentale de Marcenat, 15190 Marcenat, Renc. Rech. Ruminants.
- FAO, 2001. Livestock geography: An introductory atlas of animal resources. FAO. Rome, Italy.
- FAO, 2014. La conduite d'évaluations nationales des aliments pour animaux, par Michael B. Coughenour & Harinder P.S. Makkar. Manuel de Production et de santé Animales FAO No. 15. Rome, Italie.
- Girard M.C., Girard C., 1999. Traitements des données de télédétection, Dunod. ed.Grimaud, P., Thomas, P., 2002. Diversité des rations à base de graminées et gestion des prairies en élevage bovin sur l'île de la Réunion. Fourrages p.65–78.
- Girard M-C., Girard M.C. 2010 Traitement des données de télédétection, Environnement et ressources naturelles, DUNOD.
- Granier P., 1968. Etude sur la digestibilité chez le zébu, Terre Malgache, 3 P.139-159
- Granier P., 1970. Productivité du pâturage naturel de bas-fonds dans le Moyen-Ouest de Madagascar. Terre malgache, 8, 166-178.
- Guérif M., Seguin B., 2008. Estimation de la biomasse et du rendement des cultures à partir du satellite SPOT: Résultats d'une expérimentation sur blé dur en Camargue. La télédétection en agriculture, Montpellier, CIHEAM Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens, 4, 1991, p.115-127.
- Hervé D., Genin D., 1989. Capacité de charge animale ou indicateur de pression sur des ressources fourragères, Les Cahiers de la Recherche Développement, p.38 -49.

- Hohlt J.C., Lyons R.K., Hanselka C.W., Mc Kown D., 2009. Estimating grazeable acreage for cattle. Texas AgriLife Extension Service, College Station, TX. Texas AgriLife Extension Publication B-6222, USA.
- Holechek J., Pieper R.D., Herbel C.H., 2001. Range Management: Principles and Practices. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., USA.
- Holechek J.L., Pieper R.D., Herbel C.H. 1995. Range management: Principles and practices - Second edition, Prentice Hall, New Jersey, USA.
- INSTAT, 2015. Monographies régionales des 18 D.(I).R.D.R., Ministère de l'agriculture de l'élevage et de la pêche, unité de politique de développement rural.
- Klein H.D., Rippstein G., Huguenin J., Guerin H., Toutain B., Louppe D., 2014. Les cultures fourragères. Versailles, Editions Quae. Agricultures tropicales en poche, 264p.
- Lillesand T.M., KEIFER R.W., CHIPMAN J.W., 2004. Remote Sensing and Image Interpretation. 5th ed. (New York: Wiley)
- MAEP, 2005. Textes législatifs et réglementaire sur les secteurs domanial et foncier, Agriculture, élevage et pêche. Républika'i Madagasikara, Ministère de l'agriculture de l'élevage et de la pêche. Janvier 2005, 901 pages.
- Meneses-Tovar C.L., 2011. L'indice différentiel normalisé de végétation comme indicateur de la dégradation. *Unasylva* 62:39-46.
- MinELP, 2005. Textes législatifs et réglementaire sur les secteurs domanial et foncier, Agriculture, élevage et pêche. Républika'i Madagasikara, Ministère de l'agriculture de l'élevage et de la pêche. Janvier 2005, 901 p.
- MinELP, 2013. Le magazine de l'élevage, revue trimestrielle. Ministère de l'élevage et de la protection animale, OCT-NOV-DEC 2013, n°001.
- Minten B., Randrianarisoa J.C., Randrianarison L., David E., 2010. Agriculture, pauvreté rurale et politiques économiques à Madagascar, Improved Policy Analysis for Economic Decision-Making and Improved Public Information and Dialogue, Ilo Project, <http://www.ilo.cornell.edu/images/th3.4.pdf>

- Mougenot B., Bégué A., Lechaudel M., Royer A., Duchemin B., Maisongrande P., 2001. Biomass assessment with VEGETATION data in the Sahel: Improvements with ecological data and modeling. INIST-CNRS.
- Notions fondamentales de télédétection [WWW Document], 2002. URL http://pages.csam.montclair.edu/~chopping/rs/CCRS/chapter1/chapter1_1_f.html
- Perakis K., Tamrv B., 1988. Etude de zones de pâturage naturel du moyen-ouest malgache à partir de données de télédétection avec le système de k. Pearson.
- Rahetlah V.B., Salgado P., Andrianarisoa B., Tillard E., Razafindrazaka H., Le Mézo L., Ramalanjaona V.L. 2013. Relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and forage biomass yield in the Vakinankaratra region, Madagascar. Livestock research for rural development (in press).
- Rakotondravao, 2009. Rapport national sur l'état des ressources génétiques animales.
- Ramachandra K. S., Raju S.S., Anandan S., Angadi U.B., 2005. Animal feed resources and its impact on livestock production in India. *Indian Dairyman*, 57: 39–47. Heady, H.F., 1975, Rangeland management, New York: McGraw Hill, USA.
- Ranaivoarivelo N., 2002. Elevage bovin et exploitation d'un espace agropastoral dans le sud-ouest de Madagascar (région de Sakaraha). Thèse de doctorat en Géographie, Université Louis Pasteur de Strasbourg : 259p.
- Razafinarivo T.D., Rahetlah V.B., Rakotozandry J.N., Salgado P., Rakotomanana O.R., Artus H., Le Mezo L., 2016. Gestion de pâturages par utilisation combinée d'un modèle de prédiction du rendement fourrager et de la télédétection : cas de la station Kianjasoa, *Bulletin de l'Akademia Malagache*, XCVI/1, 2016. Page 115 - 122.
- Razafinarivo T.D., Rahetlah V.B., Rakotozandry J.N., Salgado P., Degenne P., 2017. Development of a cartographic tool for the management of pastoral resources through a combined approach of remote sensing and modeling, *Livestock Research for Rural Development* 29 (11) 2017, <http://www.lrrd.org/lrrd29/11/raza29204.html>
- Robert J.P., 1979. Développement laitier à Madagascar. Berne, Suisse, Direction de la Coopération au Développement et de l'Aide humanitaire, 225 p.

- Sawadogo. I., 2011. Ressources fourragères et représentations des éleveurs, évolution des pratiques pastorales en contexte d'aire protégée: Cas du terroir de Kotchari à la périphérie de la réserve de biosphère du W au Burkina Faso. Environnement et Société. Museum national d'histoire naturelle - MNHN PARIS, Français.
- Stäheli B., Agridea L., Zurbrügg C., Regula B., 2010. Les pâturages extensifs, un milieu précieux pour la flore et la faune. AGRIDEA, 8315 Lindau, Tel. 052 354 97 00, www.agridea.ch
- Steinfeld H., Wassenaar T., Jutzi S., 2006. Livestock production systems in developing countries: status, drivers, trends. Rev. Sci. Tech. Off. Int. Epiz., 25: 505–516.
- Tainton N.M., 1988. Veld and Pasture Management in South Africa. Shuter & Shooter, Pietermaritzburg in association with University of Natal Press, Pietermaritzburg. n Department of Agriculture and Water Supply. 1989. Veld management in the Eastern Cape. Government Printer, Pretoria.
- Trollope, W.S.W., Trollope, L.A., Potgieter, A.L.F., Zambatis, N., 1996. SAFARI-92 characterization of biomass and fire behaviour in the small experimental burns of the Kruger National Park. Journal of Geophysical Research 101 (D19): 23,531-23,539.
- Tucker C. J., 1979. Red and photographic-infrared 1/near combinations for monitoring vegetation Remote Sens Environ 8(2) p.127-15.
- Université Paris1 panthéon-Sorbonne, 2008. Suivi de l'environnement par télédétection. URL <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/index.html>
- Vall E., Salgado P., Corniaux C., Blanchard M., Dutilly C., Alary v., 2014. Changements et innovations dans les systèmes d'élevage en Afrique. In : Numéro spécial, Quelles innovations pour quels systèmes d'élevage? Ingrand S., Baumont R. (Eds). INRA Prod. Anim., 27, 161-174.
- Vandeveld, D., 2014. WINDEV : Les fondamentaux du développement d'applications (agrégé par PC SOFT). ENI. Collection : Ressources Informatiques. Broché - 765 p.

