



# Estimation de la biomasse fourragère des prairies : apports du couplage entre modèles dynamiques de croissance et imagerie satellitaire : exemple de La Réunion et du Kalahari

Cyprien Alexandre

## ► To cite this version:

Cyprien Alexandre. Estimation de la biomasse fourragère des prairies : apports du couplage entre modèles dynamiques de croissance et imagerie satellitaire : exemple de La Réunion et du Kalahari. Géographie. Université de la Réunion, 2017. Français. NNT : 2017LARE0050 . tel-01882044

HAL Id: tel-01882044

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01882044>

Submitted on 26 Sep 2018

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

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

Université de La Réunion  
École doctorale sciences humaines et sociales

Thèse de Doctorat  
en Géographie

**ESTIMATION DE LA BIOMASSE FOURRAGERE DES  
PRAIRIES. APPORTS DU COUPLAGE ENTRE MODELES  
DYNAMIQUES DE CROISSANCE ET IMAGERIE  
SATELLITAIRE :**

**EXEMPLE DE LA REUNION ET DU KALAHARI**

Sous la direction de  
Pr. G. LAJOIE (Directeur)  
E. TILLARD/P. SALGADO (co-encadrants)

Présentée et soutenue publiquement par Cyprien ALEXANDRE  
Le 11 décembre 2017

Membres du jury :

Mme Frédérique SEYLER	Directrice de Recherches, IRD, Montpellier	Rapporteur
Mme Annelise TRAN	Chargée de Recherches., CIRAD, La Réunion	Rapporteur
Pr. Telesphore BROU	Professeur, Université de La Réunion	Examinateur
M. Emmanuel TILLARD	Chercheur, CIRAD, La Réunion	Co-encadrant
M. Paulo SALGADO	Chercheur, CIRAD, Madagascar	Co-encadrant
Pr. Gilles LAJOIE	Professeur, Université de La Réunion	Directeur de Thèse

## Remerciements

Je remercie en premier lieu mon directeur de thèse **Gilles Lajoie**. Il a su être présent dans les moments critiques, et je le remercie pour ses conseils avisés et la justesse des propos. Je remercie les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger ces travaux.

Je tiens à remercier mon équipe encadrante **Emmanuel Tillard** et **Paulo Salgado** ainsi que **Yvane Marble** coordinatrice du projet ARChE\_Net qui ont su voir en moi un candidat pour cette thèse. Je remercie particulièrement Emmanuel qui a été pendant toute cette thèse mon premier interlocuteur.

Je n'oublie pas les autres membres du CIRAD qui ont participé de près ou de loin à la réussite de ce travail. Merci à **Lionel Le Mezo** pour ces centaines de points GPS corrigés ! Merci à **Gisèle Morel** pour sa gestion administrative exemplaire des missions et autres accueils de stagiaires.

Je remercie également les membres de mes comités de thèse, **Gwenaëlle Pennober**, **Pierre Todoroff**, **Pascal Degenne** et encore une fois Lionel.

Je remercie l'équipe de SEAS-OI pour m'avoir accueilli les bras ouverts. Ils m'ont permis de m'ouvrir à d'autres thèmes attenants à la télédétection. J'en profite pour remercier **Aurélie Sand** pour cet accueil, ainsi que **Vincent Herbreteau**, **Christophe Révillon** et toute l'équipe OSM Réunion du côté libre de la force.

Je remercie **Joel Botai** pour son accueil au sein de l'équipe de recherche à Pretoria. Je remercie également **Sean Cullen** avec qui j'ai travaillé en Afrique du Sud. Merci pour son accueil et son aide, ainsi que pour les bons moments passés à couper de l'herbe dans la savane !

Un remerciement particulier à **Estelle**, ma colocataire de bureau avec qui j'ai partagé quotidiennement les déboires des thésards et beaucoup de cafés !

Plus personnellement je remercie bien entendu ma famille et particulièrement mes parents pour m'avoir laissé libre de mes choix qui m'ont mené jusqu'ici.

Je remercie bien évidemment les copains qui ont fait de cette aventure ce qu'elle a été : fantastique. Alors merci à **Thomas, Hugo, Mel, Nico, Juju, Agathe, Alex, Mathilde, Shannti, Romain, Damien, Arnaud...**

Enfin un merci très spécial pour Claire. Merci pour ta patience et ton soutien sans faille pendant ces 4 années. Merci de m'avoir fait confiance et quitté les pentes enneigées de tes montagnes pour me suivre sur celles du Piton des Neiges. Aujourd'hui je prends le relais !

## TABLE DES MATIERES

<b>Introduction .....</b>	<b>11</b>
<b>Partie I : La production fourragère et son contexte à La Réunion et au Kalahari.....</b>	<b>16</b>
I.    Élevage et production fourragère à La Réunion.....	17
1.    Les débuts de l'élevage moderne à La Réunion .....	17
2.    Le plan d'aménagement des Hauts : décision charnière dans le développement de l'élevage réunionnais .....	21
3.    L'élevage aujourd'hui à La Réunion .....	23
II.    Élevage et production fourragère en Afrique du Sud .....	27
1.    Localisation du Kalahari.....	27
2.    L'élevage en Afrique du Sud et dans le Kalahari. ....	28
III.    Des environnements de production très contrastés.....	30
1.    Géologie.....	30
2.    Climat .....	33
3.    Espèces de graminées .....	37
4.    Production fourragère : conclusion.....	43
<b>Partie II : Estimation de la biomasse fourragère et télédétection.....</b>	<b>44</b>
I.    Utilisation de la télédétection dans l'estimation de la biomasse fourragère .....	45
1.    La télédétection.....	45
2.    L'imagerie multi-spectrale pour l'estimation de biomasse à l'échelle d'un territoire	
47	
II.    Imagerie multi-spectrale pour le suivi de biomasse .....	50
1.    Modèles empiriques.....	50
2.    Approche couplage .....	51
<b>Partie III : Matériel et méthodes .....</b>	<b>56</b>
I.    Les sites d'étude .....	57
1.    La Réunion.....	57
2.    Kalahari .....	58
II.    Les données terrestres.....	61
1.    Données météorologiques.....	61
2.    Mesures sur les parcelles.....	61
III.    Les données satellitaires .....	65
1.    Données Spot5 .....	65
2.    Données Sentinel-2 .....	66

3. Les indices utilisés .....	67
IV.    Les modèles de croissance.....	68
1. Module prairial du modèle GAMEDE.....	68
2. Modèle de croissance tropical.....	70
V.    Le couplage.....	73
1. Les méthodes de couplage utilisées.....	73
2. Calcul de l'erreur .....	73
3. Modélisation sous Ocelet.....	74
<b>Partie IV : Résultats et Discussion.....</b>	<b>77</b>
I.    Phase exploratoire .....	78
1. Modèle empirique d'estimation de biomasse avec SPOT5 .....	78
2. Estimation du LAI à partir des images SPOT5take5.....	81
3. Cas particulier de l'Afrique du Sud .....	85
II.    Estimation de la biomasse et du LAI à partir des images Sentinel-2 .....	87
1. Ajustement des modèles empiriques de biomasse et LAI en fonction du NDVI .....	87
2. Estimation par l'algorithme « <i>biophysical processor</i> ».....	93
III.    Couplage des modèles de croissance .....	94
1.1. Adaptation du modèle tropical.....	94
1.2. Couplage des modèles avec le LAI issu de la relation empirique avec le NDVI ..	98
1.3. Couplage des modèles avec le LAI issu du « <i>biophysical processor</i> » .....	100
1.4. Analyse des résultats.....	101
IV.    Forçage et visualisation spatiale du modèle .....	107
<b>Partie V : Conclusion .....</b>	<b>111</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>115</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>131</b>

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Évolution de la part d'emplois de chaque secteur de 1954 à 2013. Source INSEE ..	20
Figure 2. Délimitation des Hauts de La Réunion selon Bertile 1978-1987. Fond cartographique OSM. ....	21
Figure 3. Illustration des trois zones définies par le Plan d'Aménagement des Hauts. Une parcelle de fauche à Saint-Joseph et des parcelles de fauche et de pâture dans les Hauts de l'ouest et la Plaine des Cafres. ....	22
Figure 4. Évolution du nombre d'exploitation et de la SAU de 1989 à 2013. Source Agreste : Enquête sur la structure des exploitations 2013, Recensements agricoles 1989, 2000, 2010..	24
Figure 5. Répartition des parcelles classées comme prairie ou fourrage selon la base d'occupation du sol 2014 de la DAAF .....	26
Figure 6. Localisation du Bassin du Kalahari suivant Thomas (1991) .....	27
Figure 7. Paysages du Kalahari et ses animaux d'élevage. Ici un springbok, ovins et bovins.	29
Figure 8. Cartographie des pentes de La Réunion. Source MNT Litto3D .....	31
Figure 9. Carte morpho-pédologique de La Réunion d'après (Raunet, 1988).....	32
Figure 10. Normales mensuelles des Hauts de l'Ouest de 1981 à 2010 (station Colimaçons). Source Météo France.....	34
Figure 11. Normales mensuelles de la Plaine des Cafres de 1981 à 2010 (station Plaine des Cafres). Source Météo France .....	34
Figure 12. Précipitations et températures moyennes annuelles à La Réunion. Source Météo France .....	35
Figure 13. Images fausses couleurs Sentinel2 en saison sèche (a) et en saison des pluies (b)	36
Figure 14. Historique des précipitations et températures moyennes par mois entre 1991 et 2015 sur le lieu d'étude. Source(University Of East Anglia Climatic Research Unit et al., 2017).....	37
Figure 15. Schéma de répartition des graminées à La Réunion .....	38
Figure 16. Spectre du rayonnement solaire .....	46
Figure 17. Courbe de réflectance d'une feuille dans le visible et l'infrarouge .....	47
Figure 18. Schéma simplifié des processus d'un modèle de croissance. D'après Delécolle et al. (1992) .....	53

Figure 19. Schéma des différentes méthodes de couplage entre modèle de croissance et données de télédétection : (a) calibration, (b) forçage, (c) réajustement. (adapté de Dorigo et al., 2007).....	55
Figure 20. Localisation des parcelles d'étude à La Réunion .....	57
Figure 21. Localisation des sites d'étude du Kalahari, Afrique du Sud .....	59
Figure 22. Localisation des stations météorologiques utiles à l'étude à La Réunion .....	61
Figure 23. Etape du protocole d'échantillonnage sur la parcelle à La Réunion .....	62
Figure 24. Schéma du modèle GAMEDE issu de Vayssières et al. (2009) .....	68
Figure 25. Extrait de code Ocelet permettant de définir l'entité correspondante à l'image et sa relation avec les parcelles.....	76
Figure 26. Modèle exponentiel ajusté entre LAI et NDVI à partir des images SPOT5take5 ..	83
Figure 27. Evolution du LAI sur une parcelle tempérée entre les mois d'avril et aout, à partir d'images SPOT5take5. ....	84
Figure 28. Biomasse fraîche en fonction du NDVI et du SAVI calculés à partir de SPOT5...	85
Figure 29. Régression linéaire biomasse~LAI ( $B=5,78 \cdot LAI + 0,83$ ; RMSE=0,91) .....	86
Figure 30. Ajustement du modèle empirique entre la biomasse et le NDVI .....	88
Figure 31. Relation empirique entre la biomasse et le LAI mesuré .....	90
Figure 32. Ajustement du modèle empirique entre LAI et NDVI .....	91
Figure 33. Relation entre le LAI mesuré et le LAI estimé par l'algorithme « biophysical processor ».....	93
Figure 34. Évolution de la matière sèche disponible réelle et estimée sans couplage (P1) pour les parcelles tropicales. Pierrefonds (a), Saint-Joseph (b), Mont-Vert (c), Le Tampon (d)....	97
Figure 35. Évolution de la matière sèche disponible réelle et estimée sans couplage (P1) pour les parcelles tempérées (Bourg-Murat). Sicalait (a), Picard (b).....	99
Figure 36. Évolution de la biomasse sur les parcelles de Pierrefonds (a), Saint-Joseph (b), Mont-Vert (c), Le Tampon (d), Sicalait (e), Pl des Cafres (f), après le forçage par le LAI <sub>BP</sub> . .....	103
Figure 37. Résultats de l'ANCOVA déterminant les variables influentes sur le pourcentage de RMSE .....	104
Figure 38. Pourcentage d'erreur des simulations en fonction du nombre de forçages, du jour de forçage moyen et du jour du premier forçage.....	104
Figure 39. Capture d'écran de la visualisation d'un fichier KML en sortie d'Ocelet. Exemple sur la Commune du Tampon et une station météorologique qui diffuse ses données. Simulation de mai à juin 2017.....	108

Figure 40. Exemple de deux parcelles de Bourg-Murat comportant une incompatibilité avec notre étude .....	110
---	-----

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Évolution du cheptel de bovins entre 1989 et 2012. Source DAAF La Réunion - Recensements agricoles.....	24
Tableau 2. Taux de couverture du marché local par les productions en frais et global (frais, transformé, congelé) en 2016. Source DAAF La Réunion - Agreste. .....	25
Tableau 3. Graminées cultivées en prairie à La Réunion. Source images Global Plants.....	39
Tableau 4. Espèces de graminées identifiées lors des phases d'échantillonnage dans le Kalahari. Source des images Global Plants.....	41
Tableau 5. Indices spectraux utilisant les bandes rouge, proche et moyen-infrarouge .....	49
Tableau 6. Inventaire floristique à dire d'expert sur les parcelles d'étude.....	58
Tableau 7. Inventaire non-exhaustif des espèces de graminées présentes sur le site d'étude du Kalahari, Afrique du Sud .....	60
Tableau 8. Caractéristiques du capteur HRG du satellite SPOT5 (Source Airbus) .....	66
Tableau 9. Caractéristiques techniques des quatre bandes à 10m de résolution Sentinel-2 (Source ESA).....	66
Tableau 10. Relation entre biomasse fraîche et NDVI à partir des images SPOT5 .....	79
Tableau 11. Statistiques descriptives des mesures de LAI effectuées au champ .....	81
Tableau 12. Relations entre le LAI et les différents indices de végétation calculés à partir des images SPOT5take5 .....	82
Tableau 13. Coefficient de corrélation et RMSE des modèles empiriques de biomasse et LAI avec le NDVI.....	92
Tableau 14. Variables optimisées grâce au logiciel Vensim.....	95
Tableau 15. RMSE (kg.MS/ha) du modèle tropical brut, sur les quatre parcelles tropicales. La parcelle du Tampon ne comporte qu'un unique cycle. ....	95
Tableau 16. RMSE (kg.MS/ha) du modèle tempéré brut, sur deux cycles de pousse en parcelles tempérées. ....	98
Tableau 17. RMSE (kg. MS/ha) de la prédition des modèles tropical et tempéré dans le cadre d'un réajustement (P2) et d'un forçage (P3) avec des valeurs de LAI <sub>E</sub> .....	100
Tableau 18. RMSE (kg. MS/ha) de la prédition des modèles tropical et tempéré dans le cadre d'un réajustement (P4) et d'un forçage (P5) avec des valeurs de LAI <sub>BP</sub> . ....	100
Tableau 19. Comparaison paire à paire des différentes méthodes de couplage avec le modèle brut .....	101

Tableau 20. Tableau récapitulatif des résultats des simulations des modèles tropical et tempéré .....	106
---	-----

## **Introduction**

Nous observons dans les pays de l'océan Indien une grande variabilité de la production de fourrage utilisé par les systèmes d'élevage de ruminants à des échelles différentes de temps et d'espace. Ces variations sont tant saisonnières qu'interannuelles et sont liées à la combinaison des différents climats, sols et pratiques culturelles.

Depuis les années 1970, nous observons une variabilité climatique qui impacte directement la production de fourrage (Sejian *et al.*, 2015; Shaw *et al.*, 2011). La saisonnalité du climat est très marquée dans la région de l'océan Indien. Durant l'hiver austral, de mai à octobre, les précipitations se font rares et les températures baissent mais restent douces. A l'inverse durant l'été austral, de novembre à avril, les températures augmentent et les précipitations sont plus abondantes. C'est aussi à cette saison que nous observons la formation des cyclones, événements extrêmes pouvant apporter de fortes quantités de précipitations en un temps réduit. Lorsque nous nous intéressons aux prévisions météorologiques à long termes dans l'océan Indien nous constatons un réchauffement de l'été austral, avec une augmentation de la fréquence des fortes pluies ainsi que d'épisodes cycloniques. L'été austral se prolongera plus tard dans l'année. Pendant l'hiver le déficit en eau sera plus marqué avec une baisse globale des précipitations durant cette saison (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat *et al.*, 2013; « Le changement climatique à La Réunion », 2013). Cette variation saisonnière du climat implique généralement un déficit fourrager durant l'hiver qu'il faut combler. Les prédictions à la baisse des précipitations font craindre un déficit plus conséquent ces prochaines années.

La variabilité de la production fourragère trouve aussi sa source dans des problématiques plus agronomiques et à toutes les échelles. Les différences de composition et de structure des sols impliquent une gestion de l'élevage et des rendements différents suivant le contexte local. À l'échelle régionale, cela se traduit par des différences de pratiques d'élevage entre les pays de l'océan Indien.

Dans la zone du Kalahari en Afrique du Sud, le sol est sableux et ne permet pas de stocker l'eau. Durant l'hiver le fourrage se fait donc rare. La pratique d'élevage est en conséquence extensive pour offrir une quantité suffisante de nourriture pour le bétail.

A l'inverse, le caractère insulaire de La Réunion, ainsi que son relief volcanique, repoussent l'élevage dans des zones escarpées qui ne sont pas adaptées à d'autres cultures. Les andosols, caractéristiques de milieux volcaniques, sont très fragiles et perdent une partie de leur fertilité si les pratiques culturelles ne sont pas adéquates.

L'insularité implique par ailleurs des coûts d'importation de fertilisants. Nous observons donc dans le même temps une baisse de l'apport de fertilisant sur les sols. L'apport est aussi variable très localement d'une parcelle à l'autre en fonction de la capacité de l'exploitation à absorber les coûts générés par l'achat.

Ces variations temporelles et géographiques des conditions de production agricole entraînent des différences de production certaines de fourrage. L'alimentation constitue bien souvent la première contrainte dans l'élevage de ruminants (Ali *et al.*, 2016). Si certaines contraintes sont propres aux territoires, tous font face à un changement plus global auquel il est nécessaire d'apporter une solution.

Appelée à se développer dans un environnement changeant et incertain avec des jeux de contraintes de plus en plus marquées, l'adaptation des systèmes d'élevage requiert de produire des connaissances et des modèles nouveaux. Plusieurs initiatives (réseaux, projets, séminaires, etc.) d'étude de l'impact du changement climatique sur les systèmes d'élevage ont été mises en œuvre ou sont en préparation dans plusieurs régions du monde. Le réseau ARChE\_Net (Adaptation des systèmes d'élevage de Ruminants aux Changements Environnementaux) dans lequel est développé ce projet de thèse, est une de ces initiatives à l'échelle de l'océan Indien (OI). Le réseau ARChE\_Net rassemble vingt-quatre organismes de recherche, d'encadrement, d'enseignement et des filières de production dans sept pays de la région océan Indien (Afrique du Sud, Australie, Inde, Madagascar, Mozambique, Union des Comores, Ile de La Réunion).

L'objectif général du projet ARChE\_Net est de définir des stratégies pour gérer l'adaptation des systèmes d'élevage de ruminants aux changements agro-écologiques et socio-économiques.

Parallèlement plusieurs solutions s'organisent déjà en fonction des caractéristiques des régions de culture. En Afrique du Sud, l'élevage extensif et les techniques de forage profonds permettent de subvenir aux besoins d'alimentation du bétail. À La Réunion, afin de gommer le déficit saisonnier sur un territoire où le foncier agricole se réduit de plus en plus, les éleveurs pratiquent le report fourrager. Le foin produit dans les bas de l'île toute l'année permet de complémenter la ration alimentaire des hauts pendant l'hiver. Dans les hauts la pratique de l'ensilage permet de conserver l'excès durant l'été afin de le redistribuer l'hiver. Cette dernière technique est généralement utilisée à l'échelle de l'exploitation. La Réunion profite aussi de sa prédisposition pour la culture de la canne afin de valoriser ses résidus de production. Elle est utilisée comme substitut au fourrage classique durant l'hiver et est aussi utilisée récemment sous forme d'ensilage. Nonobstant, tous ces moyens ne suffisent pas et

l'importation de ressources fourragères reste nécessaire. Elle se pratique à l'échelle régionale ou locale, engendrant des difficultés financières importantes.

Les solutions pour améliorer la production fourragère peuvent être optimisées. Nous pouvons mieux répartir la charge animale sur les parcelles. Nous pouvons mieux repartir les excédents de fourrages géographiquement. Nous pouvons réduire les coûts d'importation de fourrage en prévoyant les pénuries. La meilleure gestion de la biomasse fourragère herbacée passe par une estimation et une prédiction du fourrage disponible.

Il devient donc indispensable dans les zones d'élevage d'évaluer la production fourragère tout au long de l'année et sur le long terme afin de pouvoir gérer au mieux la variabilité spatio-temporelle de la production de biomasse fourragère (excédent vs déficit) et de sécuriser la production de ces systèmes.

Cette nécessité s'est traduite dans les objectifs du projet ARChE\_Net en intégrant un axe sur la création et la mise à disposition d'outils de diagnostic et de gestion des systèmes d'élevage. C'est ce point qui a motivé le sujet de la thèse ciblée sur l'élaboration d'un outil capable d'anticiper les périodes de déficits fourrager.

De l'échelle ultra locale sur la parcelle jusqu'à celle du territoire, il existe plusieurs méthodes d'estimation de la biomasse fourragère. La biomasse fourragère se définit comme une masse de matière fraîche (MF) ou matière sèche (MS). Elle sera ici exprimée en kg.MS/ha. La mesure la plus élémentaire se fait au champ. Nous procédons à un échantillonnage d'une parcelle avec un nombre défini de mesures devant être représentatives de la parcelle. Une fois pesée, nous obtenons une estimation de la biomasse fraîche disponible (sèche après passage dans une étuve). Cette méthode est la base de toutes les autres méthodes d'estimation de la biomasse. Nous pouvons lier cette mesure de biomasse à des indicateurs appelés indices de végétation issus d'image par drones à l'échelle locale mais aussi d'images satellites à l'échelle d'un territoire. En créant ce lien, il est possible de l'appliquer sur toutes les parcelles d'un territoire afin d'en connaître le disponible fourrager à un instant donné.

À l'échelle territoriale, les systèmes d'alerte précoce (LEWS – *Livestock Early Warning System*) permettent d'alerter d'une baisse de la biomasse disponible en se basant sur un instantané de l'état de la végétation. Ils s'appuient sur des données satellites optiques et météorologiques pour donner l'état du développement fourrager chaque jour. Cette donnée est comparée avec un historique de plusieurs années pour évaluer le risque de déficit. Si ces

méthodes peuvent informer sur la biomasse disponible elles ne permettent pas de prédire sa quantité à court ou moyen terme.

Depuis les années 1960, ce sont les modèles de croissance des plantes qui sont le plus utilisés. Toutes les connaissances acquises sur le fonctionnement biologique sont transcrites en équations déterministes. En fonction de données environnementales (pluviométrie, température, rayonnement etc.) et de paramètres relatifs à la zone étudiée (type de sol, espèce etc.) ils permettent de prédire la biomasse disponible à l'hectare. Il est aussi possible, en fonction de scenarii, de prédire avec précision à court ou moyen terme la biomasse. Cette méthode est difficilement mobilisable sur un territoire entier. Les paramètres très variables géographiquement impliqueraient une réelle complexification du modèle.

L'objectif de cette thèse est d'étudier la possibilité de création d'un outil permettant l'estimation et la prédiction de biomasse dans des conditions de culture très variables. Il pourrait ainsi être utilisé sur une succession de terrains très différents. Pour cela, a été explorée la possibilité de coupler des données satellites touchant un territoire entier à un modèle de croissance permettant une prédiction de la croissance prairiale. Des terrains très différents, mais tous les deux soumis à des contraintes de variabilité du fourrage, ont été sélectionnés. La partie sud-africaine du Kalahari, désert semi-aride et La Réunion, territoire insulaire de l'océan Indien.

Nous détaillerons dans une première partie du document les différentes sources de variabilité de la production fourragère qui caractérisent les deux terrains d'étude. Un état de l'art sur les méthodes de prédiction de la biomasse à l'aide de télédétection permettra de situer les capacités de l'outil. Enfin, après une partie détaillant les protocoles et les données utilisées nous examinerons les résultats obtenus et les comparerons avec d'autres études similaires. Enfin une dernière partie permettra de conclure sur les travaux effectués et d'envisager les perspectives qu'ils permettent d'ouvrir.

## **Partie I : La production fourragère et son contexte à La Réunion et au Kalahari**

## I. Élevage et production fourragère à La Réunion

### 1. Les débuts de l'élevage moderne à La Réunion

Depuis l'introduction des premiers animaux au 17<sup>ème</sup> siècle, l'élevage s'est développé graduellement sur l'île.

Si l'on remonte aux origines, on constate que l'élevage à La Réunion est antérieur au peuplement permanent et définitif de l'île que l'on arrête classiquement à 1663. Cette date correspond à l'arrivée de Louis Payen, Français vivant à Fort-Dauphin depuis 1856 et qui débarque en baie de Saint-Paul en compagnie d'un compatriote et de dix Malgaches dont trois femmes.

En effet, comme le rappelle J-M. Jauze dans son mémoire sur « l'élevage à La Réunion » (Jauze, 1986), un document extrait de l'ouvrage d'Albert Lougnon<sup>1</sup> précise :

« En cette année mil six cent quarante-neuf, j'y ai placé (dans l'île) quatre génisses et un taureau afin d'y multiplier, et en l'année mil six cent cinquante-quatre, j'y ai envoyé autant, lesquelles on trouva qu'elles s'étaient multipliées jusqu'à plus de trente. J'ordonnais au Capitaine Roger Le Bourg d'en prendre une seconde fois possession de ma part au nom de sa Majesté, d'y poser les armes du Roi et de la nommer Île Bourbon ».

Ce témoignage rare extrait d'un rapport rédigé par Flacourt -Gouverneur de Fort-Dauphin- confirme qu'il était courant d'utiliser les petites îles comme des garde-manger depuis l'époque des Grandes Découvertes en déposant du bétail qu'on laissait se reproduire librement afin de disposer de viande fraîche lors des escales qui ponctuaient les longues traversées océaniques.

Bien que s'agissant de reproduction d'un bétail apporté par l'homme, on peut considérer que cette configuration ne renvoie évidemment pas aux formes « modernes » de l'élevage qui se structureront bien plus tard à La Réunion.