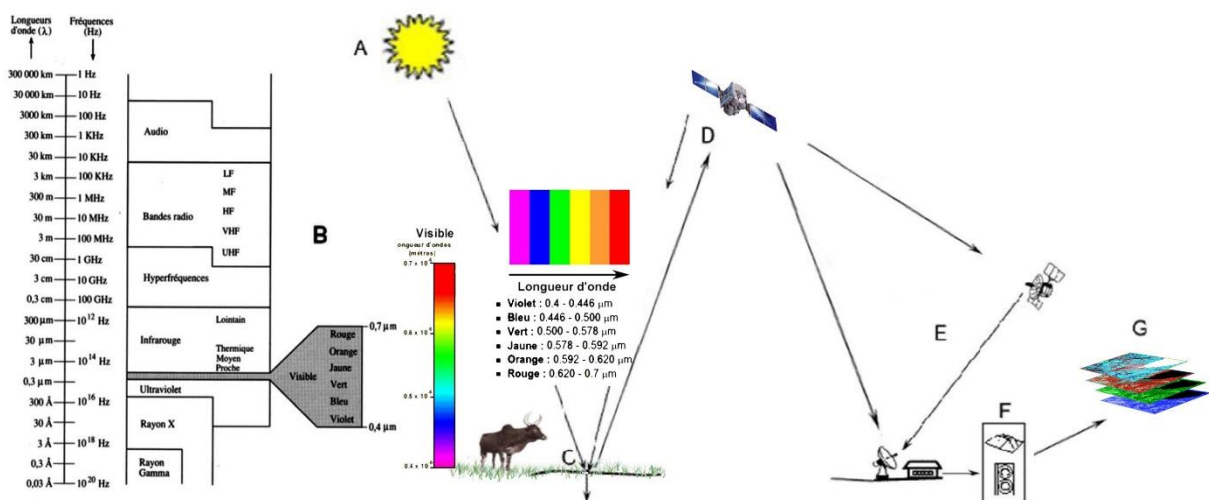
Annexe 1

Processus de télédétection

Processus de télédétection :

La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. Le processus de la télédétection est composé des sept étapes suivantes ("Notions fondamentales de télédétection," 2002) :

- Source d'énergie (A) : une source d'énergie (le soleil) illumine la cible (couvert végétal des prairies).
- Rayonnement et atmosphère (B) : Durant son parcours entre le soleil et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre le couvert végétal et le capteur. Ces interactions déforment les données et impliquent des corrections dites atmosphériques.
- Interactions avec la cible (C) : Une fois parvenue sur la cible, l'énergie interagit avec la surface du couvert végétal. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés biologiques et structurales du feuillage.
- Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) : Une fois le rayonnement réfléchi par le couvert végétal, il doit être capté à distance pour y être enregistré. Les satellites du système SPOT (Satellite pour l'Observation de la Terre) sont équipés de capteurs pour l'enregistrement du rayonnement réfléchi dans différentes longueurs d'onde.
- Transmission, réception et traitement (E) : L'énergie enregistrée par le capteur est transmise à une station de réception terrestre où l'information est transformée en image numérique. Ces images seront par la suite traitées et corrigées (des effets atmosphériques, radiométriques, et géométriques). Dans notre cas, le CNES via la plateforme KALIDEOS effectue les corrections.
- Interprétation et analyse (F) : Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image finale est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir : ici, les indices de végétation normalisés sur les parcelles de fauches et de pâtures.
- Application (G) - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour comprendre la cible et répondre à une problématique.



Annexe 2

Caractéristiques des fourrages étudiés



Brachiaria brizantha

Brachiaria brizantha est une graminée pérenne généralement à port érigé, formant des touffes robustes. Cependant, certaines variétés peuvent être prostrées ou semi-érigées. *Brachiaria* a des rhizomes courts et des tiges de 30 cm à 100 cm. Les inflorescences sont faites de 2 à 16 racèmes relativement longues (4 à 20 cm) avec des épillets généralement disposés en un seul rang. *Brachiaria*, d'origine africaine, est répandu dans les tropiques humides des autres continents. La saison sèche doit être inférieure à 5 mois et la pluviosité supérieure à 900 mm jusqu'à plus de 2 000 mm à Madagascar. Cependant, la pluviosité optimale semble être voisine de 1 200 mm. Il s'adapte à une grande variété de sols sableux ou acides, mais il ne tolère pas les sols mal drainés. Il est très résistant à la sécheresse et reste vert pendant toute la saison sèche. Les différentes espèces de *Brachiaria* sont adaptées à toutes les zones climatiques de Madagascar, avec cependant des caractéristiques légèrement différentes. Ces espèces de *Brachiaria* poussent indifféremment sur tous types de texture de sols (sableux à argileux). Cependant, ils exigent des sols drainés et réfutent les sols hydromorphes. Ils préfèrent un pH voisin de la neutralité. Les espèces de *Brachiaria* se sont révélées d'une grande souplesse vis-à-vis du régime de pluviométrie. Ils résistent à une saison sèche plus longue de 5 à 6 mois, et sont recommandés au-dessus de 1500 m d'altitude.



Hyparrhenia rufa & *Heteropogon contortus*

Hyparrhenia rufa (Vero) et *Heteropogon contortus* (Danga) sont deux espèces fourragères présentes généralement en association dans les parcours. (1) *Hyparrhenia rufa* est la plante la plus recherchée par les bouviers et dont les emplacements conditionnent les parcours journaliers. C'est une graminée pérenne, cespiteuse, héliophile et grégaire. Elle pousse en touffes hautes si elle n'est pâturée à l'état jeune, avec des chaumes dressés sur 0,5 à 2,5 m de hauteur. Son appétibilité et sa fructification et lignification tardive permettent aux zébus de la consommer longtemps et entraînent donc son surpâturage. *Hyparrhenia* tolère la sécheresse et les inondations temporaires. Elle constitue un excellent pâturage ou une bonne prairie de fauche (fanage ou fauche de l'herbe). (2) *Heteropogon contortus* est aussi une herbe pérenne, cespiteuse, héliophile, à chaumes glabres, grêles d'une hauteur allant de 20 à 75 cm et possédant des épis aristidés caractéristiques. Cette plante pousse sur sols très divers, dont les sols ferrallitiques ou ferrugineux tropicaux. Le cycle végétatif se déroule en début de saison sèche. *Heteropogon* donne un bon fourrage à l'état jeune et un excellent foin si son fauchage a lieu avant l'épiaison. En revanche, la plante mûre a une faible valeur alimentaire et provoque des blessures sur la peau ou le museau des bêtes avec son épillet acéré. Ces deux espèces présente une certaine résistance aux feux, mais elles disparaissent quand les brûlis sont trop fréquents, et ce au profit d'*Aristida multicaulis*.



Eleusine indica

Eleusine indica se développe en touffes denses, plus ou moins étalées. Son enracinement est puissant et profond. Les feuilles sont assez larges et pliées, disposées à plat. Elles sont dressées tout le long de la tige. Le limbe est lisse, sauf à la surface supérieure où il est pourvu de longs poils flexueux. Les gaines sont aplaties. Le bord présente des touffes de longs poils. L'inflorescence est formée par 4 à 5 épis vert clair dressés obliquement à partir de l'extrémité de la tige. Les épillets se composent de 3 à 9 fleurs, ils sont disposés à la face inférieure de l'axe de l'épi. Ses feuilles sont disposées de façon distique et dressées obliquement. *Eleusine indica* est très appréciée par le bétail avec une bonne teneur en protéines et résiste beaucoup au pâturage.



Cynodon dactylon

Cynodon dactylon est une graminée herbacée vivace, d'une hauteur de 10 à 40 cm. Il est étalé, rampant, très dense et possède également des tiges couchées-genouillées, ascendantes, et ramifiées. *Cynodon* se propage essentiellement par les rhizomes et les stolons, résistant aux climats chauds et les situations sèches, et supporte les inondations temporaires. Il se retrouve généralement sur des terrains frais comme les alluvions, les colluvions un peu humides, les diguettes et les jachères de rizières où il constitue de bons pâturages. Cette plante est bien appréciée par le bétail avec une bonne teneur en protéines et résiste au surpâturage. On le trouve sur tous types de sols, mais il a tout de même une prédilection pour les sols sableux à limono-sableux, secs et bien éclairés. *Cynodon dactylon* se développe essentiellement en taches sur les chemins et forme souvent des tapis denses. *Cynodon dactylon* est utilisé comme pâturage naturel. Très compétitif, il peut détourner l'eau à son profit et peut résister à la sécheresse. Il lui faut une pluviométrie supérieure à 600 mm par an avec une température moyenne d'environ 24°C.



Aristida multicaulis

Aristida multicaulis est une herbe pérenne cespiteuse, poussant en grosses touffes à enracinement puissant. Elle peut mesurer de 50 cm à 1 m de haut et possède un rhizome trapu. Il s'agit de l'espèce dominante sur les sols pauvres, les plateaux et les pentes à tel point que, dans beaucoup d'endroits, elle constitue une formation herbeuse mono-spécifique (90% de la surface des convexités des reliefs). La présence d'*Aristida* est maximale sur les pentes où la compétition interspécifique est supprimée. Cette plante caractérise des zones érodées dont l'augmentation de surface entraîne sa propagation. Seules les premières pousses de début de saison des pluies sont appréciées. Ensuite, sa lignification rapide lors de la montaison la rend non comestible et sa composition se rapproche alors de celle des ligneux. Le broutage sélectif du bétail entraîne qu'une grande quantité de touffes d'*Aristida* arrive au stade de montaison où elles ne sont plus alors comestibles et cela entraîne la fermeture de l'espace à d'autres espèces. Généralement *Aristida* est utilisée dans la gestion des ressources pastorales en système extensif par le feu de pâturage en milieu de saison sèche pour détruire les touffes non comestibles et stimule une légère repousse d'herbe verte à la fin de la saison sèche lorsque de légères précipitations commencent à apparaître.



Stylosanthes guianensis

Stylosanthes guianensis CIAT 184 est une légumineuse herbacée, érigée à semi-érigée, non volubile, originaire d'Amérique du Sud. Il forme de petits buissons (1 m à plus de 1,8 m), aux feuilles trifoliolées de 0,5 à 5 cm de long, lancéolées, vert tendre à vert foncé. Les tiges sont velues et se lignifient par la base. Ses fleurs caractéristiques sont d'un jaune intense à orangé et peuvent être striées de rouge. Ses graines sont très petites de couleur brun clair. *Stylosanthes* est une plante adaptée à toutes les zones climatiques de Madagascar, de 0 à 1600 m d'altitude, sous toutes les latitudes, de 600 mm à plus de 3 000 mm de pluies. Il se comporte particulièrement bien en climat tropical humide et en climat de moyenne altitude, même avec une saison sèche marquée. Il supporte également les climats semi-arides à condition de pouvoir développer rapidement ses racines en profondeur, sur des sols avec une réserve en eau suffisante. *Stylosanthes* est capable de produire une forte biomasse même sur des sols dégradés et sans engrais (5 à 10 t/ha de matière sèche, et jusqu'à 20 t/ha sur sol riche). Comme toutes les légumineuses, *Stylosanthes* présente une teneur élevée en azote, donc il est recommandé de limiter à 1/3 sa quantité dans la ration, afin d'éviter l'exposition de l'animal à une intoxication ammoniacale.



Brachiaria ruziziensis

Brachiaria ruziziensis est une graminée herbacée, semi-érigée à rampante, originaire d'Afrique centrale. Il se développe en touffes (1m à 1,5 m à la floraison) qui s'étalent sur le sol quand il n'est pas coupé, formant un tapis dense. Les feuilles vert tendre sont velues et font jusqu'à 25 cm de long, pour 1 à 1,5 cm de large. Ses inflorescences portent 3 à 9 racèmes relativement long (4 à 10 cm), portant des épillets sur un ou deux rangs, sur un côté d'un rachis large et aplati. Les épillets sont velus, faisant 5 mm de long. Le poids de 1000 graines est d'environ 4 grammes. *B. ruziziensis* est très étroitement apparenté à *B. decumbens*. Son système racinaire fasciculé est composé de nombreuses racines, denses et capables de se développer en profondeur (plus de 1,8 m). Sa production de biomasse est forte et rapide en saison chaude et humide, mais chute fortement en période froide et/ou sèche. Dans les meilleures conditions, avec une forte fertilisation azotée, elle peut atteindre 25 t/ha de matière sèche pour la biomasse aérienne, en deuxième année quand la production est maximale. *Brachiaria ruziziensis* est une espèce pérenne, de durée de vie assez courte (3 à 5 ans environ). Sa vigueur au départ et sa croissance rapide lui permettent de dominer les adventices. Plante photopériodique, il fleurit quand les jours se raccourcissent.



Ray grass

Ray grass (*Lolium multiflorum*) est une graminée pérenne (5 ans et plus), très appétente et très adaptée au pâturage en raison de son port bas et dense et de sa grande souplesse d'exploitation. Ray-grass est une espèce tempérée, sa rapidité de germination et de développement ainsi que sa forte capacité de tallage permettent un démarrage en force. Les variétés tardives ne remontent pas en épi après la première coupe. Sa production d'été est stoppée par la chaleur. Les variétés diploïdes présentent une teneur en matière sèche plus élevée que les tétraploïdes. Les types très précoces, dotés d'un port érigé, conviennent bien à la fauche. À l'inverse, les RGA tardifs ou très tardifs sont plus facilement gérables en pâturage. Ils sont cependant mieux adaptés aux zones plutôt fraîches et humides. Cette espèce est idéale pour le pâturage. Grâce à ses puissantes racines et à ses très nombreuses talles au ras du sol, il supporte les gros chargements de bétail à l'hectare. À moins d'un surpâturage, le RGA repart toujours après le passage des animaux. À Madagascar, Ray grass est généralement cultivé en contre-saison après la récolte du riz.



Pennisetum purpureum

Pennisetum purpureum ou l'herbe à éléphant est une graminée vivace, robuste et pérenne, qui se répand actuellement dans plusieurs pays tropicaux et subtropicaux. *Pennisetum purpureum* est l'espèce fourragère la plus cultivée sur les Hautes Terres de Madagascar. Elle produit une forte biomasse disponible pour l'élevage laitier, mais également sert de brise-vent et haies vives pour les horticultures et les vergers. Dans son utilisation comme fourrage, elle peut être utilisée sous forme verte ou conservée (foin ou ensilée). C'est une plante fourragère de grande taille, les tiges peuvent atteindre jusqu'à 4 m de hauteur, ont un diamètre de 3 cm près de la base, s'étendent par des rhizomes courts en forme de touffes. Les tiges peuvent s'enraciner au niveau des nœuds inférieurs en tombant, créant des stolons. Les limbes sont vert pâle, glabres ou velus, de 30 à 120 cm de long, avec un bord épais et brillant. L'inflorescence est un épi couvert de poils raides, denses, de couleur jaune-marron. Le système racinaire est étendu, vigoureux, profond jusqu'à 4 m en dessous du sol. C'est une plante qui exige un sol de bonne fertilité, friable, profond, bien drainé avec un pH entre 4,5 et 8,2. Elle ne tolère pas le gel et se développe bien dans une altitude de plus de 2000 m et une pluviométrie de 750 à 2500 mm.