En effet, c'est seulement vers le milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle après l'abolition de l'esclavage à La Réunion (20 décembre 1848) qu'on assiste pour la première fois à un effort de planification économique à l'échelle de l'île à des fins de sécurité alimentaire. Cet effort de planification incité par les décisions du Gouverneur Doret en 1851 aura des conséquences directes sur la structuration des systèmes d'élevage à La Réunion. Le Gouverneur arrête alors des mesures

---

<sup>1</sup> LOUGNON A. *Sous le signe de la Tortue : voyage ancien à l'île Bourbon 1611-1725*, Orphie, 2006.

initiatives pour accélérer la colonisation des « Plaines » -Plaine des Cafres et Plaine des Palmistes- afin de tenter de fixer une population de « petits blancs » pauvres et de nouveaux affranchis qui tentent difficilement de survivre. Incitant à la diversification agricole et au développement des cultures vivrières et fourragères face au modèle de la monoculture de la canne à sucre, le gouverneur Doret prévoit l'installation d'un centre d'élevage à la Plaine des Cafres grâce à des concessions de terres gratuites à la condition qu'elles donnent lieu à une installation pérenne de plus de quatre années. Au total, 990 hectares furent distribués à La Plaine des Cafres avec des surfaces importantes réservées par ailleurs au pâturage commun. Comme le rappelle J-M. Jauze (Jauze, 1986), « les concessionnaires devaient dès la première année, entretenir du bétail, construire des étables et clôturer leurs concessions », ce qui correspond finalement à l'avènement d'une véritable filière d'élevage de ruminants à La Réunion. Notons cependant une grande différence avec « l'élevage moderne » et qui concerne la destination de la production animale de ruminants. En effet, si les ruminants et leur production de lait étaient utilisés pour la consommation humaine, leur destination première renvoyait au travail de la terre et au déplacement des hommes. Cet élevage visait donc prioritairement la traction animale, la fameuse « charrette bœufs » étant jusqu'au XX<sup>ème</sup> siècle l'unique moyen de transport présent sur l'île pour les personnes et les marchandises, à commencer par la canne à sucre à transporter du champ à l'usine.

S'agissant du dénombrement des ruminants sur l'île tout au long de cette histoire, force est de constater que les données sont lacunaires. Jean Defos Du Rau, auteur de la première grande thèse de géographie humaine consacrée à La Réunion (Defos Du Rau, 1960) souligne que « sur les effectifs du troupeau réunionnais, on n'a jamais possédé que des chiffres assez fantaisistes. Maillard parle en 1660 de 5600 bovins et 60 000 porcs. En 1887, il y aurait eu 8400 bovins et 15 000 ovins. En fait, le seul document officiel récent était celui du recensement de 1943 qui faisait état de 49 313 bovins dont 27 964 vaches laitières, 6080 ovins, 24 686 caprins, 102 000 porcins et 841 chevaux, 771 ânes et de la volaille dans toutes les cases ».

S'agissant des perspectives de la filière élevage à La Réunion, le même auteur cité par Jauze (Jauze, 1986) portait un regard particulièrement noir en concluant ainsi son chapitre sur l'élevage à La Réunion : « Espérer aménager dans l'île d'immenses et riches pâturages dans les Hauts, transformer en vertes prairies les steppes du littoral sous le vent, peuvent dès lors sembler des vues de l'esprit. L'élevage restera un élevage de petits exploitants (...). Un réseau de distribution fournissant du lait frais à toute la population semble pour le moment exclu, à moins

que l'élevage extensif de vaches laitières finisse par devenir plus rentable même que la culture de la canne ».

L'histoire récente de l'élevage à La Réunion sera le théâtre d'une transformation de la perception du potentiel des Hauts. Suite à la mécanisation importante dans les années 60, les animaux de trait sont remplacés et le cheptel diminue fortement passant de 49 313 bovins en 1943 à 17 730 en 1973. Le secteur de l'élevage se professionnalise. En 1960, la Coopérative des éleveurs de la Plaine des Palmistes est créée. L'accent est mis sur la production de lait. Dans cette lancée, la SICALAIT voit le jour en 1962 ainsi que l'implantation à La Réunion de l'IRAT (Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et cultures vivrières) qui sera plus tard intégré au CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) avec d'autres instituts de recherche tropicaux français.

Au début des années 1970, le prix de la viande augmente en Europe, et Madagascar préfère exporter sur le continent, destination plus rentable que La Réunion. Un déficit important se fait alors sentir sur l'île et l'accent est porté sur la production de viande. En 1974, 90% de la consommation est assurée par les importations. Un plan sur dix ans est alors encadré par la future SICAREVIA (Coopérative SICA REunion VIAnde) ainsi que par la SEDAEEL (Société d'Etudes de Développement et d'Amélioration de l'Elevage) pour la production de géniteurs. Une forte volonté largement soutenue par les pouvoirs publics permet le développement des filières de production. Mais ce développement soutenu est rattrapé par la croissance démographique du littoral qui va accentuer les déséquilibres entre le pourtour et le centre du territoire. Le littoral voit se développer une classe moyenne travaillant dans les administrations et le tertiaire qui tranche radicalement avec la petite agriculture de l'intérieur de l'île (Figure 1).

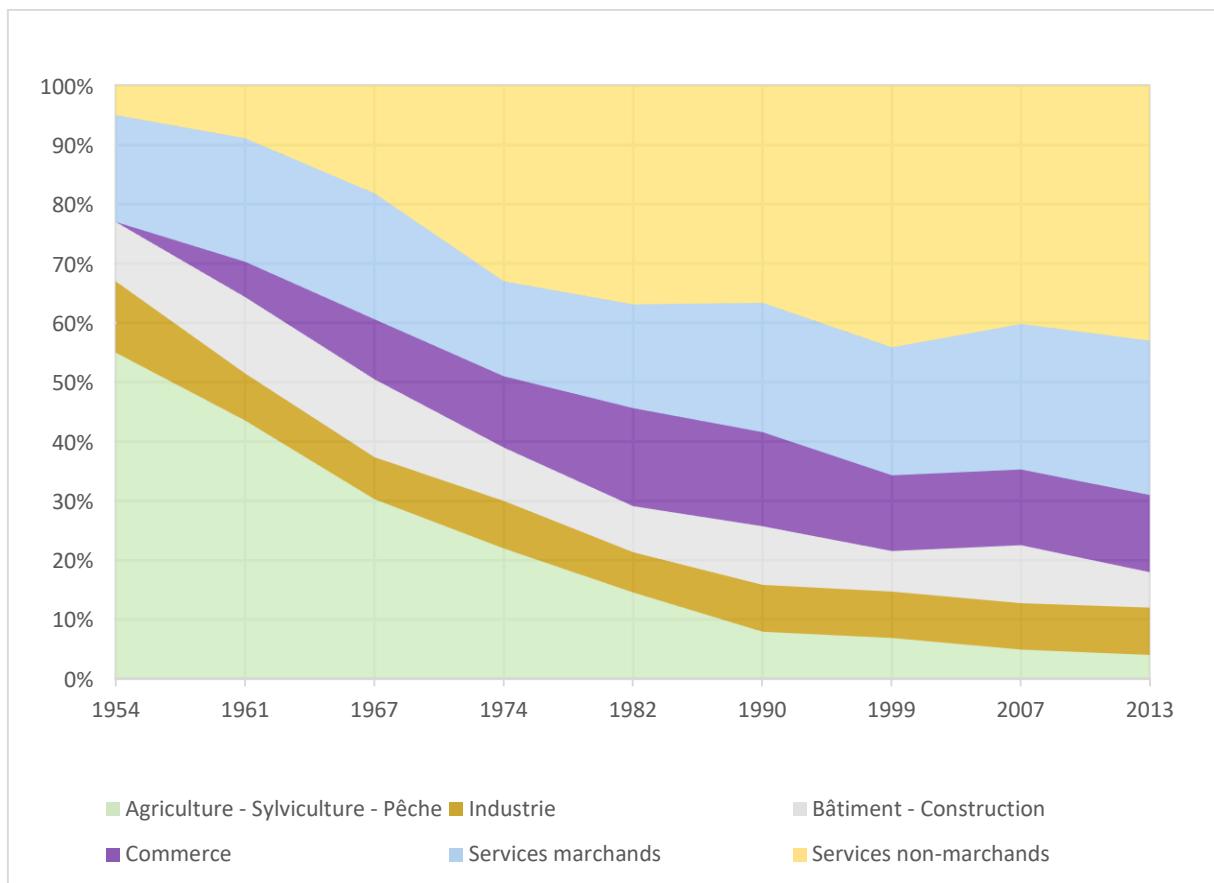


Figure 1. Évolution de la part d'emplois de chaque secteur de 1954 à 2013. Source INSEE

À la fin des années 1970, une volonté nette vise à rééquilibrer l'usage du territoire. En effet, la population réunionnaise se développe sur le littoral, en particulier à l'ouest entre Saint-Denis au nord et Saint-Pierre au sud, où sont regroupés 70% des entreprises industrielles, 65% du tertiaire, 75% des importations, 84% des établissements financiers et 80% du produit touristique (Jauze, 1998). D'un point de vue agricole, depuis la colonisation, les Bas de l'île sont consacrés à la culture de la canne à sucre, jusqu'à 600m d'altitude. La population vivant à l'intérieur de l'île se trouve de plus en plus marginalisée, tant géographiquement que financièrement. La culture du géranium, alors très développée dans les Hauts, n'est plus rentable face à l'industrialisation. Un exode rural se met en place mais le secteur tertiaire qui se développe sur la côte ne permet pas d'absorber cette population qui n'est pas en adéquation avec la demande. Dès 1974, un programme de développement de l'élevage bovin vise à réduire cette différence entre les Hauts et les Bas tout en exploitant des zones montagneuses peu propices aux cultures et en valorisant les résidus de la canne pour l'alimentation des animaux.

## 2. Le plan d'aménagement des Hauts : décision charnière dans le développement de l'élevage réunionnais

La définition des Hauts de La Réunion est assez floue. Les Hauts, encore aujourd'hui, ne disposent pas de toponymie sur les cartes. Pourtant, cette entité utilisée dans le cadre administratif nécessite une délimitation précise. En 1978, la définition des Hauts par Bertile<sup>2</sup> coïncide avec cette nouvelle tendance à vouloir présenter les Hauts comme une terre profitable à l'économie de La Réunion (Figure 2). Sa délimitation s'appuie sur des critères climatiques, « ethniques » ou encore économiques avec la culture de la canne (Jauze, 2011). Il s'alignera pour finir sur la définition du PAH<sup>3</sup> (Programme d'Aménagement des Hauts), et sa vision est présentée dans un ouvrage et un article en 1978 et 1987. C'est cette délimitation des Hauts qui sera la base géographique des actions publiques de l'État pour l'aménagement des Hauts.

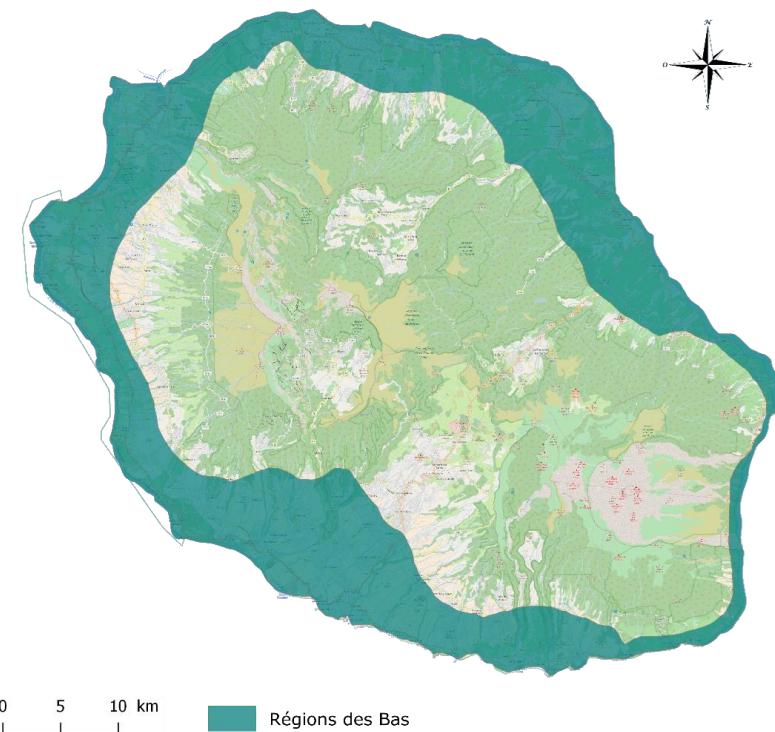


Figure 2. Délimitation des Hauts de La Réunion selon Bertile 1978-1987. Fond cartographique OSM.

<sup>2</sup> Bertile W. « Les Hauts de La Réunion, étude géographique ». *Cahier du Centre Universitaire de La Réunion*. 1978. Vol. 9, p. 16-67.

Bertile W. « Les“Hauts” de La Réunion ». Dans : *La Réunion, atlas thématique et régional*. Saint-Denis, 1987. p. 130-137.

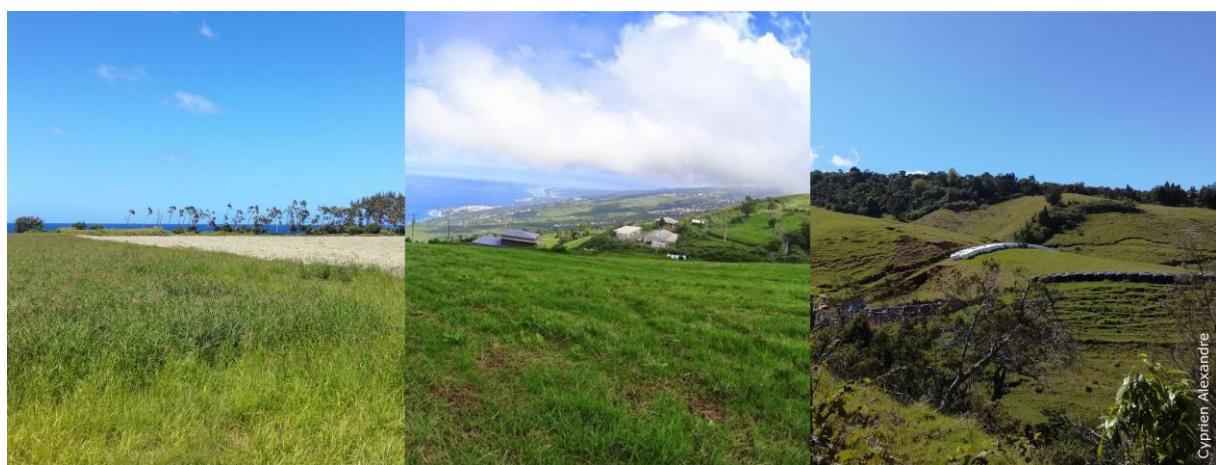
<sup>3</sup> Préfecture de La Réunion, *Programme général d'aménagement des Hauts de La Réunion, étude préliminaire* 1976

En 1976, les Hauts sont classés en zone spéciale d'action rurale et le Plan d'aménagement des Hauts voit le jour. Il est porté par le Commissariat à la rénovation rurale, aujourd'hui Secrétariat Général des Hauts (depuis 2014). Il propose des axes de développement définis à partir d'une analyse profonde des caractéristiques géographiques et humaines du territoire. Il se veut comme un programme global de développement basé sur trois orientations prioritaires.

- L'intensification de la culture du géranium rosa ainsi que la diversification des cultures vivrières et de l'arboriculture ;
- Le développement de l'élevage bovin semi-intensif ou extensif au-dessus de 100m ;
- La poursuite du reboisement d'essences tropicales pouvant valoriser les fortes pentes propices à la mise en valeur agricole.

Par le choix de la filière bovine comme axe stratégique du développement des Hauts, le plan d'aménagement va donner un réel coup d'accélérateur à l'élevage bovin réunionnais. Il permet de mettre en avant les contraintes qui peuvent devenir un atout pour son implantation. Les fortes pentes ne permettent pas de développer une activité agricole d'un autre type. Le déficit hydrique observé à l'ouest ne permettra pas une diversification des cultures. Le plan d'aménagement défini alors trois zones qui sont effectives aujourd'hui illustrées Figure 3 :

- En dessous de 1 000 m : la zone des petites exploitations ;
- Entre 1 000 et 1 500 m « sous le vent » : la zone des élevages semi-intensifs ;
- Au-dessus de 1 500 m : la zone de l'élevage semi-extensif.



*Figure 3. Illustration des trois zones définies par le Plan d'Aménagement des Hauts. Une parcelle de fauche à Saint-Joseph et des parcelles de fauche et de pâture dans les Hauts de l'ouest et la Plaine des Cafres.*

Le développement de l'élevage bovin s'appuie fortement sur les systèmes herbagers. Avec le concours de la SAFER (Société d'Aménagement Foncier et Rural) et des Associations Foncières Pastorales (AFP), des terres sont orientées sur une vocation pastorale. Entre 1978 et 1988, la SAFER a acquis 4 430 hectares dans les Hauts dont 2 970 hectares ont été rétrocédés sous forme de lots agricoles (Guellec, 1992). Les AFP visent alors à assurer la mise en valeur pastorale en regroupant les propriétaires de terres agricoles. Elles permettent l'aménagement de 2 000 hectares de prairies et parcours entre 1975 et 1980. En 1978 est créée l'Union des AFP, structure qui devient indépendante et commence une collaboration avec le CIRAD.

À partir de 1986, la Région va s'impliquer fortement dans cette volonté de développement des Hauts. Des aides sont débloquées pour les AFP afin de permettre la création de prairies mais aussi l'achat d'équipement d'élevage.

C'est aussi à cette période que la problématique du déficit fourragé hivernal se fait sentir. De 1986 à 1989, les sécheresses subies donnent à cette problématique une forte priorité. Un système de report fourragé est mis en place sous forme d'ensilage, donnant des résultats très variables sur la conservation. Dès 1987, les premières recherches du CIRAD et de l'INRA commencent sur l'élevage bovin, en collaboration avec le Département, la Région et les organisations professionnelles. Le but est de valoriser au mieux les ressources disponibles, de gérer le déficit fourragé hivernal, dans un contexte d'élevage caractérisé d'évolutif par Mandret (2000).

Ces plans d'aide successifs et les politiques locales façonnent petit à petit le territoire agricole de La Réunion tel que nous le connaissons aujourd'hui. Les Bas, acquis à la cause de la canne à sucre depuis la colonisation de l'île, trouvent leur pendant dans les Hauts avec l'élevage. Par ailleurs, les Hauts sont aujourd'hui définis comme les limites du Parc National.

### 3. L'élevage aujourd'hui à La Réunion

Forte de 851 000 habitants au 1<sup>er</sup> janvier 2016 avec 1 million attendu en 2037 selon le scénario central des modèles les plus récents (2017), la croissance démographique importante engendre un étalement urbain considérable (Lagabrielle *et al.*, 2007; Lajoie et Hagen-Zanker, 2007). Lagabrielle et al. parlent d'une progression de la tache urbaine de 157% entre 1989 et 2002. En conséquence, nous observons depuis 1989 une perte importante de la Surface Agricole Utile (SAU) ainsi que du nombre d'exploitations. Nous observons toutefois une stabilisation de la SAU ces dernières années (Figure 4).

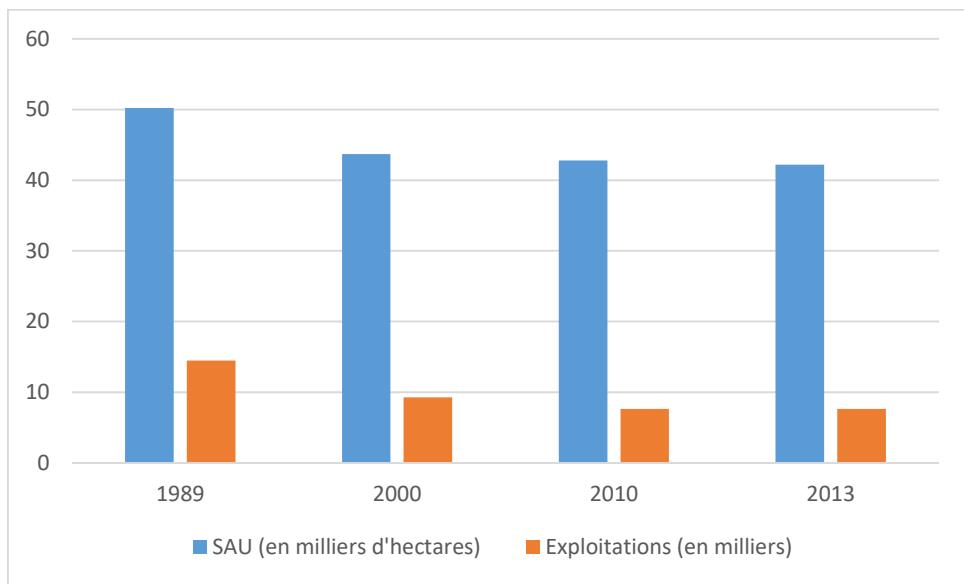


Figure 4. Évolution du nombre d'exploitation et de la SAU de 1989 à 2013. Source Agreste : Enquête sur la structure des exploitations 2013, Recensements agricoles 1989, 2000, 2010.

Tableau 1. Évolution du cheptel de bovins entre 1989 et 2012. Source DAAF La Réunion - Recensements agricoles

Effectif	1989	2000	2010	2012
<b>Bovins</b>	18 540	27 092	27 662	29 641
- dont vaches laitières	4 041	4 394	3 481	2 993
- dont vaches allaitantes	4 984	7 156	9 469	9 431

Dans ce contexte général, plusieurs filières d'élevage coexistent aujourd'hui à La Réunion. La volaille est la première production de viande locale suivie des porcins et des bovins (en tonnes-équivalent-carcasse, TEC). Parallèlement à la forte croissance démographique, l'élevage de bovins est en constante augmentation depuis 1989. Nous comptons aujourd'hui plus de 29 000 animaux, répartis dans les filières de production de viande et de lait (Tableau 1). L'effectif de bovins reste toutefois largement insuffisant pour couvrir les besoins du marché, avec seulement 40% et 24% de couverture pour le lait et la viande (Tableau 2). Même s'il reste de dimension économique modeste et n'a pas beaucoup de poids en valeur absolue, l'élevage à l'échelle de La Réunion permet de freiner l'exode rural et demeure une source d'emplois importante dans les « campagnes réunionaises ». De plus, il permet de couvrir une part importante des besoins et limite la dépendance de l'île sur le marché mondial. Par ailleurs, la viande locale bénéficie d'une bonne réputation qui lui permet une valorisation grâce au label « Bœuf Pays ». Si pour

l'heure la production oscille entre 1 600 et 1 900 tonnes par an, l'objectif de la filière viande à l'horizon 2020 est une augmentation de 40% de la production.

*Tableau 2. Taux de couverture du marché local par les productions en frais et global (frais, transformé, congelé) en 2016.  
Source DAAF La Réunion - Agreste.*

<b>%</b>	<b>Frais</b>	<b>Global</b>
<b>Bovins</b>	46	24
<b>Porcins</b>	100	47
<b>Volailles</b>	95	38
<b>Lait</b>	96	40
<b>Œufs</b>	100	94

La production de fourrage est répartie sur toute l'île. Elle est toutefois plus présente dans la grande partie des Hauts de l'ouest, sur les anciennes pentes du Piton des Neiges, sur le secteur des plaines, et dans les Hauts de Saint-Joseph (Figure 5). L'est étant une terre de production cannière importante et le littoral concentrant la majeure partie de la population, l'élevage y est très peu développé. Seules des petites surfaces destinées à la fauche et à l'engraissement sont visibles dans les Bas (Leleux, 2016). Cette répartition est largement influencée par le climat. Celui des Bas, tropical, correspond particulièrement aux besoins de la canne à sucre, développée très tôt sur l'île. La part de la SAU réservée aux fourrages est en légère progression entre 2000 et 2010, passant de 11 130 ha à 11 863 ha (AGRESTE - DAAF La Réunion, 2010). Elle représente à elle seule un quart de la SAU totale de l'île et arrive en seconde place derrière la canne à sucre qui représente plus de la moitié de la SAU avec 24 334 ha. Cette même canne à sucre perd du terrain avec près de 1 500 ha perdus entre 2000 et 2010.

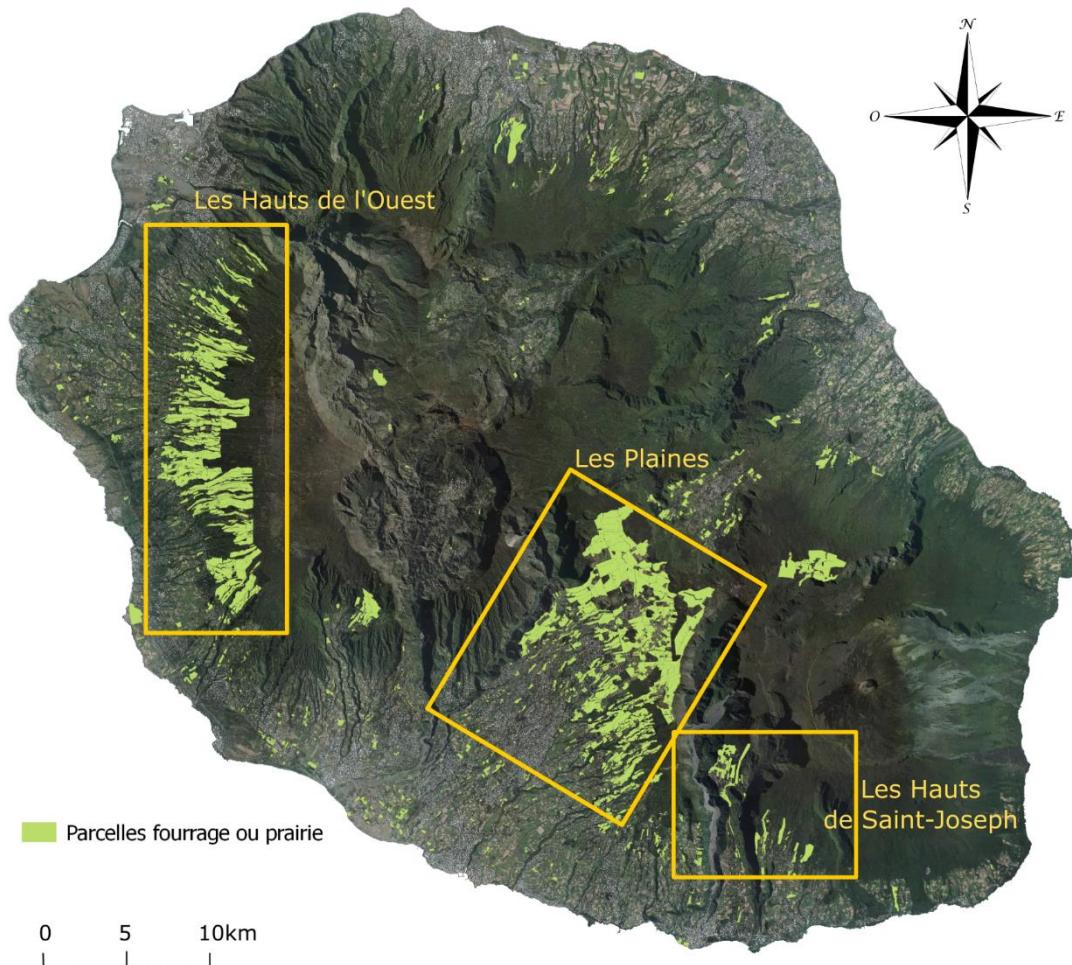


Figure 5. Répartition des parcelles classées comme prairie ou fourrage selon la base d'occupation du sol 2014 de la DAAF

## II. Élevage et production fourragère en Afrique du Sud

### 1. Localisation du Kalahari

Comme évoqué en introduction, la région indiaocéanique est une zone où les systèmes d'élevage sont très diversifiés, tant par les pratiques que par l'environnement. Leurs différences n'excluent pas les menaces environnementales et humaines auxquelles ils sont tous exposés et auxquelles il faut pouvoir répondre.