Chloris gayana

Chloris gayana est un fourrage pérenne qui s'est répandu actuellement dans plusieurs pays tropicaux. Il est utilisé principalement dans l'affouragement des ruminants en pâturage ou en fauche. Outre l'affouragement en vert, il est parfaitement adapté à la production de foin. *Chloris gayana* possède également un rôle de conservation du sol, car il peut couvrir rapidement un sol dénudé, contribuant ainsi à la lutte contre l'érosion. En assolement cultural, il peut être associé au maïs, ou autres légumineuses. Il existe de nombreux cultivars comme le Katambora, Bell et Nemkat, créés principalement dans le but de résister aux maladies et aux attaques des nématodes. *Chloris gayana* peut atteindre 121 à 135 cm de haut à maturité. Les feuilles sont glabres et mesurent 12,5 à 32,0 cm de long. La gaine des feuilles est réduite et le brin des feuilles est aplati ou plié. La tige ayant un diamètre de 2 à 4 mm est dressée et sert de port au tallage. L'inflorescence est formée par des racèmes simple ou double, de couleur verte et se transformant en marron-cuivre à maturité. La racine est pénétrante jusqu'à 4 à 5 m au-dessous du sol.

Annexe 3

Étapes de calcul 3C-BIOVIS

METADONNEES DU LOGICIEL 3C-BIOVIS

Démarches de calcul du logiciel 3C-BIOVIS (voire fichier Excel "Métadonnées", les références des cellules sont représentées entre parenthèses sous cette forme (colonne, ligne), les cellules en gris contiennent les données d'entrée et les jaunes contiennent les données de sortie.

LES DONNEES D'ENTREE SONT LES SUIVANTES :

- A. **Le choix de l'espèce fourragère à étudier (choix de modèle):** La base de données de l'outil contient les dix espèces de fourrage les plus courantes à Madagascar dont : *Brachiaria brizantha*, un mélange d'*Hyparrhenia* et *Heteropogon*, *Eleusine indica*, *Cynodon dactylon*, *Aristida multicaulis*, *Stylosanthes CIAT 184*, *Brachiaria ruziziensis*, *Lolium perenne*, *Pennisetum purpureum*, *Chloris gayana*.
L'élargissement du travail sur d'autres espèces végétales, et de les introduire dans les bases de données de l'outil est envisagé (Principalement, ceux du projet BIOVA Mozambique).
- B. **La valeur moyenne de NDVI sur la parcelle.** Le fait de prendre la moyenne des différents pixels d'une parcelle diminue les risques d'erreur de prédiction.
- C. **Taille de la parcelle :** Dans la version en local, c'est-à-dire la version logiciel (3C-BIOVIS) qui est installée dans un ordinateur personnel sans connexion internet ni serveur Web, la taille de la parcelle est saisie par l'utilisateur. Par contre, dans la version en ligne (<http://biova-project.org/c3biovis/>), la taille de la parcelle est calculée automatiquement à chaque fois que l'utilisateur dessine une parcelle sur le fond d'image satellite de l'outil.
- D. **La date de prise de l'image satellite:** Permet de référencer les résultats de prédiction à des modèles de références dans l'outil. Ainsi, elle permet de référencer la production prédite à la date d'acquisition de l'image satellite et la production de référence présente dans les bases de l'outil à la même date.
- E. **Le type d'animal (choix entre : zébu, laitière, ovin/caprin) :** Permet de calculer la capacité de charge animale qui est une unité standardisée en fonction du type et du nombre d'animaux, et le pâturage disponible.
- F. **Le taux d'utilisation du fourrage disponible sur la parcelle (Boudet 1975):** Le taux d'utilisation représente le pourcentage qui détermine la quantité de fourrage disponible après avoir soustrait les pertes dues à divers facteurs comme les insectes ravageurs et le piétinement des animaux. D'une façon générale, le taux d'utilisation est compris entre 30 et 50%. Ce taux d'utilisation est estimé par l'utilisateur de l'outil.

LES DONNEES DE SORTIE SONT LES SUIVANTES :

1. Le Rendement en t/ha de MV
2. La quantité de matière verte dans la parcelle
3. La teneur en Matière Sèche
4. La production en tonne/hectare de matière sèche
5. La quantité de matière sèche dans la parcelle
6. La hauteur de l'espèce fourragère
7. Le nombre d'animaux pouvant être alimenté par la parcelle si l'on fauche la parcelle
8. Un indicateur coloré de l'état de production (couleur du polygone : vert, orange, rouge)
9. Le rendement en MS tonne/ha/année
10. Le nombre d'animaux pouvant être alimenté par la parcelle durant une année
11. la capacité de charge de la parcelle
12. Simulation

Brachiaria Brizantha (ligne 4) est prise comme exemple dans tous les calculs de démonstration pour décrire les étapes de calcul de 3C-BIOVIS.

Tout d'abord, les productions des différents types de fourrage sont déterminées à partir des modèles de régression entre les données spatiales (NDVI) et les données sur le terrain :

1 - Rendement en t/ha de MV : La colonne C, ligne 4 (C,4) présente la production en g MV/m² à partir des données obtenues par imageries satellites. Les données acquises par les satellites permettent de calculer des Indices de Végétation Normalisé (NDVI, Rouse et al., 1974 ; Chaerle et Straten, 2000) qui sont très fortement corrélés avec la densité du couvert végétal et la capacité des plantes à absorber la lumière solaire pour la convertir en biomasse. Ainsi, il est possible de calibrer/valider des modèles de prédiction (tableau 1) de la quantité de biomasses fourragère à partir des valeurs de NDVI. Les rendements prédits seront ensuite convertis en tonne/hectare (H,4).

- $MV (Brachiaria\ brizantha) = -4603,53e^{-0,29NDVI} + 4565,65$
- $MV (Hyparrhenia / Heteropogon) = -3119,1e^{-0,2NDVI} + 3201,76$
- $MV (Eleusine\ indica) = -23667,18e^{-0,22NDVI} + 22173,66$
- $MV (Cynodon\ dactylon) = -23070,21e^{-0,12NDVI} + 22506,82$
- $MV (Aristida\ multicaulis) = -187774,42e^{-19,75NDVI} + 641,31$
- $MV (Stylosanthes\ CIAT\ 184) = -4747,71e^{-0,48NDVI} + 4199,48$
- $MV (Brachiaria\ ruziziensis) = -7066,37e^{-0,3NDVI} + 6566,83$
- $MV (Lolium\ perenne) = 60,62NDVI - 24,63$
- $MV (Pennisetum\ purpureum) = 0,034e^{5,418NDVI}$
- $MV (Chloris\ gayana) = 0,045e^{5,011NDVI}$

2 - La production de Matière Verte dans la parcelle (en tonne) : La cellule (H,4) représente la production en tonne de matière verte disponible dans la parcelle à l'instant T. Cette quantité est obtenue par la multiplication de la taille de la parcelle (G,4) par le rendement MV t/h (D,4) d'une espèce déterminée.

3- La teneur en Matière Sèche (MS) : La colonne "N" indique le calcul de la teneur en MS (en %) du *Brachiaria* :

a) La valeur de NDVI est influencée par la réponse spectrale de la plante. Plus il y a du vert, plus la valeur de NDVI est élevée. Cette réponse spectrale est aussi influencée par l'humidité (teneur en MS) de la plante, qui intervient aussi dans la réflectance de la plante. Ainsi, la valeur de NDVI présente une corrélation positive avec la teneur en matière sèche de la plante (N,5). Il est donc possible de prédire la quantité de MS disponible à partir de la valeur de NDVI (Tableau 1).

- %MS (*Brachiaria brizantha*) = $215,04e^{-5,57NDVI} + 34,82$
- %MS (*Hyparrhenia / Heteropogon*) = $568,49e^{-8,12NDVI} + 35,12$
- MS (*Eleusine indica*) = $-3915,06e^{-0,28NDVI} + 3706,03$
- MS (*Cynodon dactylon*) = $-5396,68e^{-0,098NDVI} + 5405,97$
- %MS (*Aristida multicaulis*) = $575,60e^{-0,38NDVI} - 437,68$
- %MS (*Stylosanthes CIAT 184*) = $266,11e^{-0,29NDVI} - 173,97$
- MS (*Brachiaria ruziziensis*) = $-1141,06e^{-0,64NDVI} + 998,54$
- MS (*Lolium perenne*) = $5,62NDVI - 2,18$
- MS (*Pennisetum purpureum*) = $0,004e^{5,84NDVI}$
- MS (*Chloris gayana*) = $0,014e^{4,49NDVI}$

b) Des échantillons de ces différentes espèces fourragères sont pris périodiquement sur les parcelles puis analysés au laboratoire (étuve) afin de déterminer l'évolution dans le temps de la teneur en MS. Ces pratiques sont répétées durant les trois années de la thèse pour pouvoir retracer la tendance moyenne de la variation annuelle de la teneur en matière sèche de ces espèces (N,4). La variation des stades végétatifs et de la teneur en matière sèche des espèces composantes des pâturages naturels varie peu d'une année à l'autre suivant les saisons pluvieuses qui sont spécifiques à la région. Ainsi, à chaque fois qu'une date d'acquisition d'image satellite et saisie dans le logiciel (donnée d'entrée). Cette courbe va calculer une référence de teneur en MS à cette même date.

- %MS (B. brizantha) = $-0,00000729x^3 + 0,0031432x^2 - 0,1779629x + 37,95447285$
- %MS (Brachiaria) = $-0,00001036x^3 + 0,00420746x^2 - 0,1456225x + 24,2239409$
- %MS (Cynodon) = $-0,00000853x^3 + 0,0035672x^2 - 0,12657258x + 23,791927$
- %MS (Hyparrhenia / Heteropogon) = $-0,0000000123x^4 + 0,0000020248x^3 + 0,0006086017x^2 + 0,128988724x + 25,8172339256$
- %MS (B. ruziziensis) = $-0,0000000118x^4 + 0,0000042403x^3 - 0,0004013732x^2 + 0,1654607681x + 21,0357053472$
- %MS (Stylosanthes) = $-0,0000000125x^4 + 0,00000475x^3 - 0,00075909x^2 + 0,27875439x + 21,23769676$

x = rang du jour dans l'année

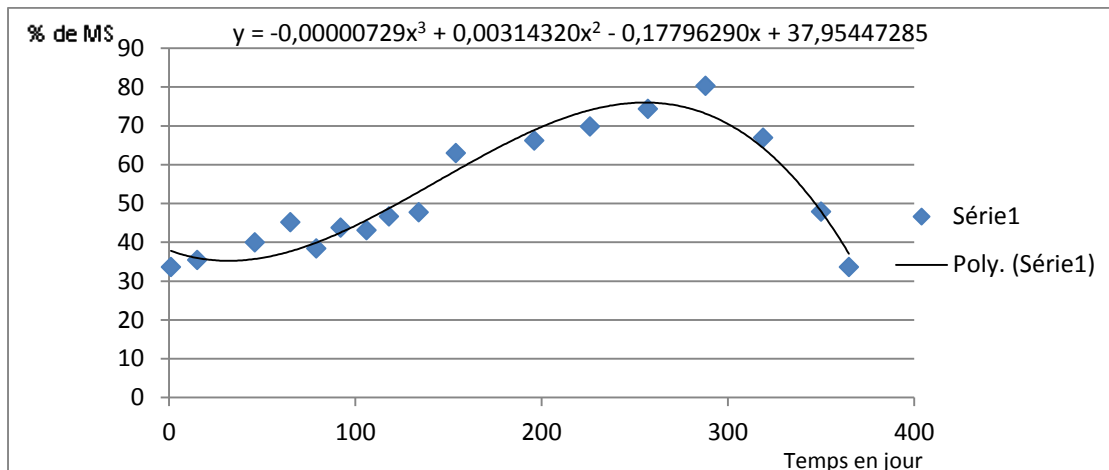


Figure 4 : Courbe de tendance moyenne de la variation annuelle de la teneur en MS du *Brachiaria brizantha*

4 - Le rendement (t MS/ha) calculé par le logiciel 3C-BIOVIS provient du modèle prédictif du rendement en MS à l'instant T (P,5) et le rendement décrit par la courbe de référence à l'instant T (P,4). Le fait d'utiliser ces deux modèles pour prédire la teneur en MS des différentes espèces offre la possibilité d'avoir un résultat le plus proche possible de la réalité (En principe, ces deux valeurs sont les mêmes, dans notre cas, elle se corrige entre elles). Ainsi, le rendement (t MS/ha) prédit (Q,4) est obtenu à partir de la moyenne de ces deux valeurs. Ce rendement (t/ha) prend donc en considération un pourcentage de MS dépendant de la quantité de MV prédite par le Modèle prédictif de MV. Mais également une quantité de MS prédite directement à partir d'un modèle prédictif de MS.

5 - La production de Matière Sèche sur la parcelle (en tonne): La quantité prédite sur la parcelle (S,4) est obtenue par la division du rendement en MS de l'espèce fourragère en t/ha (Q,4), par la taille de la parcelle (ha) (G,4). Elle peut être également obtenue par le pourcentage de MS (O,4) en fonction de la teneur en MV (H,4).

6 – Hauteur (cm) : colonne E, ligne 4 (E,4)

La hauteur d'une espèce donnée est fonction de la quantité de biomasses disponible. Par conséquent, il est possible de prédire la hauteur de la plante à partir d'un modèle de régression (tableau 1) entre le NDVI (qui est fonction de la production en biomasse) et la hauteur mesurée sur le terrain. Cependant, les coefficients de détermination (R^2) des modèles de prédiction de la hauteur sont moins bons que pour les modèles de MV et de MS.

- Hauteur (B. brizantha) = $0,826 * \text{EXP}(6,101 * \text{NDVI})$
- Hauteur (Eleusine) = $62,297661949674 * \text{EXP}(0,577699679031045 * \text{NDVI}) - 63,8531214769002$
- Hauteur (Cynodon) = $-281,922798272942 * \text{EXP}(-0,0970993100654148 * \text{NDVI}) + 285,412730947054$
- Hauteur (Hyparrhenia / Heteropogon) = $-778,475368740007 * \text{EXP}(-0,331015296745647 * \text{NDVI}) + 760,287527306876$
- Hauteur (B.ruziziensis) = $-536,10382913707 * \text{EXP}(-0,140663772509229 * \text{NDVI}) + 525,705850888254$
- Hauteur (Chloris) = $3,921 * \text{EXP}(3,909 * \text{NDVI})$
- Hauteur (P. purpureum) = $8,276 * \text{EXP}(3,319 * \text{NDVI})$

- Hauteur (Stylosanthes) = $-2691,43294508006 * \text{EXP}(-10,7656264513912 * \text{NDVI}) + 53,518507196202$
- Hauteur (Aristida) = $-778,475368740007 * \text{EXP}(-0,331015296745647 * \text{NDVI}) + 760,287527306876$
- Hauteur (Raygrass) = $(867,9 * \text{NDVI}) - 329,2$