La deuxième zone d'étude choisie est donc volontairement très différente de La Réunion. Le Kalahari est un désert semi-aride situé au nord de l'Afrique du Sud. Le désert du Kalahari n'a pas de limite administrative propre mais il existe plusieurs définitions de son étendue dans la littérature. Nous retiendrons celle de Thomas (1991) basée sur des critères géologiques et cartographiée Figure 6. C'est une étendue de sables sédimentaires allant de l'Orange River jusqu'au nord de la Congo River. La partie sud-africaine n'est qu'une partie des 2,5 millions de km<sup>2</sup> du bassin du Kalahari qui s'étend sur une grande partie du Botswana ainsi qu'en Namibie.

Le paysage est constitué de grandes plaines avec très peu de reliefs. La flore comprend une couche ligneuse, principalement des arbres et des arbustes à tige unique, saisonnièrement à feuilles caduques, avec une couche de graminées et de plantes herbacées.



Figure 6. Localisation du Bassin du Kalahari suivant Thomas (1991)

## 2. L'élevage en Afrique du Sud et dans le Kalahari.

L'élevage sud-africain est orienté sur la production bovine et ovine. La production bovine y est très diversifiée. Elle varie entre grandes productions commerciales très axées sur les nouvelles technologies et la sélection animale et élevage de subsistance en passant par un élevage extensif raisonné dans les savanes. C'est ce dernier type de production que nous trouvons dans le Kalahari.

Nous comptons en 2017 plus de 13 millions de bovins en Afrique du Sud. La province du Northern Cape où se situe le Kalahari représente 3,8% de l'effectif avec plus 500 000 bovins. Si cela représente une faible part de la production totale, la production augmente depuis 1996 ; et alors que la production nationale est en baisse, celle du Northern Cape se maintient. Les moutons du Northern Cape représentent quant à eux près de 25% de la production nationale avec plus de 5,7 millions de têtes.

Dans la région du Kalahari l'élevage se fait sur de grandes plaines herbagères. Nous y trouvons plusieurs types de ruminants. Les ovins et les bovins sont élevés en troupeaux parqués. Les autres ruminants, tels que les antilopes, sont en semi-liberté et chassés (Figure 7. À la différence de La Réunion, la pratique est très extensive afin de préserver les parcours vulnérables aux faibles précipitations. Des gardes-chasse s'assurent régulièrement de la conformité des pratiques d'élevage pour ne pas les mettre en danger.



Figure 7. Paysages du Kalahari et ses animaux d'élevage. Ici un springbok, ovins et bovins.

Les parcours naturels comme ceux du Kalahari sont la principale source d'alimentation du bétail. Environ 70% des parcours sont utilisés pour le bétail et 9,6% par les animaux sauvages (Suttie *et al.*, 2005). La savane produit aujourd'hui une part certaine de l'alimentation de l'élevage mais elle est aussi la première touchée par les phénomènes liés au réchauffement climatique.

### III. Des environnements de production très contrastés

#### 1. Géologie

##### *1.1. La diversité géologique de La Réunion*

La Réunion est une île volcanique de 2 500 km<sup>2</sup> fondée par le déplacement d'un point chaud, créant successivement deux volcans : le Piton des Neiges, point culminant de l'île (3 069m) aujourd'hui éteint, puis le Piton de la Fournaise encore actif (2 631 m). Ces volcans forment aujourd'hui deux massifs montagneux escarpés.

Suite à l'effondrement de sa chambre magmatique et au travail de l'érosion, le massif du Piton des Neiges laisse apparaître trois excavations profondes de plus de 1 000 m sur les deux tiers nord-ouest de l'île. Il s'agit des cirques de Mafate au nord-ouest, de Cilaos au sud et de Salazie au nord-est.

Le massif du Piton de la Fournaise occupe lui le tiers sud-est de l'île. Jeune d'un point de vue géologique, le relief façonné par des effondrements successifs des chambres magmatiques du Piton des Neige et par l'action des systèmes morphogénétiques y est très escarpé, dessinant des falaises abruptes le long des cirques et ravines (Figure 8). Entre ces deux massifs, la lave de nombreux autres pitons a créé au fil des millénaires une zone de hauts plateaux où se situent aujourd'hui la Plaine de Palmistes et la Plaine des Cafres.

Les fortes pentes générées par le volcanisme récent à l'échelle géologique ne permettent pas le développement d'une activité agricole dans toutes les zones de l'île. La mécanisation est rendue difficile et le climat y est rude. Les animaux peuvent en revanche s'accommoder en partie au relief rendant ces zones uniquement exploitables par l'élevage.



Figure 8. Cartographie des pentes de La Réunion. Source MNT Litto3D

Les andosols issus du volcanisme couvrent 80% de l'île et notamment les régions d'élevage au-dessus de 1 200 m d'altitude. Ils sont divisés en plusieurs sous-catégories, visibles Figure 9. Les andosols perhydratés sont les sols les moins altérés, couvrant les zones supérieures à 1 000 m. Ils sont pauvres en azote et en phosphore assimilable (Truong, 1989) mais riches en carbone. La forte pluviométrie et humidité ainsi que les faibles températures des Hauts empêchent la formation de matériaux argileux. Ces sols présentent de fortes contraintes dues à leurs caractéristiques physiques, hydriques et mécaniques (Perret, 1993). S'il permet une forte absorption hydrique (40 à 200% de teneur en eau), le travail du sol les fait passer à un état sec et très léger et le sol se fragilise vite et potentiellement de façon irréversible. De mauvaises pratiques d'exploitation des milieux andiques entraînent un changement rapide de la surface et une sensibilité particulière à l'érosion par la modification de leur structure. À titre d'exemple 35 cm de sol décapés en zone maraîchère furent constatés après le passage du cyclone Firinga en 1989. L'élevage permet de valoriser ces terres et de lutter contre cette érosion. Les prairies, pluriannuelles au pérennes, n'induisent pas de travail important de la terre comme le maraîchage. Du fait de leur caractère très couvrant, les prairies constituent une barrière naturelle antiérosive.

Sur le littoral nous trouvons des parcelles de fauche sur un sol sableux. Très poreux, il ne stocke pas l'eau des précipitations et sa réserve utile est donc très faible. L'irrigation est nécessaire mais ces parcelles bénéficient d'un ensoleillement et de températures tropicales favorables.

De manière générale, les sols réunionnais sont très variés comme nous pouvons le constater sur une carte géologique (Figure 9). Ils réagissent différemment à la fertilisation, aux précipitations et à l'irrigation, et impactent de ce fait le rythme de pousse des cultures de façon très diverses.

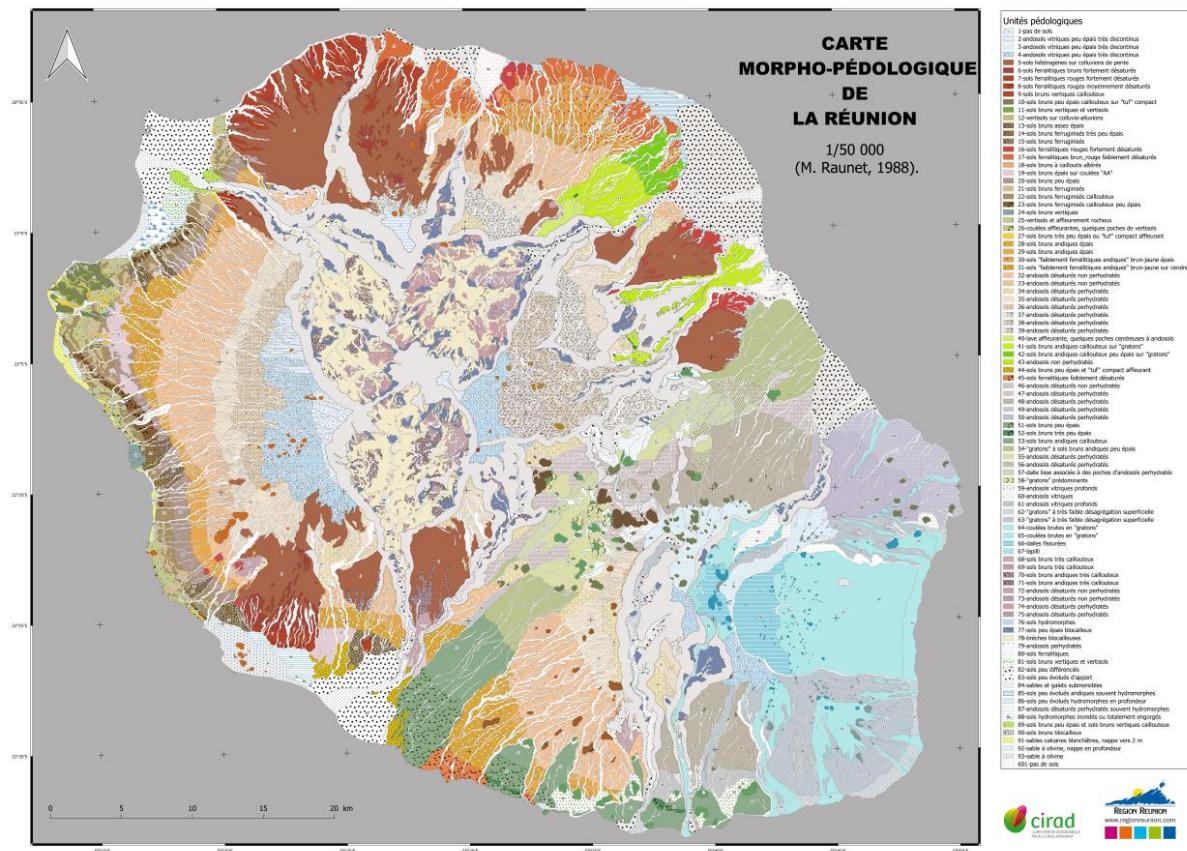


Figure 9. Carte morpho-pédologique de La Réunion d'après (Raunet, 1988)

### 1.2. Le sol très peu fertile du Kalahari

L'histoire de la géologie du Kalahari est bien plus ancienne que celle de La Réunion. Le bassin du Kalahari s'est formé à la fin du Crétacé. Un affaissement de la zone ainsi que l'élévation de certains axes épirogéniques<sup>4</sup> permettent l'apparition de rivières qui commencent leur travail de dépôt de graviers et de sédiments (Haddon et McCarthy, 2005). La partie sud du Kalahari est une plaine relativement plane dont l'altitude varie entre 1 000 m et 1 500 m. Elle est traversée par des rivières éphémères enfermées dans des vallées jusqu'à 50m de profondeur par rapport à la plaine (Lancaster, 1988).

Après des modifications de la composition du sol à l'échelle géologique, la couche supérieure du sol est aujourd'hui largement composée de sables classés comme arénosols. A plusieurs

<sup>4</sup> Axes de mouvement vertical de l'écorce terrestre descendant ou descendant.

reprises (Buckley, Gubb, *et al.*, 1987; Buckley, Wasson, *et al.*, 1987), le sol du Kalahari est comparé à celui du centre de l'Australie, lui-même jugé comme très peu fertile. Les résultats montrent un sol avec des taux de phosphore, potassium, et calcium bien inférieurs. Le taux d'azote est quant à lui comparable. Cette faible fertilité du sol et l'absence d'eau en surface ont longtemps été des arguments mobilisés pour attester de la non viabilité d'une filière élevage dans la région (Debenham, 1952). Mais l'évolution des technologies permettant des forages profonds ainsi que la taille des surfaces disponibles pour puiser l'eau ont permis le développement agricole de cette région.

## 2. Climat

### 2.1. *La Réunion : des conditions climatiques complexes*

#### 2.1.1. *Un climat géographiquement varié, induit par le relief*

Le relief fortement accidenté de l'île a des conséquences sur le climat. Les hautes formations montagneuses constituées par le massif du Piton des Neiges et le Piton de la Fournaise bloquent les alizés venant de l'est et qui apportent des quantités de précipitations importantes toute l'année. La pluviométrie annuelle moyenne enregistrée entre 1981 et 2010 se situe entre 2 500 mm et 12 000 mm (Figure 12). Les sommets de l'île détiennent même plusieurs records mondiaux de pluviométrie durant des épisodes extrêmes. Le récent cyclone Gamède en 2007 apporta 3 930 mm en 72 heures sur le secteur du Piton de la Fournaise. L'ouest, plus à l'abri, est en revanche touché par une saison sèche très marquée durant l'hiver austral (Figure 10). Cette sécheresse engendre régulièrement un déficit fourrager qu'il faut combler, soit par des reports fourragers, soit par des achats de fourrages. Cette dysmétrie est nuancée par un gradient altitudinal impactant lui aussi les précipitations et températures. Nous observons un climat plus humide et frais en altitude se rapprochant d'un climat tempéré, avec de très courtes périodes de gel vers le volcan. À faible altitude se trouve un climat tropical propice à la canne à sucre et aux cultures fourragères tropicales (*Chloris*, *Pennisetum* sp., etc.), avec des chaleurs plus importantes et des précipitations plus faibles.

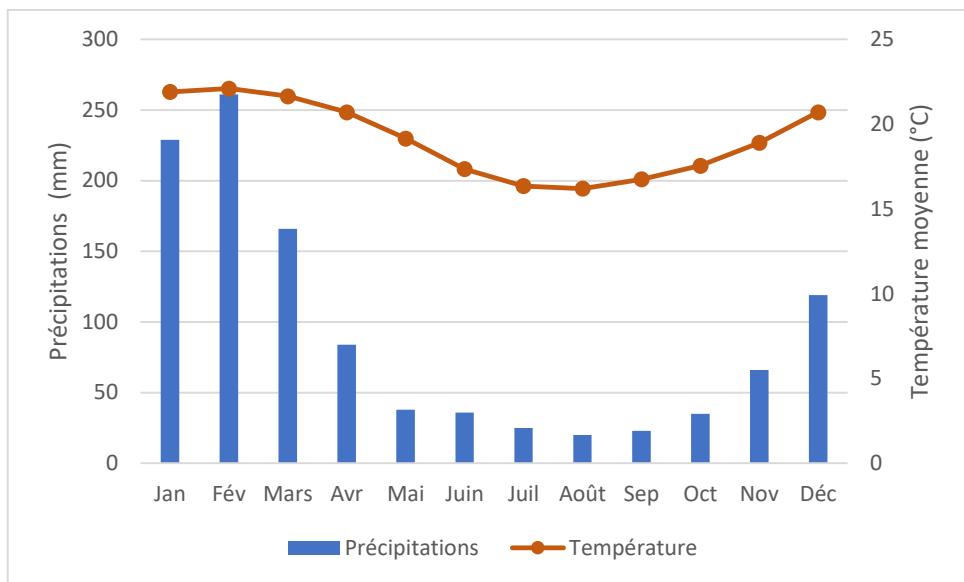


Figure 10. Normales mensuelles des Hauts de l'Ouest de 1981 à 2010 (station Colimaçons). Source Météo France.

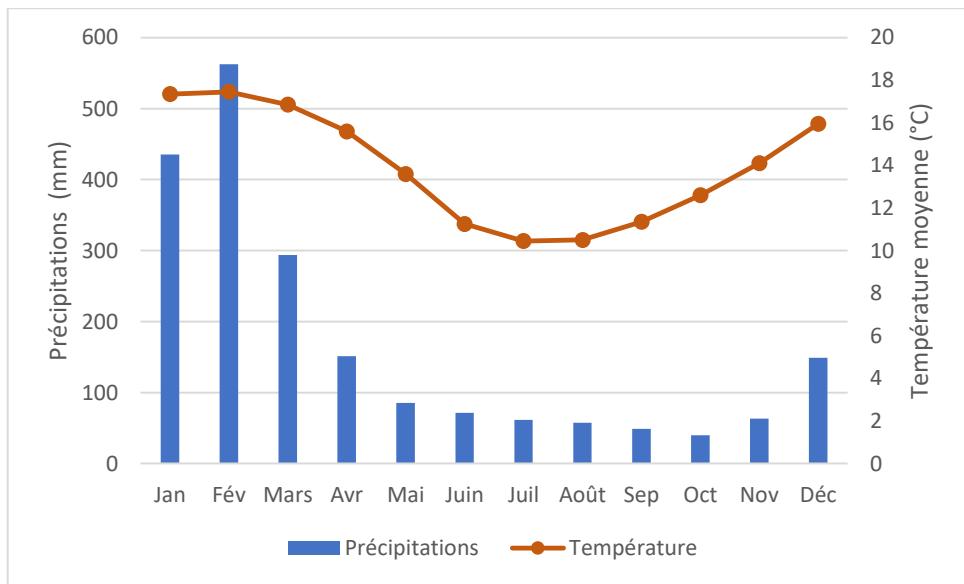


Figure 11. Normales mensuelles de la Plaine des Cafres de 1981 à 2010 (station Plaine des Cafres). Source Météo France.

### 2.1.2 Une variabilité saisonnière importante

Deux saisons marquées se succèdent. L'hiver austral apporte des vents frais de mai à septembre. Les précipitations y sont réduites, provoquant régulièrement des déficits en eau, en particulier dans la partie ouest. En altitude, les températures s'approchent de zéro degré et ralentissent fortement la croissance des plantes (Figure 11). Durant l'été, de décembre à avril, les températures sont plus élevées et des perturbations provoquent de fortes précipitations pouvant évoluer en système cycloniques. C'est en cette saison que les conditions sont le plus favorables

à la croissance de l'herbe. La culture dans les Hauts nécessite toutefois des plantes résistantes à un apport d'eau abondant.

Il existe par ailleurs de nombreux microclimats liés au relief et à l'exposition et qui demeurent difficilement modélisables par le réseau de stations météorologiques présent sur l'île.

Au final, force est de constater que cette grande diversité climatique (Figure 12) et pédologique rend difficile la prédiction de la production de biomasse à l'échelle de l'île tout entière.

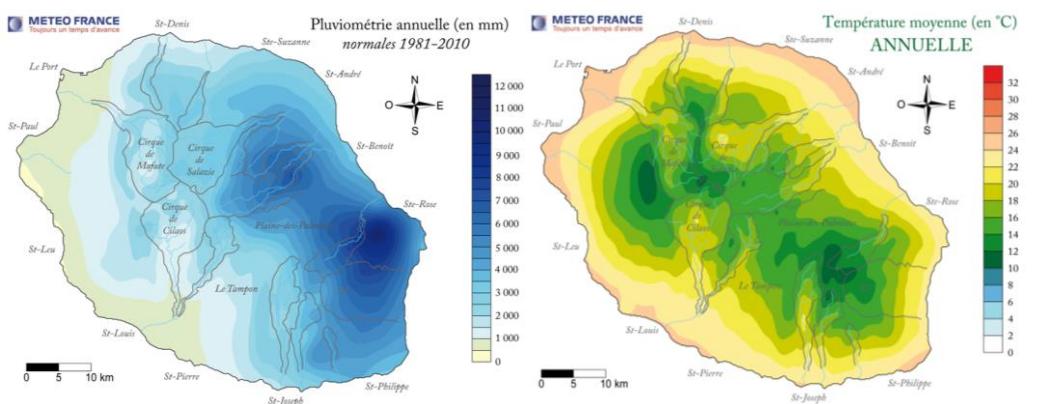


Figure 12. Précipitations et températures moyennes annuelles à La Réunion. Source Météo France

Le climat, très variable tant spatialement que de façon intra et interannuelle, provoque un réel déséquilibre dans l'alimentation du bétail.

Pour limiter ce déséquilibre, une réponse peut être proposée en deux temps. Tout d'abord, il nous faut connaître spatialement la répartition et la quantité de fourrage disponible pour une meilleure redistribution des ressources de fourrages à l'échelle de l'île à tout moment, et gommer ainsi la variabilité saisonnière et géographique. Nous imaginons alors une redistribution entre les différentes zones géographiques de l'île suivant qu'elles aient des ressources fourragères plus ou moins importantes. Ensuite, il nous faut imaginer une réponse aux événements extrêmes interannuels en estimant les biomasses disponibles et en anticipant les déficits fourragers liés aux sécheresses.

## 2.2. Les effets de la saisonnalité marquée du Kalahari sur l'élevage

Le climat du Kalahari est qualifié de semi-aride car les précipitations y sont rares. Les moyennes annuelles sont comprises entre 150 et 300mm, le nord et l'est étant les zones les plus arrosées.

La majeure partie des précipitations (30mm/mois) ont lieu entre novembre et avril. Ces précipitations intervenant dans une période où les températures et l'évapotranspiration sont élevées restent peu efficientes, n'ayant pas le temps de profiter à la plante. La comparaison des deux images en fausse couleurs à la période sèche et à la saison des pluies montre cette faible efficience (Figure 13).

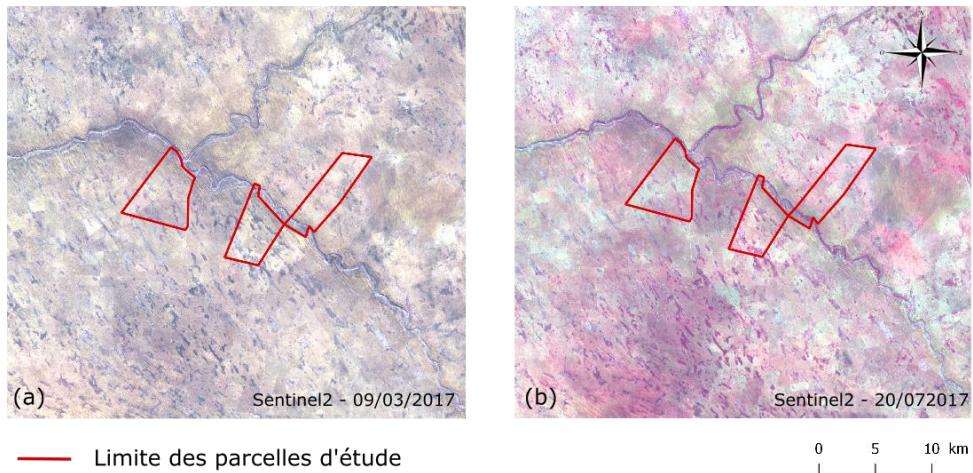


Figure 13. Images fausses couleurs Sentinel2 en saison sèche (a) et en saison des pluies (b)

En été, les températures peuvent atteindre des pics proches de 45°C pour se rapprocher de zéro degré au plus bas durant les mois de juin et juillet (Figure 14). Ces chiffres sont donnés à titre indicatif car la variabilité et l'incertitude sont importantes dans cette région (Sporton et Thomas, 2002).

D'évidence, le climat n'est donc pas favorable à l'élevage sans intervention humaine. Mais, comme énoncé précédemment, les techniques de forage profond ont permis d'utiliser l'eau des ressources souterraines pour les exploitations agricoles.

La forte saisonnalité associée à la pâture est une source incontestée de la prolifération de la végétation buissonnante (Jeltsch *et al.*, 1997). Cette prolifération de végétation non consommable par le bétail est un réel problème pour l'élevage puisqu'elle vient occuper graduellement la place des graminées, source première de l'alimentation du bétail.

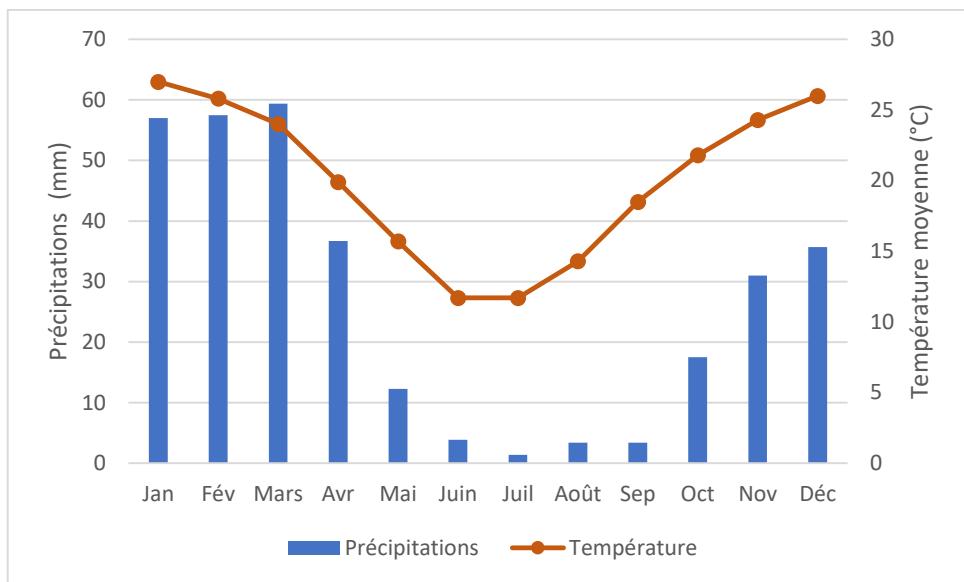


Figure 14. Historique des précipitations et températures moyennes par mois entre 1991 et 2015 sur le lieu d'étude.  
Source(University Of East Anglia Climatic Research Unit et al., 2017)

### 3. Espèces de graminées

#### 3.1.Répartition des espèces de graminées à La Réunion

Les nombreuses conditions pédoclimatiques évoquées précédemment impliquent des espèces de fourrage adaptées, à la fois à ces conditions mais aussi à la gestion des parcelles (Figure 15). Des graminées tropicales sont cultivées à faible altitude où nous trouvons principalement :

- le chloris (*Chloris gayana*), cultivé sur 1 530 ha. Il est généralement cultivé à basse altitude sur de petites parcelles de fauche mais nous le trouvons jusqu'à 1 000 m. Il est utilisé pour la production de foin destiné aux élevages de bovins situés dans les Hauts durant l'hiver. Sa production est de 15t à 35t MS/ha/an avec 7 à 9 fauches par année ;
- Le kikuyu (*Pennisetum clandestinum*), cultivé entre 600 et 1 900 m d'altitude, sur près de 75% de la surface toujours en herbe (7 850 ha). Il est très utilisé pour son pouvoir antiérosif (très couvrant) mais aussi pour son rendement sans fertilisation allant de 5t à 10t MS/ha/an et 15 à 20t MS/ha/an lorsqu'il est bien exploité. Son point faible est un rendement en baisse lorsque les températures chutent, i.e. en hiver et au-dessus de 1 200 m. Il est essentiellement utilisé en pâture mais nous le trouvons aussi en fauche ;
- D'autres graminées telles que la canne fourragère (*Pennisetum purpureum*) et les résidus de la culture de la canne à sucre (*Saccharum officinarum*) sont utilisées pour l'alimentation du bétail.