Tableau 4 : Les coefficients de détermination des différents modèles de régression entre la valeur de NDVI et des données agronomiques (MV, MS et hauteur) sont consignés dans le tableau ci-dessous :

R ² (NDVI/Parametres agronomiques)	n	Matière verte	Matière sèche	Hauteur
<i>Brachiaria brizantha</i>	169	0,64	0,52	0,42
<i>Hyparrhenia / Heteropogon</i>	70	0,59	0,79	0,30
<i>Eleusine indica</i>	30	0,89	0,79	0,55
<i>Cynodon dactylon</i>	48	0,79	0,73	0,63
<i>Aristida multicaulis</i>	12	0,67	0,47	0,40
<i>Stylosanthes CIAT 184</i>	20	0,62	0,43	0,32
<i>Brachiaria ruziziensis</i>	30	0,82	0,73	0,61
<i>Lolium perenne 1*</i>	15	0,68	0,52	0,61
<i>Pennisetum purpureum 2*</i>	17	0,73	0,68	0,66
<i>Chloris gayana 2*</i>	17	0,71	0,59	0,68

7 - Le nombre d'animaux pouvant être alimenté par la parcelle : Les cellules (U,4), (V,4) et (W,4) : indiquent le nombre d'herbivores (Zébu, vache laitière, ovin, caprin) pouvant être alimenté par la parcelle si l'on fauche la biomasse disponible sur la parcelle (à cette date). L'importance de ces données est qu'elles représentent la conversion directe de la quantité de biomasses végétales, prédites à partir de l'image satellite, en effectifs animaux. D'une part, ces données semblent avoir peu d'intérêt zootechnique du fait qu'elles ne montrent que la quantité d'animaux qui peuvent consommer le fourrage en un seul jour sans pour autant se soucier des besoins futurs. D'autres parts, ces données peuvent être exploitées en tant que base de départ de raisonnement pour le futur, car ces données ne prennent pas en considération les différents facteurs de variations de la production fourragère (Climat, sol, rayonnement,...) avant la date d'acquisition de l'image satellite. Ainsi, il est possible de comparer la production, prédite par le modèle, à la valeur de références de la production dans les conditions normales.

Les bases de ces calculs sont les suivants :

Bovin (UBT) :(U,4) étant un animal qui peut ingérer environ 6,25 kg de matières sèches (MS) par jour, qui équivaut à un herbivore de 250kg (poids moyen d'un bovin tropical) qui ingère environ 2,5kg de MS par 100kg de poids vif. Le résultat est donc obtenu par la conversion en Kg de la production de MS (en t/ha) disponible sur la parcelle (S,4) qui sera ensuite divisée par 6,25.

Vache laitière (UGB) : (V,4) étant un animal qui peut ingérer environ 18 kg de Matières Sèches (MS) par jour, qui équivaut à un herbivore de 600kg (unité gros bétail) qui ingère environ 3kg de MS par 100kg de poids vif. Le résultat est donc obtenu par la conversion en Kg de la production de MS (en t/ha) disponible sur la parcelle (S,4) qui sera ensuite divisée par 18.

Ovin/Caprin : (W,4) étant un animal qui peut ingérer environ 0,75 Kg de Matière Sèche par jour. Pour ce calcul, la quantité de MS est obtenue par conversion de : 1 ovin = 1 caprin = 0,12 U.B.T donc (U,4) divisé par 8,33. Dans ce calcul 1 unité de petits ruminants correspond à environ 30kg de poids vif.

8 - Indicateur (Z,4) :

Profil temporel

Des valeurs moyennes de NDVI, sur différentes parcelles de pâturage permanent, sont extraites de 38 images satellites archivées depuis les six dernières années. Ces données sont couplées avec des modèles prédictifs du rendement en MV pour prédire le rendement de chaque parcelle et retracer des courbes de disponibilité temporelle des différentes espèces de fourrage.

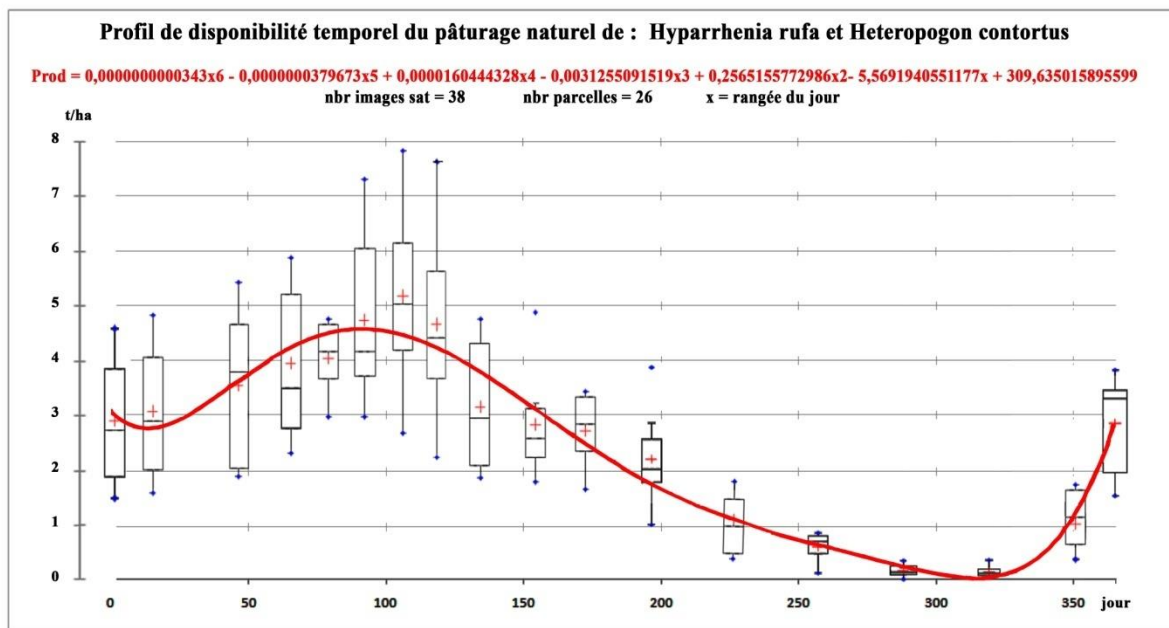


Figure 5: Courbe de biodisponibilité temporelle d'un pâturage naturel

- Profil (B. brizantha) = $(0,000000000157x^6 - 0,000000183006x^5 + 0,000008083237x^4 - 0,0015427330738x^3 + 0,0876033501056x^2 + 3,8624816239162x + 250,060070576979$
- Profil (Eleusine) = $0,0000000174x^5 - 0,0000173982x^4 + 0,0063927118x^3 - 1,0128085156x^2 + 55,3332530953x + 565,3574611889$
- Profil (Cynodon) = $0,000000000647x^6 - 0,000000059061x^5 + 0,0000176817549x^4 - 0,0014046437025x^3 - 0,1741392883359x^2 + 20,106245293431x + 729,833283226703$
- Profil (Hyparrhenia / Heteropogon) = $0,0000000000343x^6 - 0,0000000379673x^5 + 0,0000160444328x^4 - 0,0031255091519x^3 + 0,2565155772986x^2 - 5,5691940505177x + 309,635015895599$
- Profil (B. ruziziesis) = $0,0000009694x^4 - 0,0006299164x^3 + 0,0977696763x^2 + 1,0985338827x + 430,5535910089$
- Profil (Stylosanthes) = $-0,00000001x^5 + 0,00000906x^4 - 0,00271651x^3 + 0,27351727x^2 - 0,99647162x + 257,78018866$
- Profil (Aristida) = $0,0000000005298x^6 - 0,0000002957943x^5 + 0,00000980387633x^4 - 0,00104741526684x^3 - 0,06349901459423x^2 + 15,1477438625207x$

x = rang du jour dans l'année

Un système d'alerte en feu tricolore permet une aide à la décision de l'utilisateur de l'outil sur une éventuelle réorganisation de la gestion du pâturage suivant la disponibilité des ressources. La cartographie suivante illustre bien cet exemple .