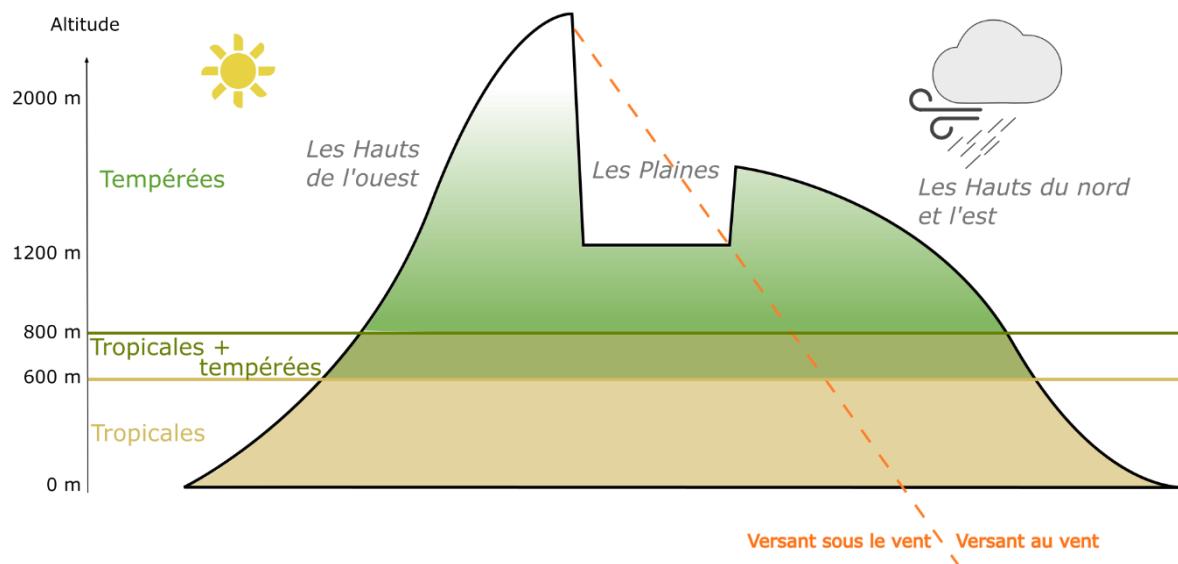


Figure 15. Schéma de répartition des graminées à la Réunion

Les fourrages tempérés sont cultivés en altitude (800 à 1 700 m) sur près de 1 000 ha de SAU. Les principales espèces sont les Ray-grass (*Lolium perenne*, *multiflorum* et *hybridum*), le Brome (*Bromus catharticus*), le Dactyle (*Dactylis glomerata*), la Fétuque (*Festuca arundinacea*) et le Trèfle blanc (*Trifolium repens*) (Tableau 3). La fétuque élevée (*Festuca arundinacea*) est également très bien adaptée aux conditions difficiles (piétinement, forte hygrométrie etc.) ; elle est donc surtout cultivée à la Plaine de Palmistes et dans certaines zones humides de la Plaine des Cafres. Ces différentes espèces sont cultivées majoritairement en association (2 à 3 espèces) (Leleux, 2016). Près de 80% des surfaces cultivées avec ces espèces sont valorisées en fauche (source ARP) pour la production d'ensilage, les 20% restants étant exploitées en pâture.

Pour des rendements équivalents, les espèces tempérées possèdent de meilleures valeurs alimentaires que le kikuyu et résistent mieux aux températures hivernales. Les rendements se situent entre 15 et 20 tonnes de matière sèche par hectare et par an. Ce type de fourrage est idéal pour les zones d'altitude à faibles pentes.

## Estimation de biomasse fourragère et télédétection

Tableau 3. Graminées cultivées en prairie à La Réunion. Source images Global Plants.

Nom latin	Nom commun	Photo	Herbier
<i>Chloris gayana</i>	Rhodes grass		Instituto de Botánica Darwinion de Buenos Aires (SI)
<i>Dactylis glomerata</i>	Dactyle		Museo di Storia Naturale dell'Università, Firenze (FI)
<i>Festuca arundinacea</i>	Fétuque élevée		Naturhistorisches Museum Wien Botanische Abteilung (W)
<i>Lolium x hybridum</i>	Ray-grass hybride	-	-
<i>Lolium multiflorum</i>	Ray-grass d'Italie		Royal Botanic Gardens, Kew (K)
<i>Lolium perenne</i>	Ray-grass anglais		Royal Botanic Garden Edinburgh (E)
<i>Pennisetum clandestinum</i>	Kikuyu		University of Bayreuth Herbarium (UBT)

### *3.2.Les graminées du Kalahari*

La végétation s'est adaptée au climat rude du Kalahari. L'eau étant très rare en surface, nous y trouvons une végétation composée d'arbres et d'arbustes à feuilles simples et aux racines profondes. Les graminées viennent en sous couche compléter le couvert. Profitant des pluies de la saison humide, leur croissance est très rapide, puis elles sèchent sur pied durant la période hivernale en attendant d'être pâturées.

Plusieurs espèces de graminées ont été identifiées (Tableau 4) sur place grâce au travail de terrain et aux recherches bibliographiques (Müller *et al.*, 1983; Roberts et Fourie, 1975; Van Rooyen *et al.*, 2001).

## Estimation de biomasse fourragère et télédétection

*Tableau 4. Espèces de graminées identifiées lors des phases d'échantillonnage dans le Kalahari. Source des images Global Plants*

Nom latin	Nom commun	Photo	Herbier
<i>Anthephora argentea</i>	Circle wool grass		Royal Botanic Gardens, Kew (K)
<i>Aristida meridionalis</i>	Giant three-awn		Royal Botanic Gardens, Kew (K)
<i>Aristida vestita</i>	Hard stick grass		Royal Botanic Gardens, Kew (K)
<i>Centropodia glauca</i>	Gha grass		Royal Botanic Gardens, Kew (K)
<i>Eragrostis lehmanniana</i>	Lehmann's love grass		Royal Botanic Gardens, Kew (K)
<i>Eragrostis pallens</i>	Broom grass		Royal Botanic Gardens, Kew (K)

*Megaloprotachne albescens*

*Schmidtia kalahariensis*

Kalahari sour grass



South African National  
Biodiversity Institute,  
National Herbarium,  
Pretoria (PRE)

*Schmidtia pappophoroides*

Sandweek



Department of Botany,  
University of Coimbra

*Stipagrostis amabilis*

Dune bushman  
grass



Royal Botanic Gardens,  
Kew (K)

*Stipagrostis uniplumis*

Silky bushman grass



Royal Botanic Gardens,  
Kew (K)

#### 4. Production fourragère : conclusion

La production fourragère est la première source d'alimentation du bétail dans le monde. Qu'elle soit produite dans le Kalahari ou à La Réunion, elle se trouve au croisement de plusieurs problématiques. En effet, elle doit permettre de répondre à la fois à une demande croissante tout en s'adaptant aux contraintes multiples du climat, du relief, des pratiques culturelles et de leurs conséquences.

Nous trouvons dans la zone indianocéanique des climats marqués par leur diversité, tant dans l'espace que dans le temps. Ce dernier point s'observe à la fois de manière intra-annuelle avec des saisons très marquées et à la fois de manière interannuelle avec des événements extrêmes de type cyclones ou sécheresses qui changent radicalement les conditions de production. La pédologie, elle aussi d'une diversité extrême, peut constituer une vraie contrainte pour les cultures. D'une part parce qu'elle définit en partie le climat mais aussi parce qu'elle rend difficile l'implantation de culture dans les fortes pentes. In fine, les pratiques doivent aussi s'adapter à ces paramètres pour tirer le meilleur parti des surfaces exploitées.

Parallèlement, la croissance démographique et l'élévation moyenne des niveaux de vie provoquent une augmentation de la consommation de nourriture et appellent une production animale plus importante. Celle-ci doit faire face à des épisodes climatiques extrêmes et à un réchauffement global. Dans le contexte actuel (et sans nul doute à venir), des déficits fourragers se font ressentir régulièrement à La Réunion et sont à prévoir dans le Kalahari. Il paraît donc nécessaire d'œuvrer à une meilleure connaissance de la répartition spatio-temporelle du disponible fourrager dans ces régions vulnérables, tout à la fois pour anticiper ces déficits et pour y répondre au mieux, notamment par la redistribution optimisée du fourrage. Mais ces mêmes raisons qui rendent les cultures si différentes (climat, relief, sol, espèces fourragères) rendent aussi très difficile l'estimation de biomasse, tant les différences spatio-temporelles sont marquées.

## **Partie II : Estimation de la biomasse fourragère et télédétection**

## I. Utilisation de la télédétection dans l'estimation de la biomasse fourragère

Comme nous l'avons évoqué précédemment, les nombreuses spécificités d'un territoire le rendent souvent difficilement appréhendable dans sa globalité. De ce fait, il est autant nécessaire que difficile d'estimer la biomasse disponible d'un vaste territoire.

Seule l'imagerie satellitaire permet de prendre du recul par rapport à ce territoire afin de pouvoir l'observer dans son entièreté. Elle permet d'étudier les phénomènes anthropiques et naturels qui s'y produisent et de les quantifier à une plus grande échelle.

### 1. La télédétection

La télédétection désigne un ensemble de techniques permettant d'étudier à distance des phénomènes ou objets. La télédétection spatiale, qui nous intéresse plus particulièrement, permet l'acquisition d'un signal (rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis), transformé en images afin de l'étudier. C'est seulement un siècle après la première photographie aérienne (Gaspard Félix Tournachon, 1856) que les premières applications spatiales voient le jour avec l'observation météorologique. Dans les années 1970, le satellite Landsat1 permet d'observer la surface terrestre et ouvre la voie vers une évolution continue de la télédétection. Depuis, les résolutions se sont affinées, les plages de fréquences ont augmentées et les capteurs se sont diversifiés (optique, radar, laser).

Les deux principaux outils de télédétection spatiale pour observer la végétation sont le radar et le capteur optique.

Les capteurs radar sont des capteurs actifs. Ils envoient un rayonnement électromagnétique et en réceptionnent une partie, une fois réfléchie sur la surface terrestre. Ils ont l'avantage de pouvoir fonctionner de nuit car la source d'énergie reçue n'est pas lumineuse. Cela augmente les possibilités de prise de vue. Ces techniques sont jusqu'à maintenant utilisées majoritairement sur la détection de biomasse forestière (Hussin *et al.*, 1991; Luckman *et al.*, 1998; Rignot *et al.*, 1995). Elles viennent aussi en appui à l'imagerie optique dans le cas de suivi de cultures (Dusseux *et al.*, 2014; Joshi *et al.*, 2016). Si cette technique est fiable pour les végétations arborées, elle l'est encore trop peu pour le suivi de biomasse herbacée dont les variations durant la croissance sont trop faibles pour être détectées.

Les capteurs optiques sont dits passifs. Le capteur réceptionne les ondes électromagnétiques du soleil réfléchies par la surface de la terre. C'est en analysant la quantité d'énergie absorbée ou réfléchie dans certaines longueurs d'ondes que nous pouvons étudier certains phénomènes terrestres. Le spectre du visible (observable à l'œil nu) n'est qu'une partie du spectre du rayonnement solaire (Figure 16). Pour l'étude de la végétation ce sont les spectres du visible et l'infrarouge qui sont utilisés.

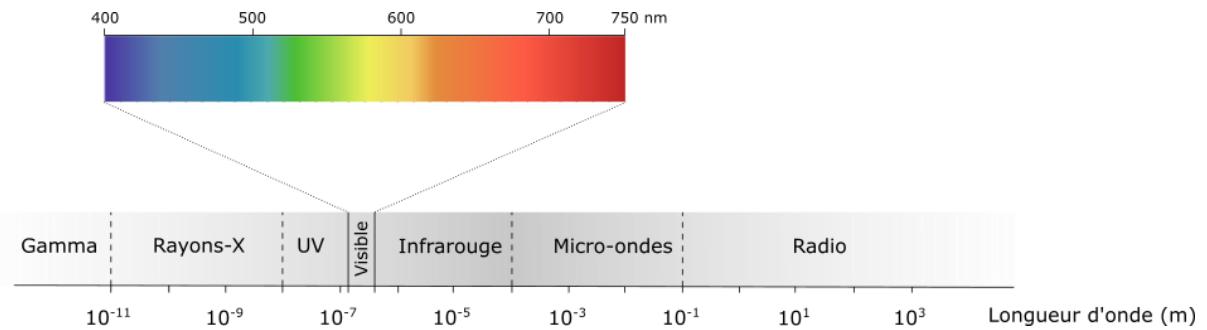


Figure 16. Spectre du rayonnement solaire

Dans le spectre du visible (400-700 nm), c'est essentiellement la pigmentation des végétaux qui conditionne les propriétés optiques des végétaux. Ils réfléchissent dans le vert et absorbent dans les longueurs d'ondes correspondant au bleu et au rouge (Figure 17). De 700 à 1 300 nm, les végétaux émettent fortement dans le spectre du proche infrarouge. Dans le moyen infrarouge, on observe trois pics d'absorption de l'eau qui renseignent sur le stress hydrique.

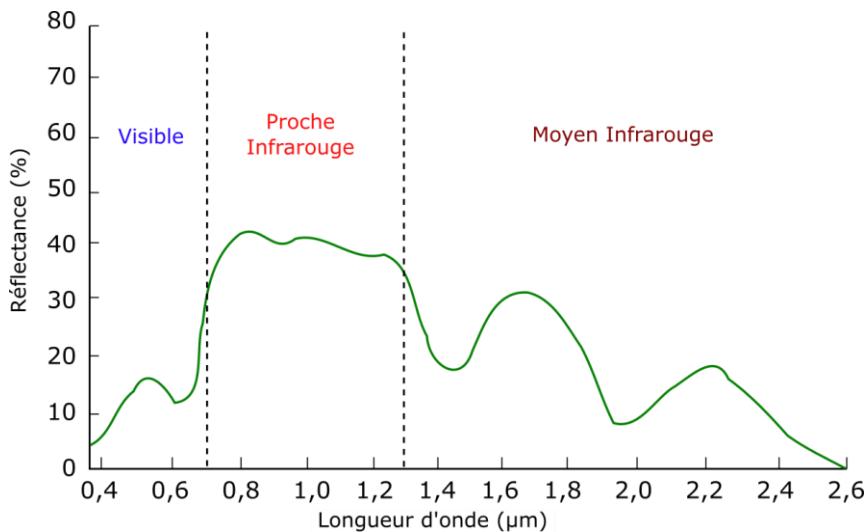


Figure 17. Courbe de réflectance d'une feuille dans le visible et l'infrarouge

## 2. L'imagerie multi-spectrale pour l'estimation de biomasse à l'échelle d'un territoire

L'imagerie multi-spectrale est sans doute l'offre la plus développée en ce qui concerne l'emprise des images, la capacité de revisite ou encore le rapport coût-efficacité (Kumar *et al.*, 2015). Les nombreux capteurs offrent pléthore de possibilités, tant en termes de résolution spatiale que temporelle mais aussi en termes de longueurs d'ondes couvertes. Depuis les années 2000, l'ESA (Agence Spatiale Européenne) et le CNES (Centre National d'Études Spatiales) ont à eux seul lancé dix satellites avec capteur optique pour le suivi de la surface terrestre. Nous trouvons les SPOT5, 6 et 7, Pléiades 1 et 2 et Venus gérés par le CNES ; Sentinel2A, B et 3 et Proba-V gérés par l'ESA. Les images issues de ces satellites peuvent être gratuites ou payantes suivant les capteurs. La résolution offerte peut aller de 100 à 0,5 m et la capacité de revisite peut être journalière à tri-mensuelle.

En combinant les différentes bandes spectrales qui réagissent différemment suivant l'état de la plante, il est possible de calculer des indices de végétation (IV) permettant d'analyser l'état d'un couvert. Ce sont en général le rouge et l'infrarouge qui sont utilisés dans ces indices. Une plante réfléchie très peu du rayonnement solaire dans les longueurs d'ondes correspondant au rouge. Cette bande sert en quelque sorte d'étalon dans le calcul d'indices. A l'inverse l'activité chlorophyllienne d'une plante aura pour conséquence une forte réflectance dans le proche-infrarouge. Sa présence dans un indice de végétation renseignera donc sur l'état de production chlorophyllienne de la plante. Nous pourrons ainsi avoir des renseignements sur l'état de santé

de la plante mais nous pourrons également disposer d'une information quantitative très utile relative à la biomasse.

Les premiers indices utilisés, étaient simples, sous forme de différences ou de ratios entre les bandes spectrales (RVI, DVI). Le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Rousse *et al.*, 1974; Tucker, 1979) est à ce titre l'indice le plus largement utilisé pour l'étude de cultures (Collet, 2001; Pettorelli *et al.*, 2005). Il représente un bon indicateur de la productivité primaire de la végétation terrestre (

Tableau 5).

Plus récemment, Gao (1996) combine le NDVI et la DVI afin d'obtenir le RDVI (*Renormalized Difference Vegetation Index*) qui peut réagir en présence d'un faible ou d'un fort couvert végétal, héritant ainsi des avantages respectifs du DVI et du NDVI.

D'autres indices (SAVI, TSAVI, SAVI2, MSAVI2) font partie d'une famille d'indices permettant de limiter l'impact de la réflectance du sol. Ils peuvent être utiles pour des cultures présentent sur des sols très réfléchissants comme du sable mais aussi en début de repousse lorsque la végétation est peu couvrante.

Enfin le NDWI (*Normalized Difference Water Index*) (Gao, 1996) réagit à la concentration en eau du couvert étudié.

Tableau 5. Indices spectraux utilisant les bandes rouge, proche et moyen-infrarouge

Indice	Nom	Formule	Caractéristiques	Référence
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>	$\frac{PIR - R}{PIR + R}$	Valeur comprise en -1 et 1. La végétation a une valeur > 0,1.	(Rousse et al., 1974; Tucker, 1979)
RVI	<i>Ratio Vegetation Index</i>	$\frac{PIR}{R}$	-	(Jordan, 1969)
DVI	<i>Difference Vegetation Index</i>	$PIR - R$	Indice simple sensible à la quantité de biomasse. Permet de distinguer le sol et la végétation.	(Tucker, 1979)
RDVI	<i>Renormalized Diffrence Vegetation Index</i>	$\sqrt{NDVI \cdot DVI}$	Combinaison du NDVI et du DVI.	(Roujean et Breon, 1995)
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>	$\frac{PIR - R}{PIR + R + L}$	Le paramètre d'ajustement L permet d'adapter l'indice au recouvrement de la végétation (0,25 pour une forte densité, 1 pour une très faible densité).	(Huete, 1988)
TSAVI	<i>Transformed Soil Adjusted Vegetation Index</i>	$\frac{a(PIR - aR) - b}{aPIR + R - ab}$	Indice permettant de minimiser l'effet du sol. a et b sont les paramètres de la droite du sol.	(Baret et al., 1989)
SAVI2	<i>Soil Adjusted ratio Vegetation Index</i>	$\frac{PIR}{R + b/a}$	a et b sont les paramètres de la droite du sol.	(Major et al., 1990)
MSAVI2	<i>Modified Soil Adjusted Vegetation Index</i>	$\frac{2PIR + 1 - \sqrt{(2PIR + 1)^2 - 8(PIR - R)}}{2}$	Dérivé du SAVI il s'ajuste automatiquement à la densité du couvert.	(Qi et al., 1994)
NDWI	<i>Normalized Difference Water Index</i>	$\frac{PIR - MIR}{PIR + MIR}$	Dérivé du NDVI, la bande rouge est remplacée par le moyen-infrarouge réagissant à la teneur en eau.	(Gao, 1996)

## II. Imagerie multi-spectrale pour le suivi de biomasse

Nous distinguons deux approches pour estimer la biomasse disponible d'un couvert à l'aide l'imagerie multi-spectrale. D'une part, nous considérons les relations entre indice de végétation et biomasse qui consistent généralement en un modèle empirique, et d'autre part, nous considérons le couplage de données satellites à des modèles de croissance des plantes.

### 1. Modèles empiriques

La création de modèles empiriques consiste en la mise en relation des valeurs de biomasse prélevée avec les valeurs des indices de végétation sur les zones de prélèvement. Un modèle de régression est alors ajusté entre les différentes mesures.

Ces modèles ont été très utilisés depuis les années 70 et montrent des bonnes corrélations entre les mesures de biomasse et les indices de végétation. Les modèles utilisés sont le plus souvent linéaires ou exponentiels. Des études récentes montrent encore leur efficacité sur la détection de biomasse herbacée. Jin *et al.* (2014) en comparant différents indice de végétation et leur capacité à estimer la biomasse fraîche de trois zones herbacées tempérées dont une désertique. Le NDVI, issu des images MODIS, permet de meilleures prédictions grâce à un modèle exponentiel ( $r^2=0,6$ ). Sur la zone désertique, c'est un indice prenant en compte la réponse spectrale du sol qui permet un meilleur ajustement ( $r^2=0,49$ ). En Mongolie, Li *et al.* (2016) comparent différents indices issus d'images MODIS et Landsat 8. Les meilleurs résultats sont obtenus à partir du RVI et du NDVI MODIS ( $r^2=0,94$  et  $0,92$ ). Les images Landsat 8 permettent aussi un très bon ajustement avec les mêmes indices ( $r^2=0,86$  et  $0,84$ ). Mundava *et al.* (2014) explorent des indices pour l'estimation de biomasse en climat tropical dans le nord-ouest de l'Australie (Kimberley). Enfin, de bonnes estimations de la biomasse verte sont effectuées grâce aux images Landsat 7 et le NDVI et SAVI ( $r^2=0,6$ ).

De nombreuses études montrent aussi l'utilisation de modèles de régression pour l'estimation de paramètres biophysiques de plantes, tels que le *Leaf Area Index* (LAI) (Asrar *et al.*, 1984; Canisius *et al.*, 2010; Hatfield *et al.*, 1985; Hobbs, 1995; Sellers, 1985). Cependant la plupart des études se focalisent sur les forêts ou les cultures comme le blé (Adam *et al.*, 2010; Asner *et al.*, 2003). Certains travaux laissent à penser qu'une forte relation entre un indice de végétation et le LAI de prairies existe. Darvishzadeh *et al.* (2008) mettent en relation le NDVI et le SAVI2 avec le LAI de prairies italiennes. Les coefficients de détermination sont de 0,61 et 0,64 pour le NDVI et le SAVI2, respectivement. Lim *et al.*, (2015) obtiennent de très bons résultats sur

une population de raygrass italien au Japon (aussi cultivé à La Réunion) avec un coefficient de détermination de 0,8.

L'ajustement de modèles de régression permet d'étudier avec fiabilité la biomasse disponible et les paramètres biophysiques. Le NDVI est encore une fois souvent utilisé et efficace. Cependant, cette méthode fait face à un problème récurrent, celui de la saturation des indices de végétation lorsque la végétation est très dense (Asrar *et al.*, 1984; Gao, 2000; Jin *et al.*, 2014; Sellers, 1985; Thenkabail *et al.*, 2000; Tucker, 1977).

Si les modèles de régression sont une méthode simple à mettre en œuvre, il paraît difficile de les utiliser seuls comme estimateur de la biomasse. En effet, les perturbations atmosphériques (en particulier dans les zones tropicales), la saturation des indices de végétations, la capacité de revisite des satellites ne permettent pas un suivi quotidien de la biomasse disponible. Ces modèles de régression sont en revanche utilisés comme proxy entre un modèle de croissance et l'observation par satellite. Ils permettent l'estimation des paramètres biophysiques de plantes présents dans les modèles de croissance afin d'affiner la prédiction de ces derniers. Cette approche s'appelle le couplage.

## 2. Approche couplage

### *2.1. Les modèles de croissance dynamiques*

Initiés par les travaux de Van Bavel et de de Witt dans les années 1950 (de Witt, 1958; Van Bavel, 1953), les premiers modèles de photosynthèse et de croissance des plantes voient le jour dans les années 1960 (Duncan *et al.*, 1967; Duncan, 1972; Stapleton *et al.*, 1974). La compréhension des phénomènes biologiques permet d'affiner ces modèles au fil des années.

Nous trouvons aujourd'hui deux grandes catégories de modèles (Jones *et al.*, 2017) : les modèles statistiques, développés sur des jeux de données historiques de récoltes et des modèles développés sur des jeux de données météorologiques. Ces modèles sont alors ajustés en fonction de ces divers paramètres acquis au niveau régional. Ils sont utilisés pour obtenir une tendance des récoltes sur un territoire aux caractéristiques homogènes (Thompson, 1969). Ces modèles sont difficilement extrapolables car ils ne prennent pas en compte le sol, les pratiques et d'autres conditions variables suivant les régions.

Les modèles de simulation dynamiques sont pourvus de fonctions permettant de décrire les changements d'états des éléments du système étudié selon un pas de temps donné. Les

changements sont décrits en fonction des paramètres extérieurs (climat, pratiques culturales, etc.) mais aussi grâce à l'interaction des différents éléments entre eux (déterministes). Nous distinguons deux approches au sein de cette catégorie. Les modèles mécanistes apportent une vision précise des interactions entre les variables, basée sur les phénomènes biologiques (Acock et Acock, 1991). Les modèles fonctionnels simplifient cette vision et, dans la mesure où la perte de précision n'est pas significative, un groupe d'équations peut être remplacé par une relation empirique. En réalité certains modèles dynamiques peuvent marier les deux approches.

Dans les deux cas, l'évolution d'une variable d'état dans le temps est donnée par la formule suivante (Wallach, 2006) :

$$U(t + \Delta t) = U(t) + g[U(t), X(t); \theta]$$

où :  $t$  est le temps,

$\Delta$  le pas de temps,

$U(t)$  la valeur de la variable d'état au temps  $t$ ,

$X(t)$  l'ensemble des variables explicatives au temps  $t$ ,

$\theta$  les paramètres du modèle,

$g$  une fonction de calcul.

Une variable d'état va alors donner une information sur le statut d'un élément du modèle, par exemple la biomasse ou le LAI. Ces variables évoluent en fonction du temps, de variables explicatives et des paramètres du modèle.

Nous retrouvons la variable d'état des deux côtés de l'équation présentée. Cette variable va donc à la fois influencer le modèle mais aussi être influencé par l'évolution du modèle dans le temps.

Les variables explicatives proviennent des différentes mesures nécessaires au modèle. Elles sont des variables intermédiaires dans les calculs. Elles permettent de détailler les phénomènes simulés. Nous les retrouvons uniquement du côté droit de l'équation précédente. Elles rentrent dans le calcul du modèle mais ne sont pas influencées par elles-mêmes.

Les paramètres d'un modèle sont des facteurs constants. Ils représentent une caractéristique particulière du système étudié comme un rythme de fauche, la réserve utile du sol, la variété cultivée.