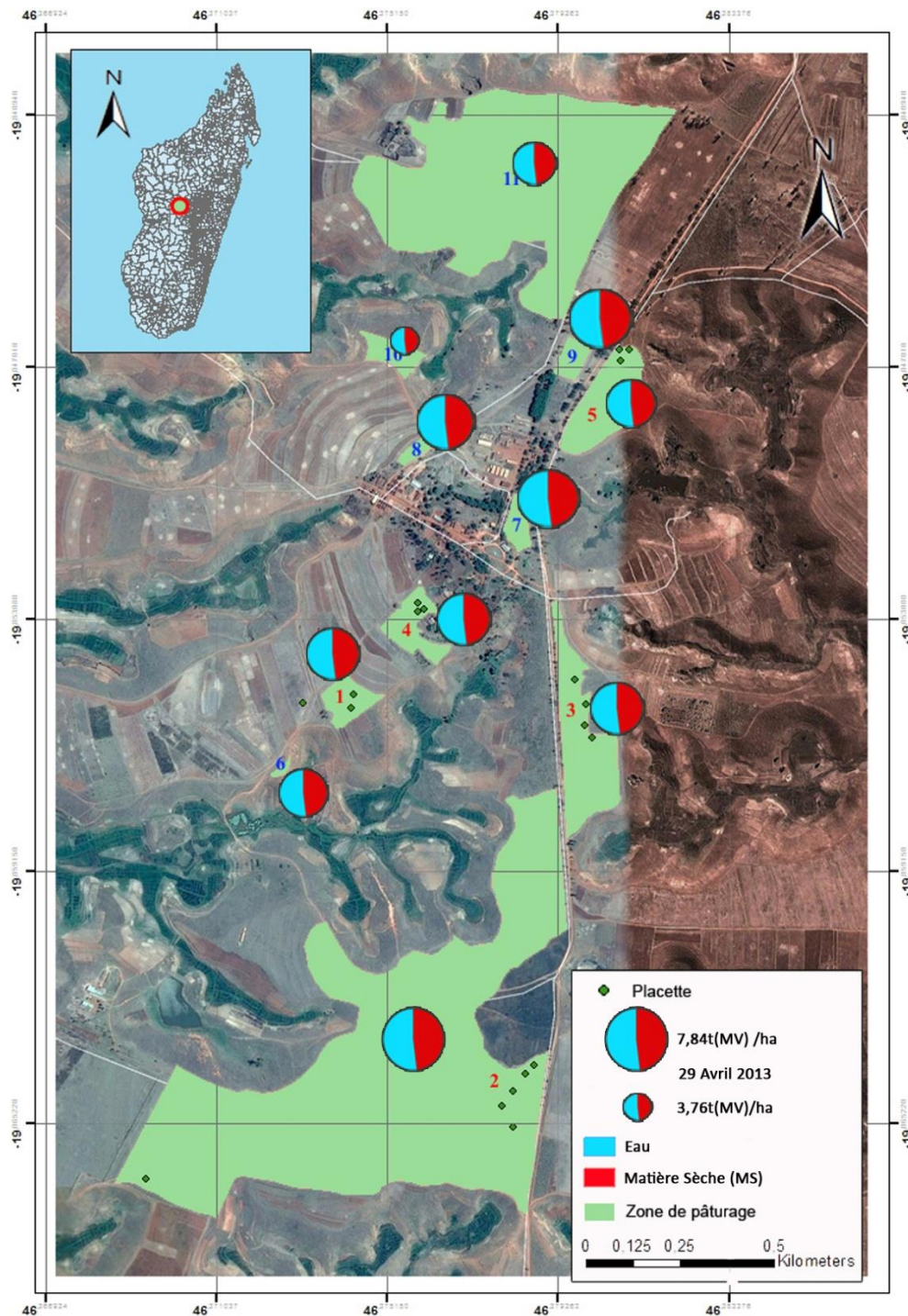


Figure 6 : Zones de pâturage de la station de Recherches "Kianjasoa" le 29 Avril 2013

Sur cette cartographie, il est à remarquer que : à la même date (29 Avril 2013) et une même espèce fourragère (*Brachiaria brizantha*), il y a une grande variabilité de la production des différentes parcelles de pâturage de 3,76t/ha à 7,84t/ha. Les sites n° 9 et n°10 illustrent bien cet exemple, car ces deux sites

ont à peu près les mêmes tailles, alors que les rendements sont totalement différents. Ces rendements sont respectivement 7,78t/ha et 3,76t/ha. Cette grande variabilité est due aux différents modes d'exploitation de ces deux sites : le site n° 10 est surexploité alors que le site n°9 est sous-exploité. A cette date, la courbe de la disponibilité temporelle du *Brachiaria* passe juste entre ces deux valeurs. Ainsi, le système d'alerte de l'outil indique la coloration verte pour le site n°9 et la coloration rouge pour le site n° 10.

Démarches de calcul :

Lors des étapes de calcul de prédiction de la production fourragère des différentes parcelles d'une même espèce sur une image satellite, il a été constaté que la majorité des valeurs du rendement des parcelles isolées (sous-exploitées) est regroupée au-dessus du 3e quartile de la boîte à moustache, contrairement à celles qui sont sur les bords des routes (surexploitées) qui sont plutôt regroupées en dessous du 1er quartile (Figure 2 et 3). Ce constat nous a permis d'élaborer des seuils pour définir l'état d'exploitation d'une parcelle après chaque prédiction.

Coloration verte : A chaque prédiction du rendement (Q,4) supérieure au 3e quartile de la boîte à moustache sur un point déterminé de la courbe, l'outil annonce une sous-exploitation de la parcelle. Cela désigne une faible pression animale qui est représentée par la coloration verte affichée dans l'outil. Pour ce faire, une courbe tendance des valeurs des rendements supérieure au 3e quartile a été retracée à partir de la courbe de disponibilité temporelle de chaque espèce fourragère présente dans les bases de données de l'outil. Ainsi, à chaque perte du rendement [à partir de la valeur de NDVI, (Q,4)] au-dessus de l'équation de cette courbe (Y,4) l'outil affiche une coloration verte (Z,4). Le vert indique que tout va bien, cependant il faut toujours faire attention, car généralement cela conduit au gaspillage de la biomasse fourragère

Coloration rouge : Sur le même principe : à l'inverse de cet événement, une prédiction du rendement inférieure au 1er quartile signifie un surpâturage de la parcelle. Les données de calcul sont :

- La date d'acquisition de l'image satellite (J&K,4) qui est traduite en rang du jour dans l'année pour référencer la production prédite par rapport à la production de référence sur la courbe de disponibilité des ressources
- Le rendement prédit (Q,4) qui dépend de la valeur de NDVI (B,4).
- L'équation de la courbe de tendance (Y,5) définissant le premier quartile de la boîte à moustache des valeurs du rendement d'une même espèce à la même date (jour et mois) durant 6 années.

Ces parcelles seront colorées automatiquement en rouge par l'outil (Z,4). Le rouge indique qu'il y a un surpâturage sur ladite parcelle et que l'on doit arrêter et/ou modérer le pâturage sur cette parcelle pour permettre la repousse végétale.