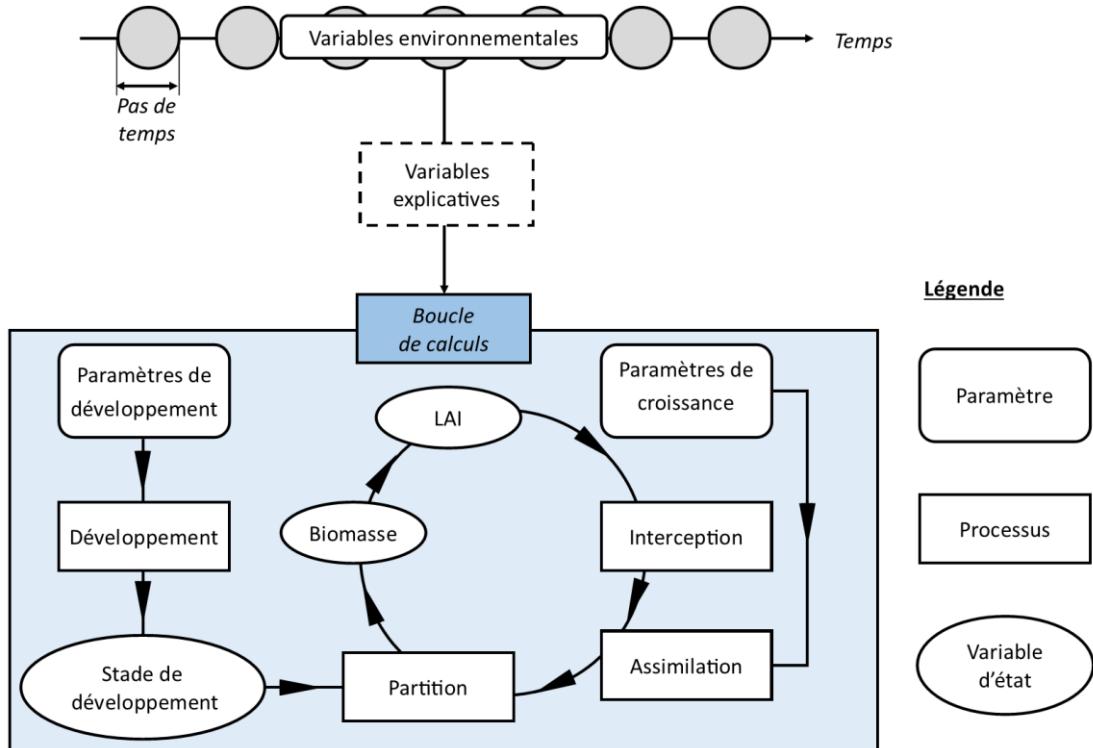


Figure 18. Schéma simplifié des processus d'un modèle de croissance. D'après Delécolle et al. (1992)

Les modèles de croissance dynamiques sont souvent centrés sur le LAI (Figure 18). Cette variable d'état va agir sur la capacité à la photosynthèse et donc, sur la capacité à développer de la biomasse. La production de biomasse est freinée par différents éléments modélisés comme un stress hydrique.

La capacité de ces modèles à prédire la croissance d'une plante dépend de plusieurs facteurs. Elle est définie d'une part par la fonction même d'un modèle, qui est une représentation de la réalité. Le degré de complexité dans la représentation des phénomènes biologiques sera donc en partie garant du degré de précision du modèle (Bouman *et al.*, 1996). D'autre part, elle dépend d'un point de vue technique de la capacité à estimer les variables en conditions non expérimentales.

Afin de pallier à ces erreurs, des méthodes de couplage ont vu le jour entre ces modèles qui estiment la croissance de façon généralement journalière et des données de télédétection qui renseignent sur l'état instantané de la plante (Delécolle *et al.*, 1992). Les modèles sont dans ce cas, une base solide de l'estimation de biomasse et des différents phénomènes biologiques. L'estimation des variables d'état par la télédétection permet de donner un instantané de l'état du couvert.

## 2.2. Le couplage de modèles de croissance

Plusieurs auteurs font un point sur les différentes méthodes de couplage de données satellites à des modèles de croissance (Dadhwal, 2003; Delécolle *et al.*, 1992; Dorigo *et al.*, 2007). Chaque auteur désigne de manière différente les différents types de couplage et détaille la nomenclature de façon plus ou moins précise. Ainsi nous retiendrons les définitions de Dorigo *et al.* (2007) qui les classe en trois catégories : (i) calibration, (ii) forçage et (iii) réajustement (Figure 19).

(i) La calibration touchera aux paramètres d'entrée du modèle (e.g. l'âge du début de repousse, la température optimale de croissance, etc.). Elle consiste en un ajustement des paramètres du modèle de croissance de façon à minimiser l'écart entre une variable d'état et sa valeur estimée par télédétection. (ii) Le forçage et (iii) le réajustement sont très similaires et impactent uniquement les variables d'état. Le forçage vise à remplacer à chaque pas de temps du modèle la variable d'état par sa valeur estimée par télédétection. Les données satellitaires n'étant pas sur le même rythme que le modèle, les estimations de la variable d'état sont interpolées entre deux images. Dans le cas du réajustement, nous n'allons impacter la variable d'état que lors de la date de la mesure satellite. Cela permet de réajuster les valeurs de la variable d'état avec un instantané de l'état de la culture.

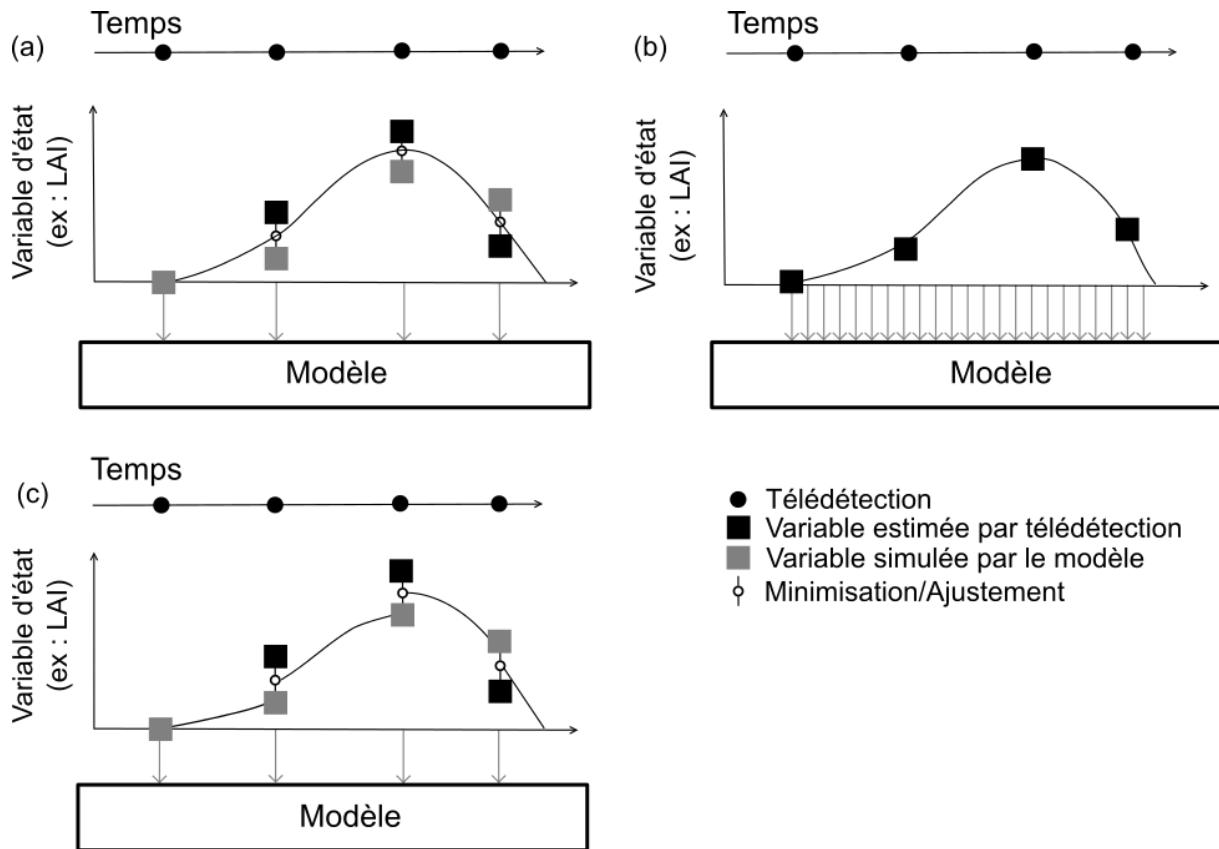


Figure 19. Schéma des différentes méthodes de couplage entre modèle de croissance et données de télédétection : (a) calibration, (b) forçage, (c) réajustement. (adapté de Dorigo et al., 2007)

Les modèles de croissance, suivant leur degré de complexité et leur capacité à modéliser plus ou moins fidèlement les phénomènes biologiques, génèrent des erreurs de prédiction. Les caractéristiques locales du couvert et du sol ne permettent pas de l'appliquer sur un territoire dans sa globalité. Le couplage d'un modèle de croissance à des données de télédétection permet de l'ancrer dans la réalité. Le but est donc de corriger le manque d'informations assimilables par un modèle au niveau du territoire en introduisant des instantanés de l'état de la culture afin de réduire les erreurs de prédiction de la biomasse. Pour cela, c'est généralement la variable d'état correspondant au LAI qui est visée pour le couplage (Dadhwal, 2003).

## **Partie III : Matériel et méthodes**

## I. Les sites d'étude

### 1. La Réunion

La production fourragère est historiquement développée dans les Hauts de l'île. La région des plaines, située entre les massifs montagneux du Piton des Neiges et du Piton de la Fournaise, est celle où l'élevage est le plus développé. Il existe aussi de petites parcelles le long du littoral. Ce sont des exploitations d'engraissement et de production de foin de Chloris. C'est donc la région sud qui a attiré notre attention entre Saint-Joseph et Saint-Pierre et entre Saint-Pierre et Bourg-Murat (Plaine des Cafres).

Comme il a été évoqué précédemment (cf. Partie I), il existe un gradient de répartition des espèces de graminées en fonction de l'altitude et des pratiques culturales. Le choix des parcelles d'étude s'est fait en fonction de ce gradient (ainsi qu'avec l'accord des éleveurs) afin que l'étude soit au maximum représentative des conditions du terrain (Figure 20).

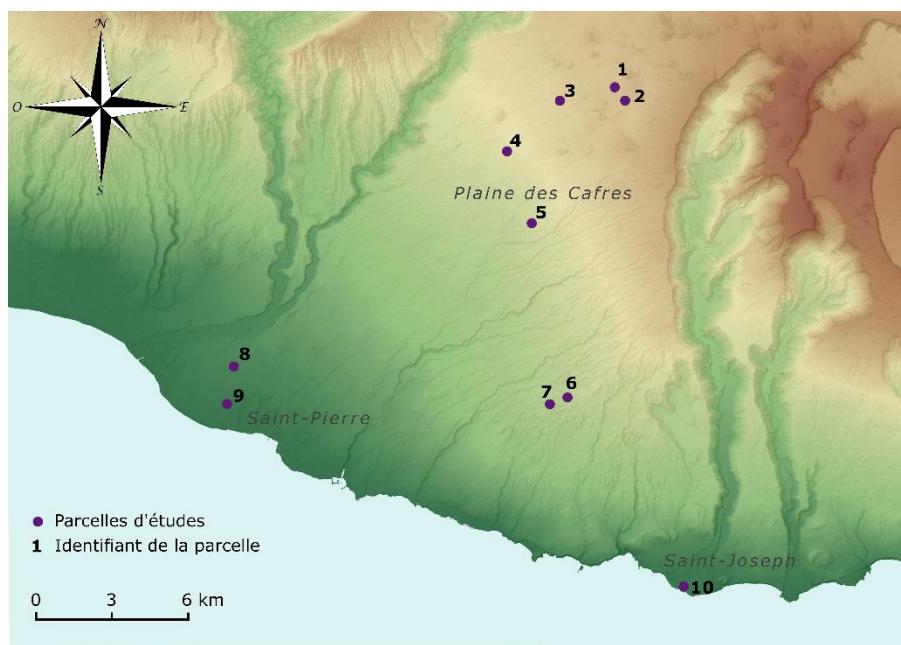


Figure 20. Localisation des parcelles d'étude à La Réunion

Nous avons donc sélectionné sur le littoral des parcelles de graminées tropicales (Tableau 6). Elles sont en grande partie composées de Chloris mais leur composition change au cours des saisons. Ainsi pendant l'hiver, elles peuvent être colonisées par le Jambélon (*Kyllinga elata*).

À mi-hauteur, nous trouvons des parcelles de kikuyu, seul ou en association avec d'autres graminées tropicales ou tempérées. Plus l'altitude est élevée plus la part des espèces tempérées dans l'association sera importante. Pour les parcelles les plus hautes, le kikuyu laissera sa place aux graminées tempérées (Ray-Gras, Dactyle, etc.) plus adaptées aux faibles températures.

Enfin, à plus de 1600m d'altitude, nous trouvons deux parcelles composées exclusivement de graminées tempérées, adaptées au climat des Hauts.

Tableau 6. Inventaire floristique à dire d'expert sur les parcelles d'étude

N° de parcelle	Altitude	Répartition en pourcentage									
		Nom scientifique		Nom commun							
1	1610 m	<i>Lolium multiflorum</i>	Ray-Gras Italien	<i>Dactylis glomerata</i>	Dactyle	<i>Bromus catharticus</i>	Brome cathartique	<i>Trifolium repens</i>	Trèfle blanc	<i>Rumex acetosella</i>	Rumex
2	1615 m	60		10	10	10		5	10		
3	1460 m	70		15				5	40		
4	1300 m			10	40						
5	1020 m			10	10			5	75		
6	795 m								70		
7	790 m								50		
8	90 m								30	50	25
9	50 m								60	50	30
10	60 m								85		10
											5

## 2. Kalahari

Comme nous l'avons vu, il existe une grande diversité de terrains et de pratiques d'élevage dans l'océan Indien. Afin d'explorer cette diversité il a été sélectionné, sur conseil des partenaires de l'Université de Pretoria, d'établir le site d'étude dans le Kalahari. Le site se situe sur l'exploitation d'un éleveur, le Thota Lodge (-26.776654, 22.575735). Ce sont au total plus de 7 500 ha qui sont disponibles, répartis sur trois sites A, B et C (Figure 21), eux même divisés en plusieurs parcelles.

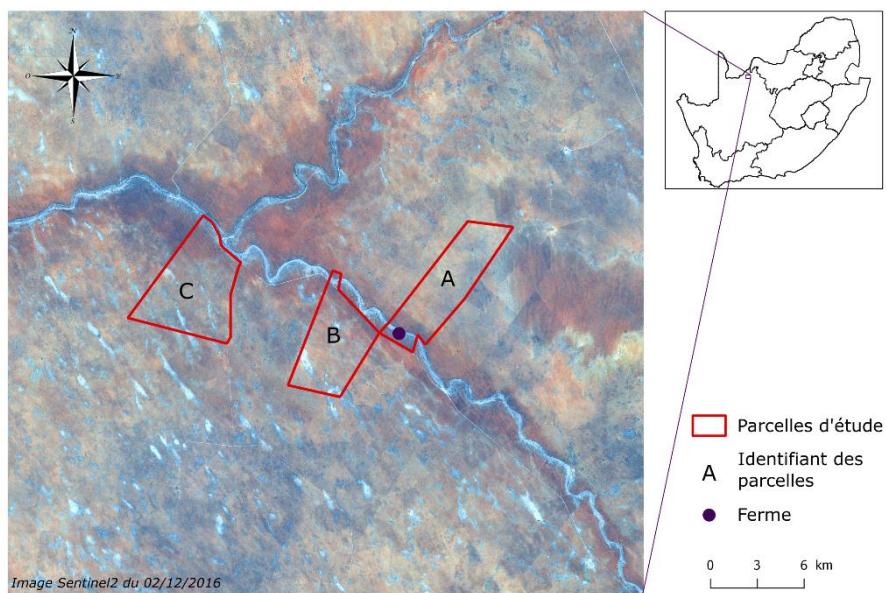


Figure 21. Localisation des sites d'étude du Kalahari, Afrique du Sud

Plusieurs espèces de graminées ont été identifiées avec l'aide de l'éleveur dans des ouvrages, notamment en Afrikaans, présents sur place (Müller *et al.*, 1983; Roberts et Fourie, 1975; Van Rooyen *et al.*, 2001). Cet inventaire (Tableau 7) n'est sans doute pas exhaustif mais présente les graminées les plus rencontrées sur les parcelles d'étude documentées dans les ouvrages précédents.

Tableau 7. Inventaire non-exhaustif des espèces de graminées présentes sur le site d'étude du Kalahari, Afrique du Sud

Nom latin	Nom commun	Parcelle(s)
<i>Anthe phora argentea</i>	Circle wool grass	B
<i>Aristida meridionalis</i>	Giant three-awn	A, B, C
<i>Aristida vestita</i>	Hard stick grass	A, B, C
<i>Centropodia glauca</i>	Gha grass	A, C
<i>Eragrostis lehmanniana</i>	Lehmann's love grass	A, B, C
<i>Eragrostis pallens</i>	Broom grass	A, B, C
<i>Megaloprotachne albscens</i>		B
<i>Schmidtia kalahariensis</i>	Kalahari sour grass	B
<i>Schmidtia pappophoroides</i>	Sandweek	A, C
<i>Stipagrostis amabilis</i>	Dune bushman grass	A, B, C
<i>Stipagrostis uniplumis</i>	Silky bushman grass	A, C

C'est un élevage exclusivement extensif que nous rencontrons dans cette zone. La charge animale est d'environ une unité de gros bétail (UGB)<sup>5</sup> pour 14 ha. Différents animaux sont élevés au Thota Lodge : ovins, caprins, bovins, antilopes. Aucune action n'est effectuée sur les parcelles, autre que la pâture des animaux. Le troupeau de bovins est fixé sur le site A et est rassemblé à l'aide de chevaux. Les autres ruminants sont répartis sur les trois sites. L'éleveur procède à une rotation des animaux sur les parcelles à l'intérieur des trois sites lorsqu'il juge la quantité de fourrage insuffisante sur une parcelle donnée.

<sup>5</sup> 1 UGB correspond à une vache laitière de 600 kg

## II. Les données terrestres

### 1. Données météorologiques

Les données météorologiques produites proviennent de stations CIRAD et Météo France réparties sur tout le territoire réunionnais. Quatre stations ont été utiles pour notre étude, réparties sur les différents sites à La Réunion (Figure 22). Les données retenues sont celles nécessaires aux modèles : température minimale, maximale et moyenne, évapotranspiration, rayonnement global et pluviométrie.



Figure 22. Localisation des stations météorologiques utiles à l'étude à La Réunion

### 2. Mesures sur les parcelles

Deux mesures sont effectuées sur les parcelles. La première est la mesure du LAI grâce à une méthode non destructive. La seconde est la mesure de la biomasse, destructive cette fois. Ce protocole est commun pour les parcelles à La Réunion et en Afrique du Sud, seule la manière de prendre les mesures diffère.

### 2.1. Mesures à La Réunion

Les mesures au champ se font en trois étapes : la mesure de LAI, le prélèvement d'herbe, la géolocalisation (Figure 23). La mesure du LAI se fait grâce à un ceptomètre. Nous utilisons l'AccuPar de la marque Decagon disponible au laboratoire du CIRAD. Il dispose de deux capteurs : l'un sous forme de barre de 80cm à placer sous le couvert, l'autre, plus petit de de forme ronde à placer au-dessus de la canopée. L'appareil mesure directement le LAI. Pour chaque échantillon nous prenons la moyenne de quatre mesures orientées à 0°, 45°, 90° et 135°.

La mesure de biomasse fraîche choisie est destructive. Elle est effectuée à l'endroit même de la mesure de LAI. Le prélèvement est délimité par un quadra de 50 cm x 50 cm. Réalisé en fer à béton au début de l'étude il a ensuite été remplacé par un quadra en bois et d'une hauteur de 10 cm afin d'avoir une mesure plus précise. En effet, les mesures de biomasse ont été réalisées à hauteur de la barre de fauche, c'est à dire 10 cm. L'herbe est placée dans des sacs perforés et pesée pour obtenir la biomasse fraîche. Elle est ensuite séchée pendant 48 h à l'étuve à 70°C, pesée une nouvelle fois pour donner la biomasse sèche. Les mesures de biomasse et de LAI sont moyennées sur la parcelle.

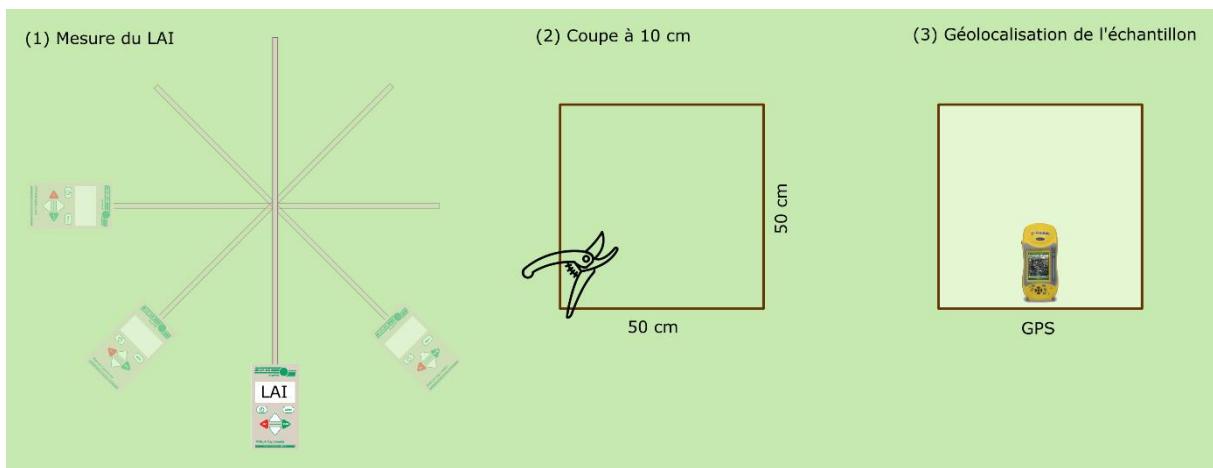


Figure 23. Etape du protocole d'échantillonnage sur la parcelle à La Réunion

Les mesures utilisées au cours de la thèse sont issues de plusieurs études et la répartition des échantillons au sein d'une parcelle varie. Lors de la phase exploratoire, ces mesures furent effectuées le long d'un transect devant représenter la parcelle complète. On a ensuite opté pour une autre méthodologie afin de corriger certaines erreurs détaillées dans la partie résultats. L'échantillonnage s'est fait sur des sous-parcelles afin de réduire la surface étudiée.

Six échantillons sont alors prélevés suivant une grille et espacés de 15 m, ceci dans le but d'être représentatif de la variation de biomasse au sein de la sous-parcelle d'étude. Les 15 m ont été définis afin qu'une seule mesure ne soit prise par pixel de l'image satellite (10 m x 10 m). Enfin, une zone tampon de 15 m à l'intérieur des parcelles a été définie pour isoler les échantillons d'éléments autres que l'herbe (arbre, haies, balles d'ensilage etc.).

Chaque échantillon est marqué avec un point GPS afin de pouvoir le lier aux valeurs de l'image satellite. Le relevé se fait à l'aide d'un GPS différentiel de la marque Trimble d'une précision brute à 6m et de l'ordre de 40cm, après correction.

## *2.2. Mesures au Kalahari*

L'échantillonnage en Afrique du Sud est de même nature. Il a fallu cependant s'adapter au terrain, à la température associée au manque d'ombre ainsi qu'aux outils disponibles. Nous nous intéressons pour cette étude à la biomasse herbacée. Les mesures ont donc été réalisées dans des zones ouvertes sans arbres ni buissons. Les sites d'échantillonnage sont identifiés avec un point GPS.

Le taux de couverture herbacée du Kalahari est très différent de celui de La Réunion. L'herbe est beaucoup plus espacée laissant le sol à nu par endroits. Il est donc aisément qu'un quadra de 50 cm x 50 cm placé aléatoirement se situe sur une surface vierge d'herbe. Afin d'éviter cette situation nous avons augmenté la surface de l'échantillon à 3m x 3m.

La mesure de LAI correspondante à l'échantillon est la moyenne de cinq mesures situées sur les diagonales du quadra.

Les sacs en plastique perforés utilisés à La Réunion sont beaucoup trop fragiles pour l'herbe sèche et fibreuse de la savane. Nous avons utilisé des sacs en papier, plus solides. Pour le séchage, ils ont été perforés à la main et suspendus dans un filet sous un hangar à l'abri de l'humidité et des animaux.

Contrairement à La Réunion, les échantillons ne sont pas moyennés par parcelle. La raison première est la difficulté d'échantillonner de manière rapprochée. Les mesures sont associées à la valeur du pixel correspondant de l'image satellite.

Afin de capter la différence saisonnière, deux missions de deux semaines ont été organisées dans le Kalahari. La première, en novembre 2014, a eu lieu avant les premières pluies. La seconde, en mars 2015, devait permettre un échantillonnage sur de l'herbe fraîche, pendant la

période où les précipitations sont les plus fréquentes. Cette dernière mission ne s'est pas déroulée comme escompté car les pluies tardives de cette année-là interdirent une repousse aussi tôt. Dans les deux cas l'herbe était sèche sur pied.

### III. Les données satellitaires

Notre étude s'étant étendue sur quatre années, les sources d'image sont diverses du fait notamment de la fin de vie du satellite SPOT5. Des images SPOT5 nous sommes donc passés à Spot5Take5 pendant sa désorbitation et enfin aux images Sentinel-2, plus pérennes. Dans cette hétérogénéité de capteurs une constante a cependant été respectée : la résolution spatiale de 10m.

Le choix d'un capteur à haute résolution est nécessaire à La Réunion. Les parcelles réunionnaises peuvent être de petite taille mais aussi avoir une forme très irrégulière. Une résolution de 30 m comme sur les images Landsat par exemple serait inadaptée à notre terrain.

#### 1. Données Spot5

Le satellite SPOT4 a été lancé en 1998 et a été désorbité en 2013. SPOT5, lancé en 2002, s'arrête en 2015 après être passé par une phase d'orbite basse. Malgré une grande capacité de revisite, les clichés de SPOT5 (Tableau 8) n'étaient disponibles que tous les 15 jours environs. Muni d'un miroir lui permettant des dépointer vers d'autres cibles, la fréquence des images acquises n'était pas régulière. Durant la phase de désorbitation, la procédure SPOT5take5 a permis de simuler l'arrivée du satellite Sentinel2 en augmentant la capacité de revisite avec une image tous les 10 jours. La fréquence d'acquisition aléatoire était alors caduque. Seules certaines régions du monde furent alors été choisies, parmi lesquelles -par chance ou opportunité- La Réunion.

Les images panchromatiques ont une résolution de 2,5 m, 10 m en multi-spectrale et de 20 m en moyen infrarouge. L'emprise au sol est de 60 km x 60 km. Quatre bandes sont disponibles : vert, rouge, infrarouge, moyen infrarouge.

L'heure de passage est aussi très importante dans un contexte tropical. À 7h30, heure locale, permet de réduire le risque de formation nuageuse.

*Tableau 8. Caractéristiques du capteur HRG du satellite SPOT5 (Source Airbus)*

<b>Bandes spectrales</b>	<b>Résolution</b>	<b>Spectre</b>
Panchromatique	2,5m ou 5m	0,48 - 0,71 µm
B1 : Vert	10m	0,50 - 0,59 µm
B2 : Rouge	10m	0,61 - 0,68 µm
B3 : Proche Infrarouge	10m	0,78 - 0,89 µm
B4 : Moyen Infrarouge	20m	1,58 - 1,75 µm

## 2. Données Sentinel-2

Sur la seconde partie de la thèse, le programme Sentinel de l'ESA a permis de lancer deux satellites munis de capteurs optiques. Sentinel2A lancé en 2015 permet d'obtenir des clichés à 10m de résolution tous les dix jours. Sentinel2B lancé en 2017 permettra en 2018 de bénéficier d'une couverture mondiale systématique tous les cinq jours.

Treize bandes multi-spectrales sont disponibles, allant de 10m à 60m de résolution. Quatre bandes sont disponibles à une résolution de 10m : Bleu, Vert, Rouge et Proche infrarouge (Tableau 9).

En revanche, l'heure de passage est fortement retardée par rapport à SPOT5. Le cliché est pris à 10h34 heure locale. À cette heure avancée de la matinée les Hauts de l'île sont régulièrement pris par les nuages, particulièrement pendant l'été austral.

*Tableau 9. Caractéristiques techniques des quatre bandes à 10m de résolution Sentinel-2 (Source ESA)*

<b>Bandes spectrales</b>	<b>Résolution</b>	<b>Spectre</b>
B2 : Bleu	10m	490 nm
B3 : Vert	10m	560 nm
B4 : Rouge	10m	665 nm
B8 : Proche Infrarouge	10m	842 nm

Une correction atmosphérique a été appliquée aux images Sentinel-2 (niveau 2A). L'enjeu essentiel d'une correction atmosphérique est la détection des nuages. Il existe trois algorithmes majeurs sur Sentinel-2 : MAJA, MUSCATE et Sen2Cor.

MAJA comme MUSCATE détectent globalement bien les nuages présents mais MAJA est plus lourd à mettre en place. Sen2Cor détecte moins bien les nuages de type cirrus mais présente

l'avantage d'être très simple d'utilisation puisque intégré directement dans le logiciel SNAP permettant les traitements des images Sentinel. De plus il est possible d'intégrer la correction atmosphérique dans une chaîne de traitement allant de l'image niveau 1C jusqu'aux indices de végétation et paramètres biophysiques estimés tels que le LAI.

### 3. Les indices utilisés

Comme il a été abordé précédemment, il existe plusieurs indices calculables à partir des bandes spectrales d'une image permettant de décrire une zone d'étude. Quatre indices de végétation ont été retenus. Le NDVI, MSAVI2, NDWI et RDVI. Tous ces indices peuvent être calculés avec seulement deux bandes communes à tous les capteurs optiques : le rouge et le proche infrarouge.

Sur les images Sentinel-2, il a été possible de calculer directement une estimation du LAI grâce au « *biophysical processor* » (Weiss, 2016) disponible sur le logiciel dédié Sentinel, SNAP (*Sentinel Application Platform*). Cette méthode de calcul est plus complexe qu'un modèle empirique. C'est ici un réseau de neurones qui permet l'inversion de simulations du modèle PROSAIL. Ce dernier permet de simuler la réflectance d'un couvert dans le spectre lumineux suivant divers critères relatifs à sa structure. Une fois ce modèle inversé, on peut connaître les valeurs d'un couvert dans les différentes bandes spectrales en fonction de son développement. Le réseau de neurones utilise huit bandes (B3, B4, B5, B6, B7, B8a, B11 et B12) ainsi que les informations sur la géométrie de l'acquisition de l'image (angle zénithal du soleil et du capteur et l'azimut). Nous l'appellerons LAI<sub>BP</sub>.

La valeur moyenne de ces indices sur la parcelle est associée aux mesures effectuées au champ dans le cadre des modèles de régression.

## IV. Les modèles de croissance

Afin de valoriser la recherche réunionnaise et d'avoir un accès total et rapide au code des modèles, nous avons fait le choix de deux modèles développés sur l'île par le Cirad. Le module de croissance prairial du modèle GAMEDE (Vayssières et al. 2009) adapté pour les espèces tempérées et une adaptation du modèle de croissance Mosicas (Martiné, 2003) initialement prévu pour la canne à sucre, utilisé pour les espèces tropicales.

### 1. Module prairial du modèle GAMEDE

Développé par (Vayssières *et al.*, 2009) le modèle GAMEDE est un modèle de flux de biomasses à l'échelle de l'exploitation. Il comprend six modules dont un module prairial servant à la modélisation de la biomasse fourragère (Figure 24).

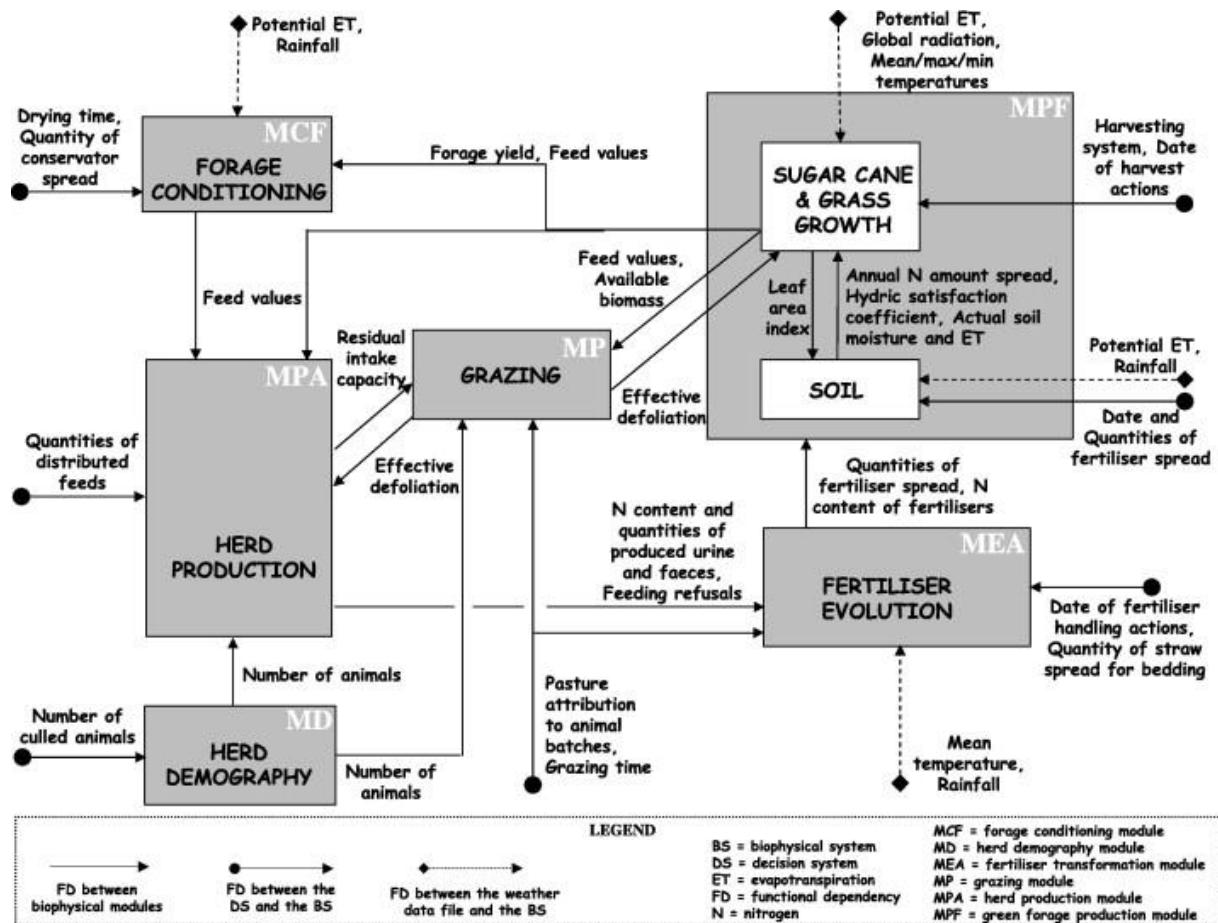


Figure 24. Schéma du modèle GAMEDE issu de Vayssières *et al.* (2009)

Le modèle de production fourragère (MPF) est constitué de trois parties. La première - le choix du lieu de pousse- permet de définir la température optimale de croissance, de l'arrêt de croissance, la profondeur racinaire théorique et la profondeur du sol.

Des calculs annexes permettent d'estimer le stock en eau du sol et l'âge biologique de la plante. La pluviométrie associée à l'ETP permet de calculer le stock en eau du sol. L'âge biologique est calculé quant à lui en fonction de l'indice de stress thermique et hydrique.

Le module de croissance à proprement parlé associe efficience de photosynthèse, indice de stress thermique, indice de photosynthèse, âge biologique, indice hydrique et indice azoté pour calculer la vitesse de croissance. Le cumul journalier de la vitesse de croissance donne la biomasse effective en kg.MS/ha. C'est dans le calcul de la vitesse de croissance qu'intervient le LAI.

Si l'âge biologique est inférieur à l'âge d'équilibre,

$$1.68448 * In * phase * \varepsilon_b * (0.1 * (1 - \exp(-0.65 * Ip)) * 0.48 * 0.94 * Rg * It \\ * Ih^2 * \frac{\exp(-0.04 * (1 - 0.3) * Tp - Tb)}{1 + 0.2}))$$

où :

*In* est l'indice azoté,

*phase* l'effet de saison,

*ε<sub>b</sub>* l'efficience de photosynthèse,

*Ip* l'indice de photosynthèse,

*Rg* le rayonnement global,

*It* l'indice de stress thermique,

*Ih* l'indice de stress hydrique,

*Tp* l'âge d'équilibre et *Tb* l'âge biologique.

Nous retrouvons dans cette équation, l'équation classique pour la croissance d'un couvert,

$$\text{Croissance} = Rg * 0.48 * \varepsilon_a * \varepsilon_b$$

où :  $Rg$  est le rayonnement global,

$\varepsilon_a$  l'efficience d'interception

$\varepsilon_b$  l'efficience de photosynthèse.

$\varepsilon_a$  correspond à la Loi de Beer,

$$\varepsilon_a = 1 - (\exp(-Kdf * LAI))$$

où  $Kdf$  est le coefficient d'extinction du couvert défini à 0,65 dans l'équation du modèle.

Le LAI correspond donc à l'indice de photosynthèse dans le MPF de GAMEDE. C'est cette valeur qui sera forcée.

Fonctionnant très bien sur les espèces tempérées GAMEDE modélise imparfaitement les pics de croissances caractéristiques des espèces tropicales. C'est pourquoi nous choisirons un modèle différent pour les graminées tropicales.

## 2. Modèle de croissance tropical

Le modèle exposé précédemment présente une erreur importante quant à la prédiction de la biomasse des espèces tropicales. C'est pourquoi nous faisons appelle à un modèle de croissance développé pour une autre graminée tropicale, la canne à sucre.

La canne à sucre fait l'objet d'importantes activités de recherche à La Réunion. Elle représente le premier secteur agricole. Depuis 2003, le modèle MOSICAS permet de prédire le rendement de celle-ci. Tout comme les espèces herbacées tropicales étudiées, la canne à sucre est une graminée tropicale avec un système de photosynthèse C4.

Si la structure de la plante n'est pas la même, on a imaginé adapter ce modèle aux graminées étudiées en modifiant les paramètres d'entrée du modèle. Le modèle a été transposé dans le logiciel de modélisation Vensim (déjà utilisé pour le modèle GAMEDE) et est donc légèrement différent du modèle original. Il est organisé en deux modules.

Le module sol détermine le bilan hydrique selon l'évapotranspiration potentielle de (Penman, 1956) (ETP en mm) et la pluviométrie (Pl en mm). Plus précisément, il permet de déterminer

l'évapotranspiration réelle (ETR en mm), la demande climatique maximale pour la transpiration de la plante (ETM en mm) et le taux de satisfaction hydrique du sol sur le profil racinaire (Th), en fonction des conditions climatiques quotidiennes. L'ETM et le Th interviennent dans le module de croissance.

Le bilan hydrique de MOSICAS, issu du groupe de modèles CERES (Gabrielle *et al.*, 1995), est relativement complexe. Aussi, dans un souci d'opérationnalité, c'est le module hydrique de MOBE 5 (Tomassino, 1999) qui a été retenu.

Il correspond au modèle d'Eagleman (Eagleman, 1971), un modèle simple, de type réservoir. L'évapotranspiration réelle (ETR) est une fonction de l'évapotranspiration potentielle (ETP en mm), sans dissocier évaporation du sol et la transpiration de la plante.

Le calcul du LAI s'effectue dans le module de croissance. La modélisation adoptée du LAI est de type global, c'est à dire sans calcul intermédiaire d'apparition de tiges et de feuilles. La formalisation retenue par (Martiné, 2003) est basée sur un bilan entre les surfaces foliaires quotidiennes élaborée, DLai (en  $m^2/m^2/j$ ) et sénesciente, SLai (en  $m^2/m^2/j$ ) :

$$Lai = \text{INTEG}(DLai - SLai)$$

Avec :

$$\textbf{Si } Sdj > debrai \textbf{ Alors } DLai = \text{MIN}(klaidj * dj * swdf2, Dmsl * slaj)$$

$$\textbf{Sinon } DLai = 0$$

Avec :

$$Sdj = \text{INTEG}(dj)$$

Où :

$Sdj$  est le cumul des degrés.jour depuis la plantation ou la coupe précédente (cumul du temps thermique en  $^{\circ}\text{C}*\text{j}$ ).

$deblai$  correspond à la date thermique de levée ou d'apparition du LAI (en  $^{\circ}\text{C}*\text{j}$ ).

$klaidj$  est le taux d'accroissement potentiel de surface de limbe (en  $m^2/m^2/^{\circ}\text{C}$ ).

$dj$  est le nombre de degrés.jour du jour (en °C).

$swdf2$  coefficient de stress hydrique relatif à la croissance linéaire : élongation et structures, ou surfacique : lai (SD, valeur comprise entre 0 et 1).

$Dmsl$  accroissement journalier de la matière sèche de limbe (en g/m<sup>2</sup>/j).

$Slaj$  est la surface massique spécifique des limbes produits quotidiennement (en m<sup>2</sup>/g).

## V. Le couplage

### 1. Les méthodes de couplage utilisées

Il existe trois types de couplages des modèles dynamiques cités précédemment (cf. Partie II II.2.1.) : la calibration, le forçage et le réajustement. Il a été décidé de ne pas modifier automatiquement les paramètres du modèle pour deux raisons. La première raison réside dans le fait que le modèle GAMEDE ait été développé pour l'île de La Réunion et ait été validé. La seconde raison renvoie au choix des paramètres du modèle tropical conforme à la littérature.

Nous appliquerons donc la méthode de réajustement et de forçage. Bappel *et al.* (2005) ainsi que Morel *et al.* (2014) ajustent un modèle polynomial afin d'obtenir des prédictions de LAI et d'efficience d'interception journalières sur des parcelles de canne à sucre pour forcer leur modèle de croissance. Un cycle de pousse de la canne à sucre se déroule sur une année. Pendant ce long cycle il est possible d'obtenir un grand nombre d'estimations de la variable d'état par imagerie satellite.

Dans notre cas, un cycle peut durer entre 60 et 90 jours. Le nombre d'images exploitables sur un cycle de pousse est réduit à trois au maximum lors de notre étude. En effet, même si nous disposons d'une image tous les dix jours, la couverture nuageuse limite le nombre d'images exploitables. Le nombre d'estimation du LAI par parcelle s'en trouve aussi limité. Un modèle polynomial n'est donc pas pertinent dans notre cas. Ce sera une interpolation linéaire qui sera utilisée entre chaque mesure satellite.

Ces deux modèles seront couplés avec des estimations de LAI, variable la plus utilisée pour le couplage dans la littérature. Deux méthodes d'estimations seront comparées et utilisées dans le couplage. L'estimation par modèle empirique avec un indice de végétation et l'estimation via le « *biophysical processor* » présent dans SNAP.

### 2. Calcul de l'erreur

Afin d'évaluer le forçage des modèles de croissance, nous comparerons les prédictions de quatre types de forçage à la prédition sans forçage notée P1. P2 et P3 seront les prédictions du réajustement et du forçage utilisant l'estimation du LAI via le modèle empirique. P4 et P5 seront les prédictions du réajustement et du forçage opéré via le LAI obtenu à partir du « *biophysical processor* ».

Les erreurs seront quantifiées grâce à la RMSE (*Root Mean Squared Error*) :

$$RMSE = \sqrt{\sum (v_{pred} - v_{obs})^2 / N}$$

Afin de pouvoir faire des comparaisons avec d'autres études, nous mettrons aussi en place une erreur relative :

$$rRMSE = \frac{(\sum (v_{pred} - v_{obs})^2 / N)^{0,5}}{\bar{v}_{obs}}$$

Enfin le coefficient de détermination entre les données prédictes et observées sera calculé.

### 3. Modélisation sous Ocelet

Le concept Ocelet est à la fois un langage et un environnement de développement de modèles et de simulations développé au Cirad par (Degenne *et al.*, 2009). Le langage Ocelet est basé sur la logique des graphes. Des entités sont liées entre elles et peuvent interagir grâce à des relations de voisinage définies dans le modèle. Il a été choisi de développer le modèle final sous ce langage car il offre la possibilité d'une sortie visuellement compréhensible à l'échelle du territoire. Il permet l'estimation de la biomasse sur toutes les prairies du territoire ainsi que le couplage de données de télédétection en prenant directement en compte les données au format raster.

Les modèles sont définis dans une partie « scenario » dans laquelle est regroupée la partie fonctionnelle du modèle. Elle contient une série d'instructions permettant de décrire dans quel ordre s'exécutent les différentes opérations au cours d'une simulation. Dans notre cas le scénario comporte deux boucles imbriquées permettant de parcourir toutes les parcelles chaque jour de la simulation. À chaque itération, la biomasse est mise à jour et le cas échéant le couplage effectué. Si au cours de la simulation journalière la date vient à correspondre à la date présente dans le nom du fichier raster, nous calculons la moyenne des pixels par parcelles.

Des « entités » sont définies par un certain nombre de paramètres qui correspondent à l'état de celles-ci à un instant donné (Figure 25). Elles représentent des éléments du modèle pouvant interagir entre eux. Ils sont susceptibles de changer d'état suite à une interaction avec d'autres éléments du modèle. Dans notre cas ce sont les parcelles auxquelles seront attribuées des

données météorologiques les plus proches. Les stations météorologiques seront donc aussi définies comme entités.

Pour créer ce lien entre différentes entités, nous définissons des « relations ». Elles permettent de construire le graphe d’interactions. Les relations peuvent contenir un filtre, une fonction d’interaction et une fonction d’agrégation. Le filtre permet d’exclure certaines arêtes du graphe pour ne pas y appliquer les changements définis. L’interaction définit le corps de la relation. Elle peut par exemple permettre de mettre en lien un raster contenant les données de NDVI ou LAI avec les entités parcelles. La fonction d’agrégation permettra de faire la moyenne des pixels du raster par parcelles.

Enfin les « datafacer » permettent de définir les données d’entrée et de sortie du modèle. Ils permettent de lire des fichiers texte, raster, shapefile etc. et de définir une sortie. Dans notre cas ce sera un fichier .kml (*Keyhole Markup Language*) sous forme de série temporelle. Il présente l’avantage d’être lisible par toutes les machines et par des néophytes contrairement aux fichiers de forme utilisés en SIG.

```

// Entite qui represente un pixel dans l'image LAI
// cell est le contour geometrique du pixel
// lai est la valeur contenue dans ce pixel

entity LaiCell {
    property Cell cell
    property Double lai
}

relation LaiMean<LaiCell ncell, Parcelle parc> {
    interaction updateLai() {
        parc.lai_moyen = ncell.lai
    } agg {
        parc.lai_moyen << Mean
    }
}

// Datafacer qui definit la source de donnees pour le LAI

datafacer RLai{
    store RasterFile("data/lai/20170401.tif") //date de la premiere image
    match LaiCell{
        lai : "0" // la valeur de lai vient de la bande 0 de l'image
    }
}

//Datafacer qui definit le chemin du dossier contenant la serie temporelle

datafacer LaiSeries {
    data TemporalSeriesFile("data/lai")
    match LaiCell {
        lai : "0"
    }
}

```

Figure 25. Extrait de code Ocelet permettant de définir l'entité correspondante à l'image et sa relation avec les parcelles.

## **Partie IV : Résultats et Discussion**

## I. Phase exploratoire

Lors du début de nos travaux, il était entendu que le satellite SPOT5 utilisé serait désorbité au cours de la thèse. Nous ne pourrions donc pas utiliser ce dernier dans un but d'application de la méthode. Un premier travail d'exploration et de prolongation des travaux précédent la thèse a débuté. Fort de l'expérience acquise lors de cette phase exploratoire, la méthode utilisée a été reconduite sur Sentinel-2A, puis déployée en cours de thèse. Le nombre d'images disponibles est plus important (tous les 10 jours) qu'avec SPOT5. En septembre 2017, les premières images du satellite Sentinel-2B viennent compléter la constellation Sentinel permettant une image tous les 5 jours.

### 1. Modèle empirique d'estimation de biomasse avec SPOT5

Les nombreuses études sur la biomasse et le NDVI (cf. Partie II) montrent une forte relation entre ces deux éléments. Il est donc intéressant d'étudier cette relation avant même d'étudier le couplage de données satellite et de modèles de croissance.

Lors de cette phase exploratoire, plusieurs agents se sont succédés afin de récolter les données terrain nécessaire à faire le lien entre l'imagerie satellite et la croissance de la plante. Ces résultats s'inscrivent dans la suite des travaux réalisés précédemment par Lionel Le Mezo (Le Mezo, 2012). Ainsi cette première phase n'explore pas la facette prédiction du LAI mais uniquement la biomasse fraîche. De même, l'attention n'a été portée que sur un seul indice de végétation, le plus utilisé dans la littérature, le NDVI.

Essentiellement réalisés en saison sèche la relation entre NDVI et biomasse fraîche est présentée ci-dessous (Tableau 10) pour fauche et pâture, espèces tropicales et tempérées.

Tableau 10. Relation entre biomasse fraîche et NDVI à partir des images SPOT5

	Saison	N	a	b	R <sup>2</sup>	RMSE	P-value
Fauche Tropicale	Sèche	31	0,03	8,07	0,85	2,08	<0,05
	Fin Sèche	14	0,05	6,06	0,69	0,96	<0,05
Fauche Tempérée	Sèche	17	0,23	5,05	0,54	2,24	>0,05
	Fin Sèche	7	0,22	1,89	0,39	0,18	>0,05
Pâture Tropicale	Sèche	62	3,27	1,29	0,05	3,60	>0,05
	Fin Sèche	-	-	-	-	-	-
Pâture Tempérée	Sèche	33	1,32	3,15	0,31	4,18	>0,05
	Fin Sèche	-	-	-	-	-	-

Globalement, les résultats obtenus quant à la relation NDVI et biomasse sont très disparates suivant l'espèce et la pratique d'exploitation de la ressource. Le nombre d'échantillons permettant d'établir la relation entre le NDVI et la biomasse est moins important pour les espèces tempérées. La couverture nuageuse plus fréquente limite l'observation par satellite. Les résultats montrent des coefficients de corrélation très faibles ( $r^2 < 0,31$ ) pour établir toute relation entre la biomasse des pâtures tropicales et tempérées avec le NDVI. Cette faible relation peut s'expliquer par un échantillonnage difficile dans un milieu très hétérogène. Les prairies étudiées sont multi-spécifiques. Lors des phases de mise en pâture, les animaux consomment l'herbe la plus appétente laissant la parcelle dans une forme d'hétérogénéité totale entre les espèces appétées rases et les autres à hauteur de pousse. Il est alors difficile de rendre compte de manière représentative la biomasse de la parcelle.

Cependant deux relations apparaissent comme fortes sur critère de coefficient de corrélation et de la p-value. La biomasse fraîche des prairies de fauche tropicales en saison sèche comme en fin de saison sèche obtiennent de forts coefficients de corrélation respectivement de 0,69 et 0,85. La RMSE reste quant à elle élevée, entre 1 à 2 tonnes de biomasse fraîche par hectare. Les autres relations étudiées ne sont pas statistiquement significatives à en juger par la p-value. Toutefois, les relations incluant la fauche tempérée reste à étudier. Le faible nombre d'échantillons ne permet pas de relation significative mais avec un coefficient de 0,54 en saison sèche, elle reste intéressante à traiter.

Rahetlah *et al.* (2014) ont mené une étude similaire à Madagascar sur une espèce tropicale, l'herbe à éléphant (*Pennisetum purpureum*), et une espèce tempérée présente dans notre étude, le Ryegrass italien (*Lolium multiflorum*). Le but de cette étude est d'ajuster un modèle empirique entre le NDVI SPOT5 et des mesures de biomasse. Des coefficients de corrélation de 0,68 et 0,73 sont obtenus entre NDVI et biomasse fraîche, respectivement, pour l'espèce tempérée et tropicale. Tout comme les modèles ajustés à La Réunion, la corrélation est meilleure sur l'espèce tropicale.

Kurtz *et al.* (2010), lors d'une étude à grande échelle, mettent eux aussi en évidence la relation entre NDVI et biomasse. L'étude basée en Argentine traite avec des données historiques étalées sur cinq années. La biomasse d'espèces tropicales est mesurée et corrélée avec des mesures de NDVI issues d'images Landsat5 et 7. Elles sont espacées de 3 à 15 jours d'une image. La corrélation est ici nettement plus faible avec un  $r^2$  de 0,5.

Notre étude se situe dans la moyenne des résultats obtenus sur les autres études similaires. Les coefficients de corrélation similaires avec l'étude réalisée à Madagascar. Celle réalisée en Argentine trouve une de ses limites dans le laps de temps important entre la mesure de biomasse et l'image satellite. Ce laps de temps ne peut pas être contrôlé dans ce cas puisqu'il s'agit à la base de données de terrain historique.

Nous pouvons retrouver cette limite dans notre étude. Ne connaissant pas la date de passage du satellite, il était impossible de synchroniser les mesures terrain avec la date de l'image. Les mesures de terrain ont été réalisées tous les 15 jours, rendant variable le temps entre l'image et la mesure de terrain. Afin de ne pas dégrader la relation entre biomasse et NDVI, seuls les échantillons pris dans un délai de 7 jours avant ou après une image ont été intégrés au modèle. Cet écart est visiblement encore trop important.

Un second biais est sans aucun doute le nombre de personnes différentes récoltant l'information sur le terrain. Malgré une méthode bien définie, ce biais peut être suffisamment important pour créer une erreur significative.

Enfin, si le NDVI a été choisi sur la base de la littérature et dans la continuité des études réalisées au CIRAD, il serait utile d'évaluer d'autres indices de végétation, certain tenant compte par exemple de la réponse spectrale du sol.

Cette première étude est une étude préalable afin de procéder aux réglages de la méthodologie. Elle montre clairement une relation entre le NDVI et la biomasse fraîche dont l'étude devra être

poursuivie avec Sentinel-2. Seules les pâtures qui ne montraient pas de résultats significatifs ont été omises dans les futures études. Pour le reste, il sera nécessaire d'apporter des modifications à l'étude.

Le laps de temps entre les images et les mesures sera raccourci, un seul opérateur devra échantillonner et d'autres indices de végétation seront évalués.