Coloration orange : Entre ces deux couleurs se trouvent les parcelles colorées en orange. Elles représentent les parcelles ayant des rendements prédits aux alentours de la courbe de référence. C'est à dire entre le premier quartile et le troisième quartile de la boîte à moustache des valeurs du rendement de référence à cette date. Cela indique qu'il y a assez de biomasses pour alimenter le cheptel, mais qu'il faut faire attention de ne pas changer les habitudes dans la conduite des troupeaux et du pâturage.

9 - Rendement annuel en Matière Sèche (AD,4):

Ce rendement est obtenu par le calcul de la moyenne entre : (i) le rendement théorique (AC,4) est déterminé par une culture mise en défend dans des enclos des différentes espèces fourragères ou récupérées à partir de la littérature (Mémento de l'agronome 1993 ; Rasambainarivo 1996 ; Klein 2014), et (ii) le rendement calculé mathématiquement (AC,5) obtenu à partir de l'intégrale de la courbe du profil de la disponibilité de la production temporelle des différentes espèces fourragères entre les bornes 1 et 365 jours.

$$= \int_1^{365} 0,0000000000343x^6 - 0,0000000379673x^5 + 0,0000160444328x^4 - 0,0031255091519x^3 + (0,256515577298x^2 + 5,5691940505177x$$

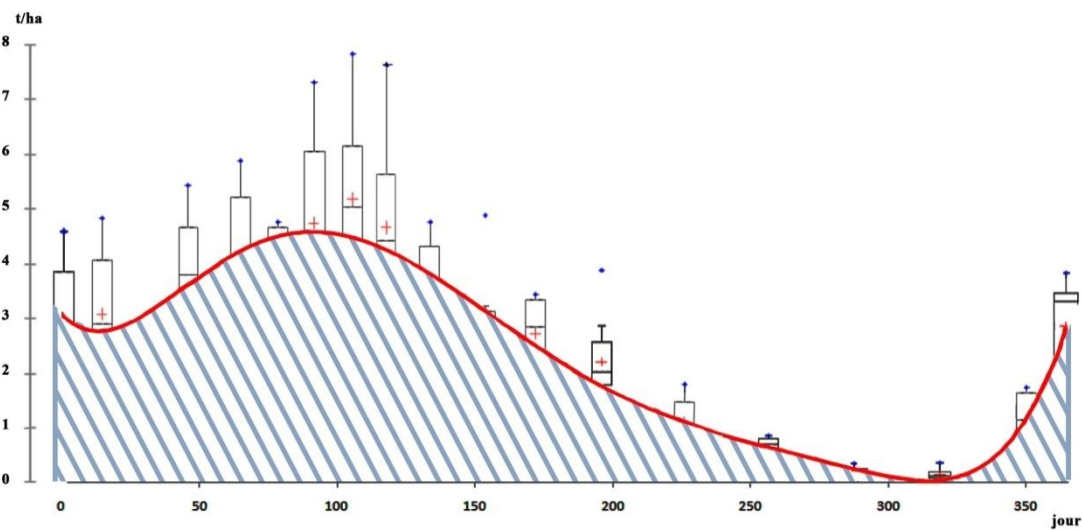


Figure 7 : intégrale de la courbe suivant les bornes 1 et 365 jours

Le rendement calculé mathématiquement est modifié à chaque acquisition d'image satellite. La saisie d'une valeur moyenne de NDVI dans l'outil (B,13), permet la prédiction du rendement (D,13). Le rendement prédit va engendrer le déplacement (translation) de la courbe de disponibilité temporelle en fonction de la valeur du rendement. L'outil va ensuite recalculer la nouvelle intégrale à partir des nouvelles données pour fournir un nouveau rendement annuel en MV qui sera ensuite convertie en MS (AC,14).

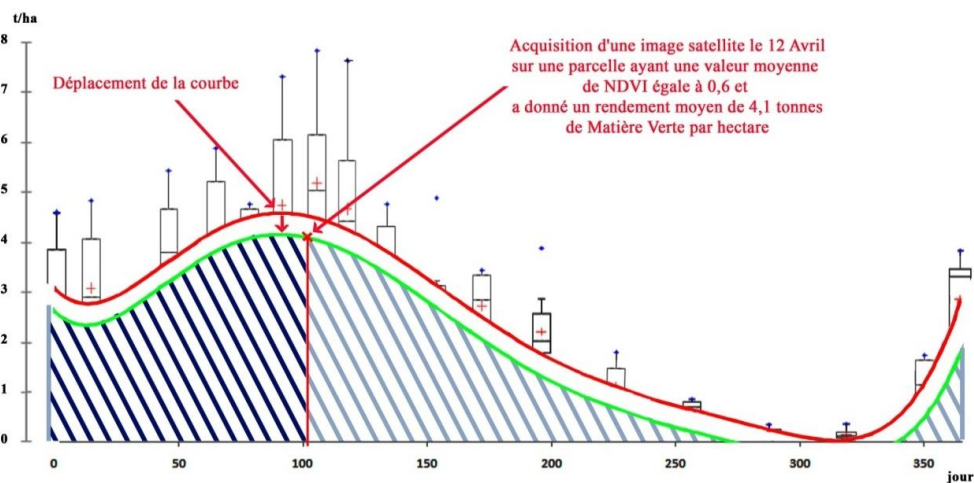


Figure 8 : Déplacement de la courbe et calcul d'une nouvelle intégrale

Rendement MS/années (AD,13)= Moyenne[(AC,13),(AC,14)]

10 - Nombre d'animaux pouvant être alimenté par la parcelle/année

La connaissance du nombre d'animaux pouvant être alimenté par une parcelle à un instant défini facilite la gestion du pâturage ou du système fourrager comme pour la prise de décision sur l'utilisation optimale des ressources.

Le taux d'utilisation (AF,4) représente le pourcentage qui détermine la quantité de fourrage disponible (Quantité de fourrage consommable "Qc") après avoir soustrait les pertes dues à divers facteurs comme les insectes ravageurs et le piétinement des animaux (Boudet, 1975).

La capacité de charge (nombre d'animaux) pour une période déterminée (ici 244 jours de disponibilité de la matière verte) est obtenue par la formule :

$$Cc/période \text{ (kg de poids vif/ha)} = \frac{Qc}{2,5} \times \frac{100}{Période}$$

11 - La capacité de charge animale et donc le nombre de tête (HA,4) divisé par la taille de la parcelle (G,4).

12 - L'option simulation permet de simuler le rendement en MV (AW,4) et en MS(AZ,4) à une date quelconque après la date initiale. Cette option est obtenue par une translation de la valeur obtenue de la date initiale à la date finale suivant les tendances des courbes de l'évolution de disponibilité temporelle de production (figure 2) et de la variation annuelle de de la teneur en MS (Figure 1).

Démarche de calcul :

Le rendement en MV prédit par la valeur de NDVI à la date d'acquisition de l'image satellite est référencé par rapport à la courbe de disponibilité temporelle de MV (Figure 5). Ainsi, à une date ultérieure de simulation, cette référence est reproduite suivant la tendance de la courbe pour produire une nouvelle valeur. Ce même principe est utilisé pour la détermination de la teneur en de MS à cette date. Le nombre d'herbivores pouvant être alimenté à cette date sera ensuite calculé.

Cependant, cette option n'est qu'un moyen qui permet d'avoir une approximation de la production fourragère sur une période de plusieurs semaines après la date d'acquisition de l'image satellite. Par ailleurs, plus la date de simulation est distante de la date d'acquisition de l'image, plus il y a une diminution de la précision de l'estimation.

Pour une contribution au développement de la recherche, le fichier Excel (Metadonnée 3C-BIOVIS) peut être demandé aux adresses suivant :

razafinarivotsiry@gmail.com

tsiry.razafinarivo@fofifa.mg

+267 34 68 897 13