## 2. Estimation du LAI à partir des images SPOT5take5

*Les résultats obtenus sur SPOT5take5 ont été soumis et acceptés au congrès international « Living Planet Symposium » de l'ESA pour la présentation d'un poster au mois de mai 2016. Un article plus complet a été soumis à la revue « Photo-Interpretation, European Journal Of Applied Remote Sensing » en mars 2017. Ces deux documents sont consultables en annexe.*

Les résultats précédents ont prouvé une relation forte entre la biomasse herbacée et le NDVI. L'étude de cette relation sera poursuivie sur Sentinel2. Il a été choisi de se focaliser, avec les images SPOT5take5, sur l'estimation du LAI en prenant en compte les remarques faites suite à l'étude sur la biomasse.

En vue d'un couplage des modèles de croissance avec l'estimation d'un paramètre biophysique, c'est le LAI qui a été privilégié dans cette partie de l'étude. Plusieurs indices de végétation ont été comparés afin de confirmer ou infirmer le choix du NDVI. Les résultats présentés ici sont donc les relations entre LAI et indices de végétation sur les prairies de fauche.

Tableau 11. Statistiques descriptives des mesures de LAI effectuées au champ

Espèces	N	Écart moyen mesure-image (jrs)	LAI Min	LAI Max	LAI Moyen	E Type LAI
Tropicale	21	1	0,06	3,3	1,34	1,19
Tempérée	13	1,5	0,08	3,9	2,20	1,29
Toutes	34	1,1	0,06	3,9	1,67	1,29

Dans l'étude précédente basée sur SPOT5, il a été formulé l'hypothèse que l'écart de date entre l'échantillonnage et l'image joue un rôle important dans l'erreur de prédiction. L'un des avantages de SPOT5take5 a été d'avoir un rythme plus régulier de prises de vues, tous les 10 jours. Le terrain a donc été synchronisé dans la mesure du possible avec le passage du satellite.

Cela a permis une réduction importante de l'écart entre l'échantillonnage et l'image. L'écart moyen est inférieur à deux jours (Tableau 10) alors que la limite de sélection de la dernière étude était de sept jours. Le nombre d'échantillons pouvant entrer dans l'ajustement du modèle est, comme dans l'étude précédente, plus faible. Pour les mêmes raisons certaines images au couvert nuageux ont été retirées de l'étude.

Tableau 12. Relations entre le LAI et les différents indices de végétation calculés à partir des images SPOT5take5

Indices	Espèce	R <sup>2</sup>	RMSE	Equation	P-value
NDVI	Tropicale	0.9244	0.3711	0.0023*exp(9.4835*NDVI)	4.16E-12
	Tempérée	0.9366	0.3007	0.0037*exp(8.5314*NDVI)	1.08E-06
	Toutes	0.9258	0.3520	0.003*exp(9.0022*NDVI)	< 2.2e-16
NDWI	Tropicale	0.8947	0.438	0.0835*exp(8.6737*NDWI)	9.839E-11
	Tempérée	0.8526	0.4585	0.0927*exp(7.3046*NDWI)	5.008E-05
	Toutes	0.8770	0.4533	0.0878*exp(7.9919*NDWI)	3.426E-15
MSAVI2	Tropicale	0.9052	0.4154	0.0001*exp(11.1642*MSAVI2)	3.585E-11
	Tempérée	0.9297	0.3166	0.0002*exp(10.6418*MSAVI2)	1.726E-06
	Toutes	0.9150	0.3768	0.0002*exp(10.8978 *MSAVI2)	< 2.2E-16
RDVI	Tropicale	0.9319	0.3523	0.0056 *exp(0.4009*RDVI)	1.543E-12
	Tempérée	0.8911	0.3941	0.22 *exp(0.2802*RDVI)	1.258E-05
	Toutes	0.8912	0.4264	0.0111*exp(0.3376 *RDVI)	5.422E-16

Il existe clairement une relation forte entre les indices de végétation et le LAI sur les parcelles étudiées (Tableau 12). Les quatre indices étudiés (NDVI, NDWI, MSAVI2, RDVI) donnent des corrélations supérieures à 0,85 avec des p-value fortement inférieures à 0,05. Un indice se démarque dans la caractérisation du LAI, c'est le NDVI. Les coefficients de corrélation relevés sont de 0,93 et 0,94 respectivement pour les espèces tropicales et les espèces tempérées. Nous noterons une très bonne relation obtenu grâce au RDVI sur les espèces tropicales ( $r^2=0,93$ ) mais plus faible sur les tempérées ( $r^2=0,89$ ).

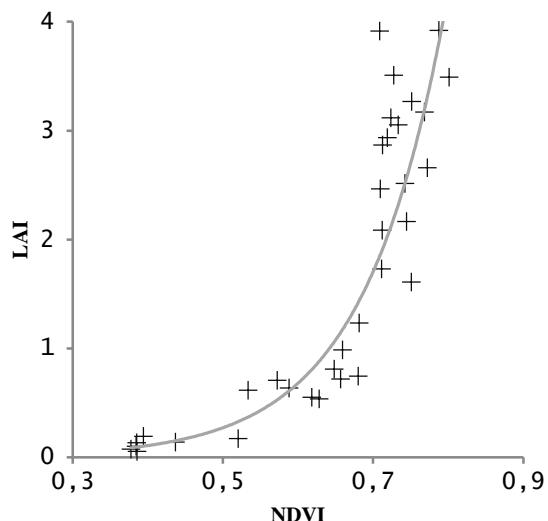


Figure 26. Modèle exponentiel ajusté entre LAI et NDVI à partir des images SPOT5take5

Les paramètres d'ajustement des équations exponentielles sont très proches entre les espèces tropicales et tempérées. La nécessité d'établir deux ajustements différents a été testée statistiquement. Un test de Fisher nous indique qu'il n'y a pas de différence significative entre les coefficients de corrélation des deux populations tropicale et tempérée ( $Z=0,64$  ;  $p\text{-value}=0,261$ ). Cela permet de conclure qu'un seul ajustement entre LAI et NDVI sans discrimination d'espèce est possible. Il est d'ailleurs possible de suivre l'évolution du LAI dans les temps sur les parcelles étudiées (Figure 27).

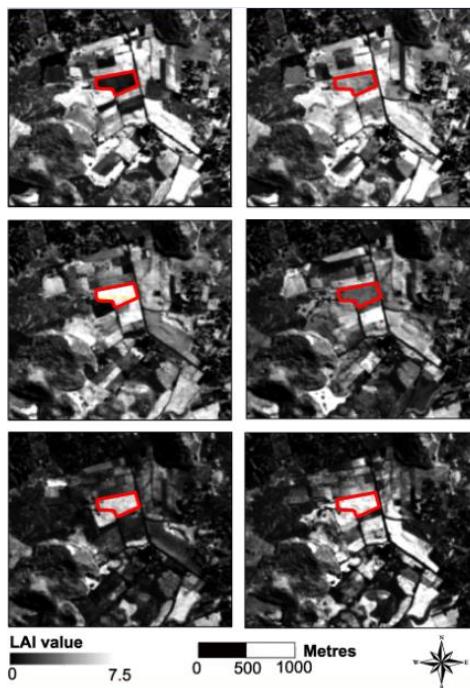


Figure 27. Evolution du LAI sur une parcelle tempérée entre les mois d'avril et aout, à partir d'images SPOT5take5.

Nous observons, malgré une très bonne corrélation, une saturation du NDVI au-dessus de 0,7 (Figure 26). Notre étude n'échappe pas à cet effet régulièrement décrit dans la littérature (Gitelson, 2004; Schino *et al.*, 2003; Tucker *et al.*, 1985). Ce biais observé pourrait se répercuter sur le modèle lors du couplage. La saturation observée pourrait impacter les prédictions d'un modèle couplé avec des données estimées comportant une trop grande erreur.

Plusieurs études sur l'estimation du LAI par indice de végétation permettent de nous situer dans la précision de nos résultats. Aboelghar *et al.* (2010) utilisent des données SPOT4, précédent l'arrivée de SPOT5 mais ayant la même résolution, afin d'estimer le LAI d'une monoculture de riz. La corrélation obtenue atteint un maximum de 0,82 et ce avec le NDVI. Pontailler *et al.* (2003) obtiennent un  $r^2$  maximum du 0,95 toujours à base de NDVI.

Nous noterons que cette étude fut réalisée avec un outillage de laboratoire et s'affranchit des perturbations atmosphériques liées aux mesures satellites. Aussi, le nombre d'échantillons présentés dans cette étude est bien plus faible avec seulement sept échantillons. Enfin, White *et al.* (1997) obtiennent des résultats similaires mais avec une population d'étude beaucoup plus hétérogène puisqu'allant de l'herbe aux conifères.

Ces études sur différents terrains et différentes espèces permettent de situer nos résultats et de confirmer leur légitimité. Il est donc possible d'obtenir sur notre terrain une estimation

suffisamment précise du LAI grâce aux indices de végétation, en particulier avec le NDVI. Ces résultats sont dépendants de la prise de mesure mais aussi du laps de temps entre la mesure terrain et la prise de vue.

Lors de la phase SPOT5take5, la date et l'heure de passage du satellite sur site est connue. Le rythme de passage du satellite est le même que le futur Sentinel2. Le but de cette mission est de simuler son arrivée. Des résultats similaires sont attendus avec les images Sentinel2. Cette expérimentation sera donc reportée telle quelle sur le nouveau capteur, plus pérenne dans le temps. Les mesures seront réalisées à moins de trois jours de la prise d'image et par un opérateur unique.

### 3. Cas particulier de l'Afrique du Sud

Le terrain du Kalahari est radicalement différent de celui de La Réunion. Le protocole a donc été revu afin de pouvoir effectuer un travail similaire tout en respectant les contraintes locales. Il fallait s'éloigner des arbres pouvant changer la réponse spectrale et agrandir le quadra à 3 m x 3 m. Deux phases de terrain se sont déroulées sur ce site. La première en saison sèche du 6 au 18 novembre 2014 a permis de récolter 27 échantillons de biomasse. La seconde qui devait se dérouler en saison humide du 2 au 16 mars 2015 fut exceptionnellement sèche. Elle a permis de récolter 36 échantillons de biomasse et mesures de LAI.

Les premiers résultats obtenus ne montrent aucune relation sur notre site entre les différents indices de végétation calculés sur les images SPOT5 et les paramètres agronomiques mesurés que sont la biomasse et le LAI (Figure 28).

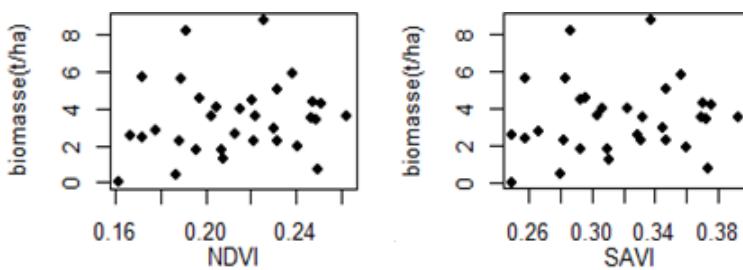


Figure 28. Biomasse fraîche en fonction du NDVI et du SAVI calculés à partir de SPOT5.

En revanche, nous pouvons faire ressortir une relation forte entre le LAI et la biomasse mesurée sur place (Figure 29). Cette relation tend à prouver que l'échantillonnage n'est pas directement en cause dans l'absence de relation entre IV et paramètres biophysiques.

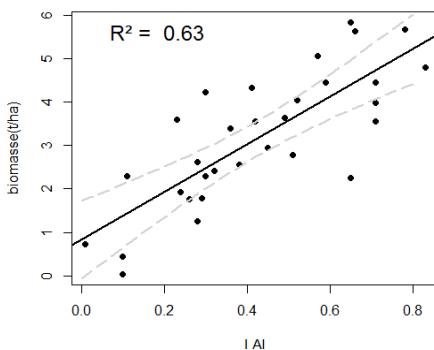


Figure 29. Régression linéaire biomasse~LAI ( $B=5,78.LAI+0,83$  ;  $RMSE=0,91$ )

L'étude de ce site devait s'appuyer sur deux campagnes d'échantillonnage s'étalant de la saison sèche à la saison humide. Or, cette seconde période fut exceptionnellement sèche. Ainsi, la fourchette de valeurs de biomasse et d'indice de végétation est trop réduite pour une étude fiable de ces données. En effet, d'autres études montrent des valeurs plus fortes de biomasse et NDVI. Cui *et al.* (2013) obtiennent avec un capteur Landsat des valeurs de NDVI supérieurs à 0,4 au Botswana, frontalier de l'Afrique du Sud, tout comme Mishra *et al.* (2015) avec des images MODIS.

Ajouté à ce biais important, le terrain est très difficile à appréhender. Il est constitué d'herbe mais aussi d'arbres et buissons. Ces derniers sont parfois à hauteur d'herbe. Ils sont plus profondément enracinés et souffrent moins du manque d'eau. Ces arbres et buissons feront donc augmenter la valeur de NDVI et cette augmentation sera fonction de leur nombre.

La méthodologie utilisée, adaptée du terrain de La Réunion, n'est pas optimale pour déterminer la biomasse des graminées dans le Kalahari. Au-delà de la méthode, ne pas considérer le fourrage dans son ensemble, avec les arbres et buissons, est une limite forte à l'étude. À la fois parce que les fourrages non-herbacés représentent une part importante de la réponse spectrale mais également parce qu'ils sont ingérés par les ruminants. Cette zone d'étude ne se prête pas à une problématique sur la croissance de graminée mais sur le disponible fourrager global qu'il faudrait mesurer. Aussi, devant les difficultés d'accès à cette zone d'étude et le temps nécessaire pour mener à bien l'étude sur La Réunion, il a été décidé de mettre de côté cet aspect de la thèse.

## II. Estimation de la biomasse et du LAI à partir des images Sentinel-2

### 1. Ajustement des modèles empiriques de biomasse et LAI en fonction du NDVI

Fort des expériences précédentes basées sur SPOT5 et SPOT5take5, la phase Sentinel-2 permet de récolter les données directement utiles au couplage des modèles de croissance. Le NDVI très probant sur SPOT5take5 est réutilisé sur ce nouveau capteur. La méthodologie reste la même avec un seul échantillonneur et un échantillonnage dans les trois jours avant ou après l'image. Nous estimons ici la biomasse fraîche et sèche ainsi que le LAI.

#### 1.1. Modèle empirique biomasse

À l'image de la première étude sur l'estimation de biomasse à partir des données satellitaires SPOT5, l'estimation de la biomasse à partir des données NDVI de Sentinel-2 est très disparate en fonction de l'espèce (Tableau 13). Une forte relation est présente entre le NDVI et la biomasse fraîche ou sèche des espèces tropicales ( $R^2=0,78$  et  $0,79$ ) respectivement.

Cette relation apparaît plus faible en ce qui concerne les espèces tempérées ( $R^2=0,44$  et  $0,42$ ). La sous-représentation marquée des espèces tempérées, en particulier sur de faibles valeurs de NDVI pourrait expliquer cette forte différence. De plus la saturation plus rapide du NDVI sur les espèces tempérées, plus denses, fait augmenter l'erreur d'estimation pour les fortes valeurs de NDVI (Figure 30).

La RMSE obtenue de 995 kg MS/ha, toute espèce confondue, paraît élevée en comparaison avec la biomasse maximale enregistrée d'environ 4t MS/ha. Même s'il existe une relation entre la biomasse et le NDVI, elle n'est pas modélisable avec un simple modèle linéaire. Un modèle empirique d'estimation de la biomasse n'est donc pas viable en l'état.

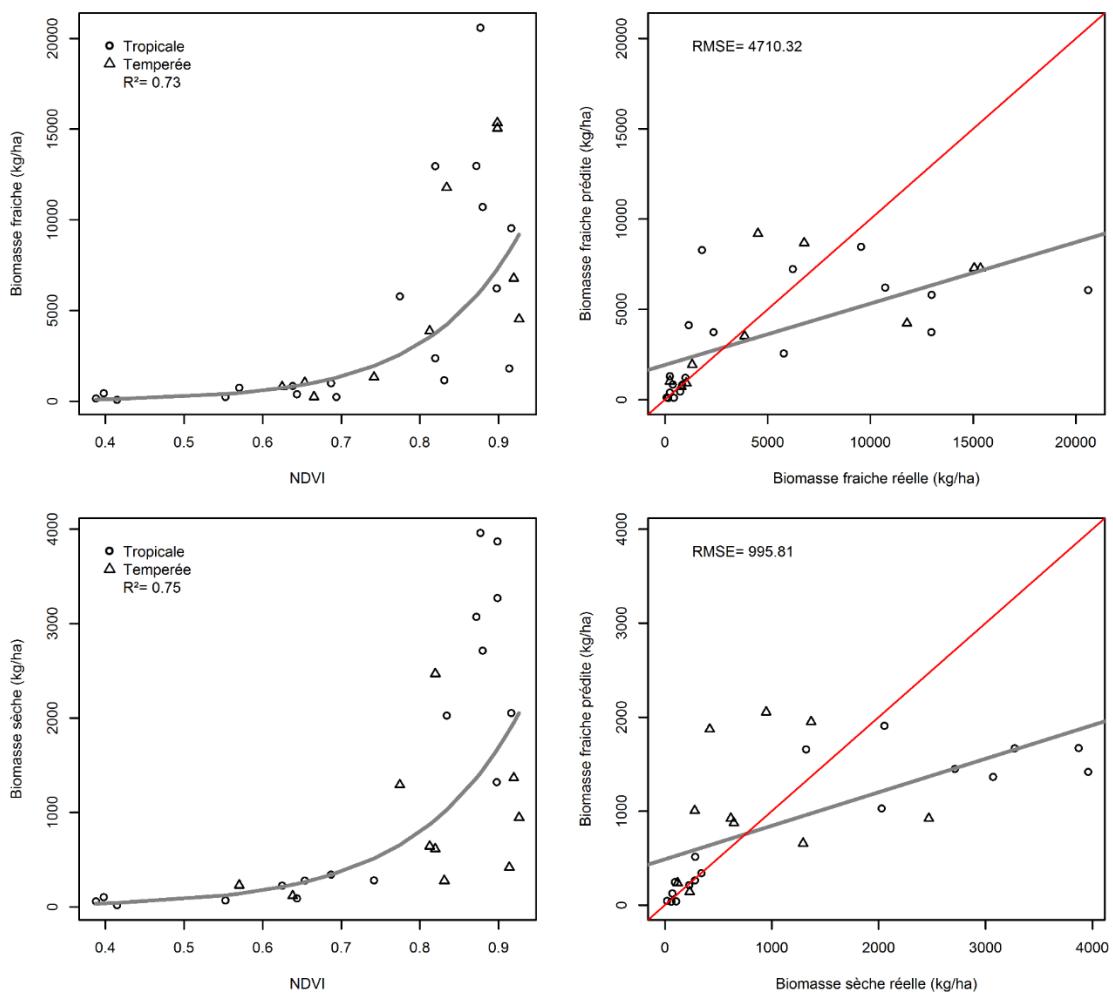


Figure 30. Ajustement du modèle empirique entre la biomasse et le NDVI

### 1.2. Relation entre biomasse et LAI

La mesure de LAI effectuée au champ est un bon estimateur de la biomasse disponible (Figure 31). Nous obtenons une RMSE de 981 kg MS/ha, toute espèce confondue, ainsi qu'une relation forte entre ces deux variables ( $r^2=0,82$ ).

Goswami *et al.* (2015) présentent des résultats similaires sur des travaux effectués en Alaska avec une méthode de mesure de LAI différente, basée sur un photographie traitée par ordinateur afin d'extraire le vert. La relation est elle aussi linéaire mais de meilleurs résultats sont observés. Un travail supplémentaire est effectué avant la pesée des échantillons : le tri de ces derniers afin d'enlever les impuretés (terre et sable) ainsi que les parties sèches. Le lieu d'échantillonnage est aussi soigneusement choisi afin qu'il y ait le moins possible de matière sèche au sol, de litière.

Une saturation est aussi observée autour d'une valeur de LAI de 2. Selon nos mesures cette saturation apparaît pour des valeurs légèrement plus élevées sur les espèces tropicales et pour des valeurs encore plus élevées pour les espèces tempérées.

Nous observons ici une différence de distribution de la variable biomasse en fonction du LAI suivant l'espèce, particulièrement sur la biomasse sèche. Pour une même valeur de LAI, la biomasse sera globalement plus importante pour les espèces tropicales que pour les espèces tempérées. Cette tendance est confirmée par la réalisation d'une ANCOVA, indiquant de manière significative ( $p\text{-value}=0,02$ ) un effet de la combinaison entre LAI et l'espèce sur la biomasse.

Cette différence de distribution peut être en partie expliquée par une plus forte densité des espèces tempérées sous les 10cm. Toute cette biomasse n'est pas récoltée mais impacte la mesure de LAI. Cette concentration de biomasse est évoquée dans l'ouvrage *Managing Pastures* (Fulkerson *et al.*, 1997) qui compare notamment le ryegrass et le Kikuyu. Un facteur de 2,4 sépare la biomasse sèche de kikuyu mesurée à 10cm de celle du ryegrass. C'est pourquoi, pour une même valeur de LAI, la biomasse correspondante est plus faible chez les espèces tempérées.

En fonction de l'espèce étudiée, il existe une relation forte mais différente entre la biomasse et le LAI. Cette relation avérée entre biomasse et LAI confirme la volonté et la possibilité de pouvoir coupler les données de télédétection aux modèles de croissance grâce au LAI. La différence de relation confirme aussi le choix fait d'utiliser deux modèles différents, tempéré et tropical pour modéliser la croissance.

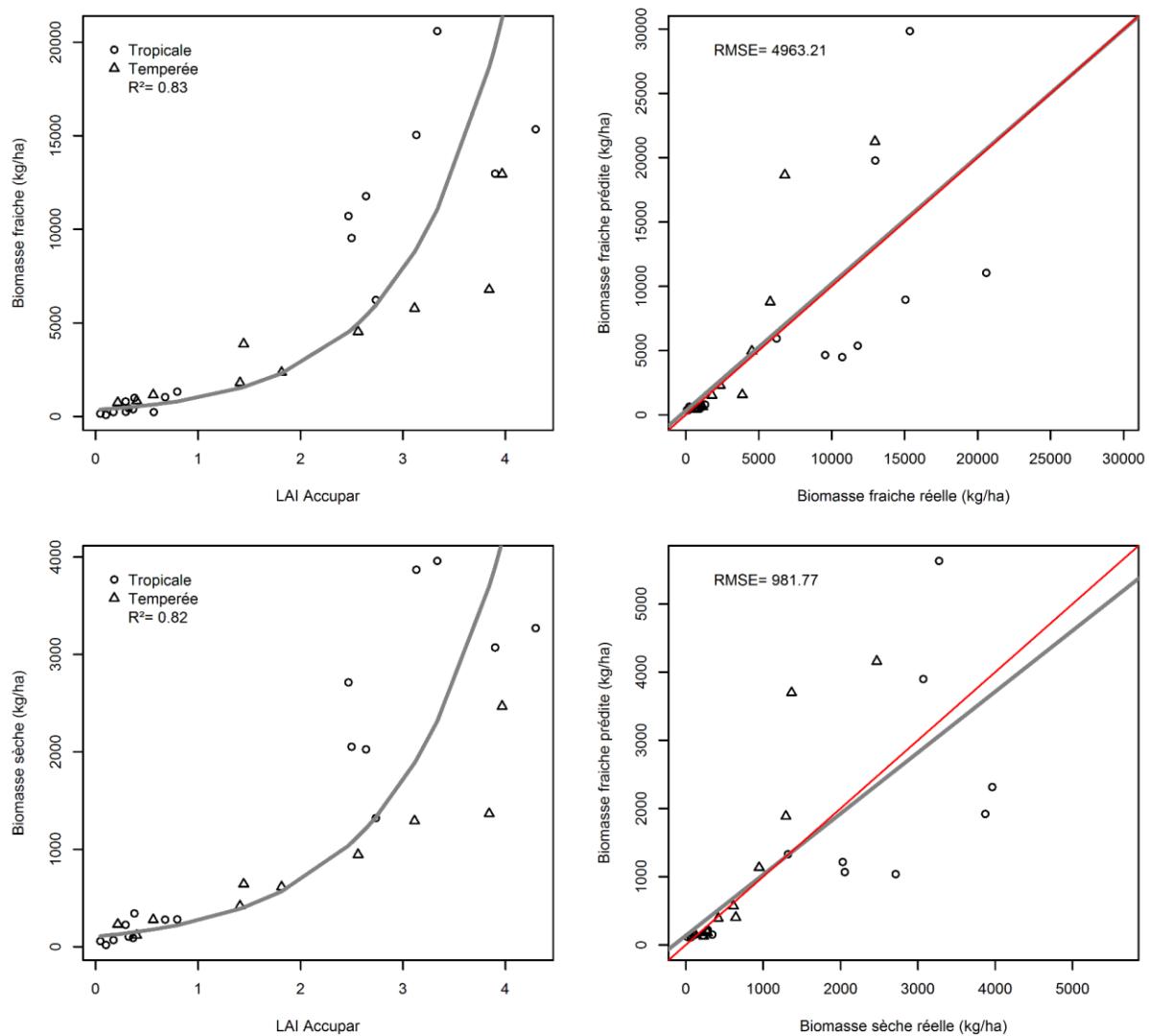


Figure 31. Relation empirique entre la biomasse et le LAI mesuré

### 1.3. Modèle empirique LAI

Tout comme la précédente étude menée sur SPOTtake5, l'ajustement d'un modèle de régression entre NDVI et LAI à partir des images Sentinel-2 montre clairement une forte relation entre ces deux variables.

En comparaison avec la biomasse, la relation entre NDVI et LAI est beaucoup plus forte, en particulier pour les espèces tempérées. Nous obtenons un coefficient de corrélation égal à 0,82 toutes espèces confondues pour cette relation, contre 0,72 pour la biomasse sèche. Pour les espèces tempérées spécifiquement, nous obtenons un coefficient de 0,69 contre 0,42 avec la biomasse sèche.

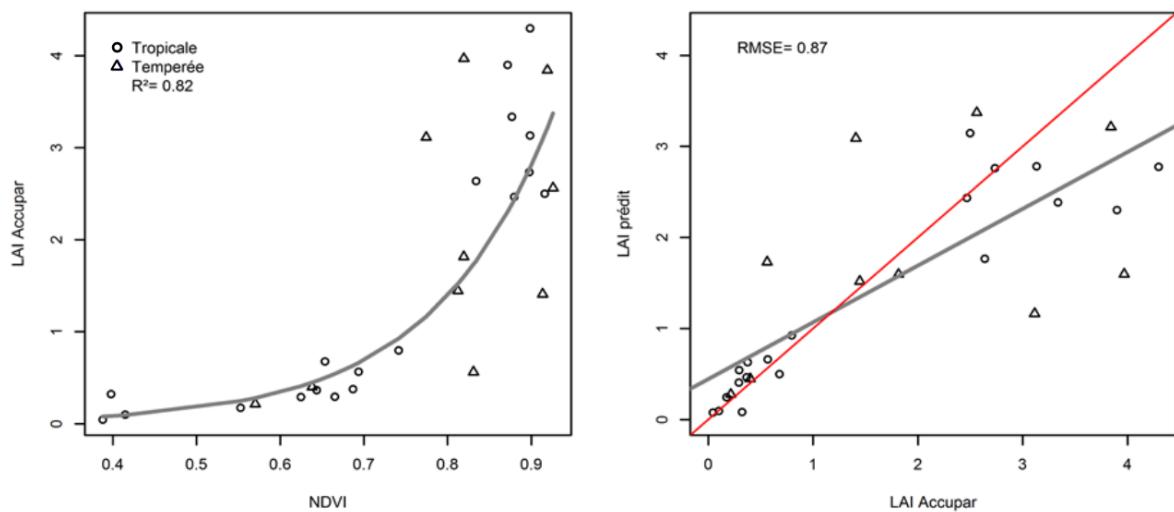


Figure 32. Ajustement du modèle empirique entre LAI et NDVI

Une ANCOVA du modèle permet de démontrer pour cette relation que l'espèce, ou l'interaction NDVI – espèce n'a pas une influence significative avec des p-values respectivement de 0,77 et 0,69. Ces résultats confirment ceux établis sur SPOT5take5 plus tôt dans la phase exploratoire. Il n'est donc pas justifié d'utiliser deux modèles de prédiction différents. C'est pourquoi un modèle unique a été retenu.

$$LAI = 0,0139e^{5,8941.NDVI}$$

Malgré la forte relation trouvée entre NDVI et LAI, la saturation du NDVI est bien visible au-delà d'une valeur de 0,7 (Figure 32). La prédiction de LAI se retrouve impactée par cette saturation à partir d'un LAI supérieur à 1. Un couplage du modèle de croissance avec un LAI supérieur à 1 pourrait augmenter l'erreur de prédiction.

Il apparaît ici une première préconisation pour le couplage du modèle de croissance avec des estimations de LAI issues du modèle empirique avec le NDVI. Le couplage devrait se faire relativement tôt dans le cycle de pousse afin d'utiliser une estimation la plus fiable possible du LAI.

#### 1.4. Conclusion sur les modèles empiriques

Tableau 13. Coefficient de corrélation et RMSE des modèles empiriques de biomasse et LAI avec le NDVI

	LAI		Biomasse fraîche		Biomasse sèche		
	N	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>
<b>Tropical</b>	23	0,74	0,83	4199	0,78	857	0,79
<b>Tempéré</b>	10	0,91	0,69	3867	0,44	729	0,42
<b>Tout</b>	33	0,87	0,82	4607	0,69	947	0,72

Les pistes explorées lors de la phase préalable de l'étude, basée sur le satellite SPOT5 sont confirmées avec le capteur de Sentinel-2. Globalement, nous observons une forte relation entre le NDVI et les paramètres biophysiques des graminées tropicales et tempérées.

La robustesse des relations est différente suivant l'espèce étudiée. Les modèles empiriques ajustés montrent des relations plus fortes lorsque nous traitons des espèces tropicales. Cette affirmation est particulièrement vraie si nous nous basons sur la corrélation entre la biomasse et le NDVI. Nous observons un nombre inférieur d'échantillons d'espèces tempérées qui mériterait d'être accru afin d'affiner la relation et réduire l'erreur possiblement engendrée par une sous-représentation.

Cette phénomène de différenciation entre les espèces tend à se réduire lorsque nous étudions la relation entre le LAI et le NDVI. Il n'y a aucun impact significatif de l'espèce sur l'ajustement du modèle.

En comparaison avec la phase exploratoire menée sur SPOT5Take5, les coefficients de corrélations sont plus faibles avec les images Sentinel-2. Le protocole étant resté le même entre les deux études, la seule source de variation est le changement de capteur. Le satellite Sentinel-2 passe au-dessus de La Réunion à 10h30. Cette heure tardive en comparaison de SPOT5 pourrait être une source de perturbations atmosphériques, impactant les relations avec le NDVI.

Cette modification de l'heure de passage engendrera à terme une forte différence d'images exploitables entre les Hauts et les Bas, et donc de données disponibles pour l'estimation du LAI entre les espèces tempérées et tropicales. Particulièrement en saison humide, le couvert nuageux des Hauts de l'île se forme rapidement dans la matinée, empêchant toute mesure optique.

## 2. Estimation par l'algorithme « *biophysical processor* »

Parmi les outils proposés par la « S2 Toolbox », il existe l'algorithme « *biophysical processor* ». Il permet l'estimation de paramètres biophysiques d'un couvert tel que l'efficience d'interception, le taux de chlorophylle et le LAI.

Les résultats obtenus sur les parcelles d'études montrent une relation linéaire forte entre le LAI mesuré et le LAI<sub>BP</sub>. Le coefficient de corrélation obtenu est similaire à celui calculé lors de la relation avec le NDVI. En revanche la RMSE est de 0,63 contre 0,83 avec la relation empirique (Figure 33).

Nous noterons ici aussi une erreur plus importante sur les fortes valeurs de LAI. La saturation observée avec le NDVI est légèrement atténuée mais persiste. Nous pouvons donc penser qu'une partie de cette erreur sera toujours présente.

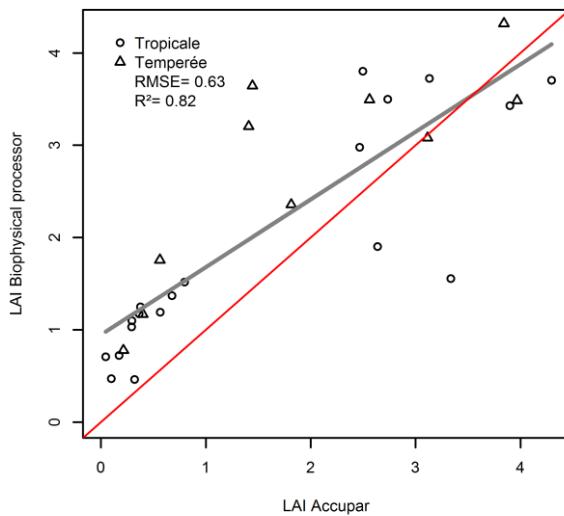


Figure 33. Relation entre le LAI mesuré et le LAI estimé par l'algorithme « *biophysical processor* »

Aucune publication ne fait, à ce jour, référence à l'utilisation du « *biophysical processor* » pour l'estimation du LAI. La seule étude à laquelle se référer est l'ouvrage descriptif de l'algorithme. La RMSE annoncée est de 0,89 sur le jeu de données de validation issu du modèle PROSAIL. La RMSE obtenue dans notre étude est inférieure à cette valeur. Il est spécifié qu'au-delà d'une valeur de LAI égale à 6, l'incertitude de la prédiction augmente fortement. Les valeurs étudiées à La réunion sont comprises entre 0 et 4,32. Cela explique la RMSE plus faible dans notre étude.

### III. Couplage des modèles de croissance

Avant de coupler les données de télédétection au modèle, il a fallu ajuster certains paramètres issus de la canne à sucre pour qu'ils soient plus adaptés à la végétation herbacée.

Par la suite, deux méthodes de couplage ont été abordées : le réajustement et le forçage, tous deux avec le LAI issu d'une relation empirique avec le NDVI ( $\text{LAI}_E$ ), et avec le LAI issu du « *biophysical processor* » ( $\text{LAI}_{BP}$ ).

Afin de juger de l'efficacité du couplage à réduire l'erreur de prédiction de la biomasse, un jeu de six parcelles a été suivi tous les 10 jours pendant trois cycles de pousse.

#### 1.1. Adaptation du modèle tropical

Si le modèle tempéré est développé pour la croissance de l'herbe, le modèle de croissance tropicale est prévu pour la canne à sucre. Même si elle est aussi une graminée en C4, certains paramètres ne coïncident pas avec la croissance de l'herbe. Ils ont donc été ajustés afin d'obtenir la meilleure prédiction possible sur des parcelles tropicales.

Deux méthodes ont été utilisées pour cela. Tout d'abord, nous avons procédé à l'attribution de nouvelles valeurs grâce aux données de la littérature dans le domaine. Ensuite, nous avons pratiqué l'optimisation de certains paramètres sous Vensim. Le logiciel permet en effet de déterminer la valeur optimale de chaque paramètre entre deux bornes fixées par l'utilisateur, ceci afin de réduire l'erreur de prédiction du modèle.

Les paramètres présents dans le Tableau 14 ont été ajustés sur les différentes parcelles tropicales et moyennés. Ainsi, le début d'apparition du LAI est avancé dans le temps puisque contrairement à la canne, il reste des feuilles sous les 10cm de la barre de fauche qui permettent une reprise plus rapide. De même, contrairement à la canne, le système racinaire ne doit pas être refait après une fauche. Le début d'allocation totale de la MS non-racinaire à la MS aérienne est avancé.

Tableau 14. Variables optimisées grâce au logiciel Vensim.

Variable	Unité	Description	Original	Modèle optimisé
deblai	Degré.jour	Début d'apparition du LAI	100	72
tconvopt	°C	Température optimale de conversion	30	28
Msrac	Kg.MS/ha	Matière sèche racinaire	6000	585
kmsadeb	-	Tx initial d'allocation de MS non-racinaire à la MS aérienne	0,6	0,85
debmsa	g.m <sup>2</sup>	Début d'allocation totale de la MS non-racinaire à la MS aérienne	3500	153

La profondeur racinaire a été adaptée suivant la littérature dans le domaine, et notamment grâce à la base de la FAO(« Grassland species ») et à l'outil Tropical Forages (Cook, 2005). La profondeur racinaire théorique du Chloris est de 2,5m mais la dalle basaltique se situant très proche, il est peu probable qu'elles atteignent cette profondeur. Le kikuyu produit des racines jusqu'à 4m de profondeur mais 90% du réseau se situe à 60cm. Ainsi, nous avons décidé d'une profondeur théorique commune à 1m.

Malgré les ajustements des variables d'entrée, l'erreur du modèle brut (P1) sur les parcelles tropicales reste importante (Tableau 15).

Sur trois cycles de pousse nous obtenons un pourcentage d'erreur moyen supérieur à 100%. Ce taux est fortement tiré vers le haut par la parcelle de Mont-Vert. Cette parcelle fut massivement envahie par le Jambélon, prenant la place du kikuyu pendant l'hiver. En revanche, les tendances des cycles de pousse sont respectées puisque les coefficients de corrélation oscillent autour de 0,9.

Tableau 15. RMSE (kg.MS/ha) du modèle tropical brut, sur les quatre parcelles tropicales. La parcelle du Tampon ne comporte qu'un unique cycle.

	Pierrefonds	Saint-Joseph	Mont-Vert	Le Tampon
Tous	1160	1277	2864	273
Cycle 1	726	828	708	-
Cycle 2	508	1426	3471	-
Cycle 3	1765	1465	-	-

Les prédictions du modèle brut peuvent encore être améliorées. Cette faible précision sera un frein certain pour des prédictions de biomasse sans couplage avec des données satellites. Pour autant, l'étude de ce modèle est cohérente puisqu'il respecte la tendance des cycles de pousse. Il reste intéressant d'observer l'effet d'un couplage sur la précision des simulations.

La Figure 34 indique une sous-estimation de la biomasse sèche sur les parcelles de Chloris et de kikuyu du Tampon, ainsi qu'une surestimation de la parcelle de kikuyu de Mont-Vert. Ce sont ces aspects que devra corriger le couplage du modèle.

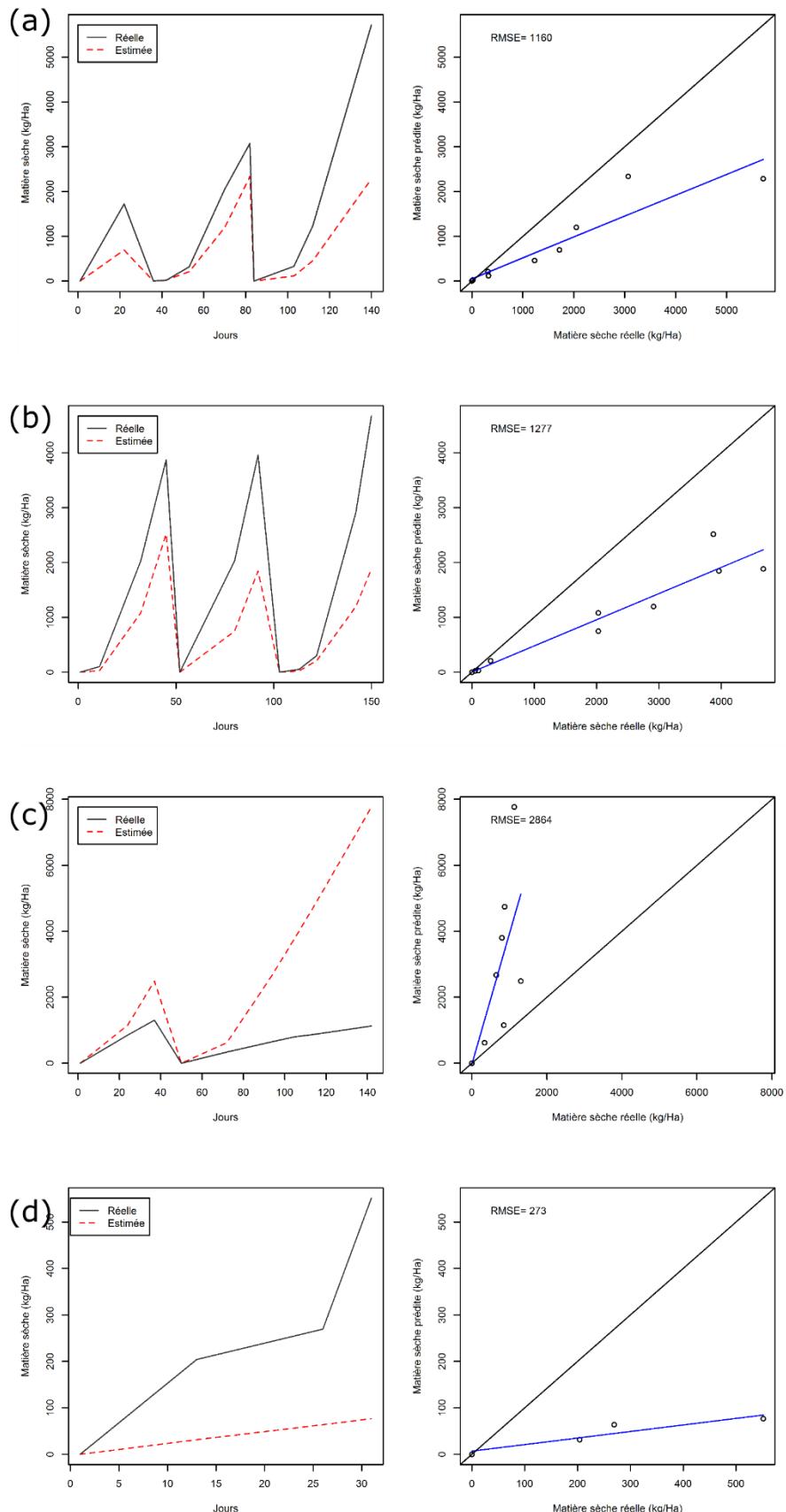


Figure 34. Évolution de la matière sèche disponible réelle et estimée sans couplage (P1) pour les parcelles tropicales.  
Pierrefonds (a), Saint-Joseph (b), Mont-Vert (c), Le Tampon (d).

## 1.2.Couplage des modèles avec le LAI issu de la relation empirique avec le NDVI

Le premier essai de couplage des données satellites aux modèles dynamiques implique le réajustement et le forçage avec les estimations de LAI issues de la relation empirique avec le NDVI. Afin de comparer les résultats des couplages, les modèles ont été exécutés sans couplage pour donner une première prédition brute (P1). Cette opération, déjà faite précédemment pour le modèle tropical (Tableau 15), est présentée dans le Tableau 16 pour le modèle tempéré. Les erreurs obtenues lors de ces simulations serviront d'étaillon pour juger de la précision apportée par le couplage.

*Tableau 16. RMSE (kg.MS/ha) du modèle tempéré brut, sur deux cycles de pousse en parcelles tempérées.*

	SICALAIT	Picard
Tous	973	813
Cycle 1	427	472
Cycle 2	1248	1089

Le modèle tempéré a tendance à surestimer le rendement des parcelles (Figure 35). Il a des difficultés particulières à modéliser les faibles biomasses. C'est donc sur cette capacité à mieux estimer les faibles rendements que sera évalué le couplage.

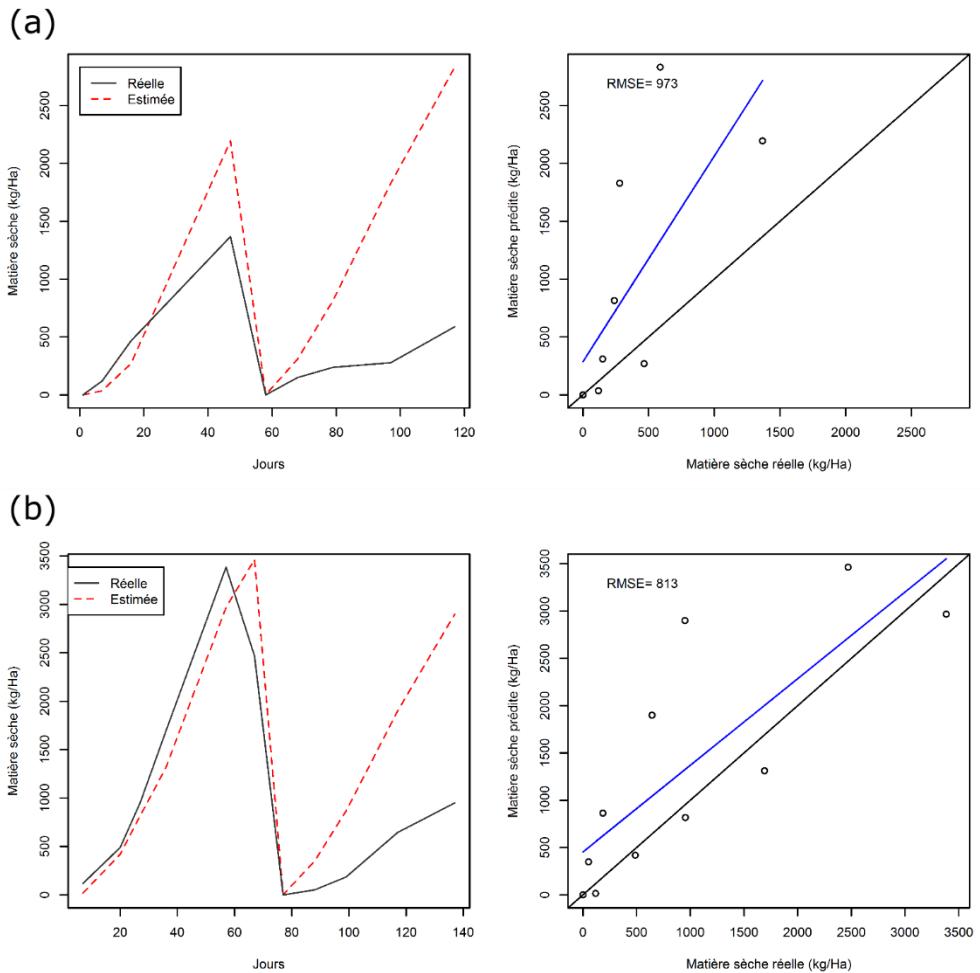


Figure 35. Évolution de la matière sèche disponible réelle et estimée sans couplage (P1) pour les parcelles tempérées (Bourg-Murat). Sicalait (a), Picard (b).

Les résultats du couplage des données de LAI<sub>E</sub> sur les trois cycles est assez variable suivant que nous appliquons un réajustement ou un forçage (Tableau 17). Globalement, le couplage de données satellites permet une baisse de la RMSE allant de 5% pour le réajustement à Saint-Joseph jusqu'à 78% pour le forçage de Mont-Vert sur les trois cycles de pousse cumulés. Si nous prenons les résultats dans leur globalité, la baisse de RMSE est plus importante avec le forçage du modèle, c'est-à-dire avec les données interpolées.

Tableau 17. RMSE (kg. MS/ha) de la prédiction des modèles tropical et tempéré dans le cadre d'un réajustement (P2) et d'un forçage (P3) avec des valeurs de LAI<sub>E</sub>.

Pierrefonds			Saint-Joseph		Mont-Vert		Le Tampon		Sicalait		Picard	
	P2	P3	P2	P3	P2	P3	P2	P3	P2	P3	P2	P3
Tous	911	601	1217	1123	1864	620	156	253	419	418	816	828
Cycle 1	-	-	833	891	708	868	-	-	216	217	472	1085
Cycle 2	486	319	1461	1417	2228	447	-	-	528	526	1094	308
Cycle 3	1475	973	1310	1088	-	-	-	-	-	-	-	-

### 1.3.Couplage des modèles avec le LAI issu du « biophysical processor »

Tableau 18. RMSE (kg. MS/ha) de la prédiction des modèles tropical et tempéré dans le cadre d'un réajustement (P4) et d'un forçage (P5) avec des valeurs de LAI<sub>BP</sub>.

Pierrefonds			Saint-Joseph		Mont-Vert		Le Tampon		Sicalait		Picard	
	P4	P5	P4	P5	P4	P5	P4	P5	P4	P5	P4	P5
Tous	811	427	1162	918	2281	1430	390	595	480	479	826	757
Cycle 1	-	-	653	218*	708	412	-	-	323	323*	472	746
Cycle 2	251	217*	1426	1348	2749	1728	-	-	644	642	1111	769
Cycle 3	1374	696	1295	946	-	-	-	-	-	-	-	-

En ce qui concerne le couplage du modèle tempéré, il est difficile de se prononcer sur la source du LAI utilisé pour le couplage. Si le LAI<sub>E</sub> paraît plus approprié pour la parcelle de la SICALAIT, c'est le LAI<sub>BP</sub> qui donne des meilleurs résultats sur l'autre parcelle de tempérée. Les différences ne sont toutefois pas importantes. En revanche, dans les deux cas c'est la méthode par forçage qui donne la plus faible RMSE et qui est donc à privilégier (Tableau 18).

La biomasse tropicale est estimée au mieux par le forçage avec le LAI<sub>BP</sub>. Deux parcelles font exception. Tout d'abord à Mont-Vert où la parcelle était recouverte de Jambélon, jauni avec le temps. Le NDVI permet une bonne retranscription de ce phénomène à en juger par ses faibles valeurs qui corrigent mieux le modèle. Le LAI<sub>BP</sub> reste lui trop élevé et surestime la biomasse disponible.

Ensuite la parcelle du Tampon est particulière par la façon dont elle est gérée. Si toutes les autres parcelles sont des prairies de fauche, celle-ci est à la fois fauchée et pâture. Elle est fauchée une à deux fois par an et reste en pâture le reste de l'année. Il est fort probable que les animaux aient pâtré pendant ce cycle. Selon les chiffres c'est donc le réajustement avec le LAI<sub>E</sub> qui est le plus efficace. Enfin, pour cette dernière parcelle, un seul cycle a pu être observé car elle passa en pâture continue durant l'observation.

#### 1.4. Analyse des résultats

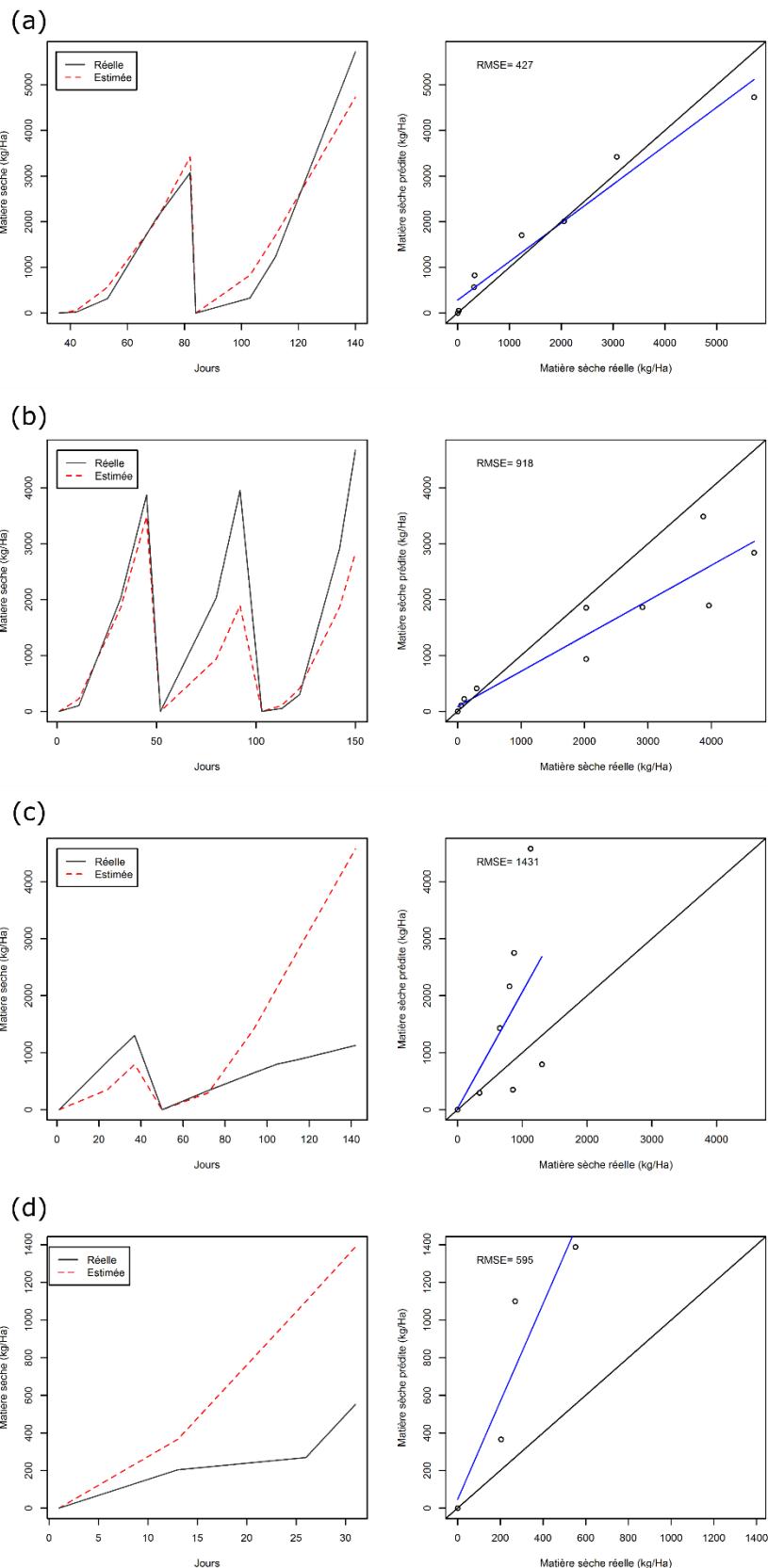
Nous observons un effet significatif et positif du couplage des données satellites aux modèles de croissance, à la fois pour le réajustement et pour le forçage (Tableau 20). Un test de Wilcoxon sur données appariées a été effectué afin de définir si l'effet du couplage est significatif. Ces résultats sont présentés dans le Tableau 19.

*Tableau 19. Comparaison paire à paire des différentes méthodes de couplage avec le modèle brut*

	P1 P2	P1 P3	P1 P4	P1 P5
P-Value	0,0039	0,0077	0,0144	0,0026

Il apparaît que toutes les formes de couplage ont un effet significatif par rapport au modèle brut ( $p<0,05$ ). Nous pouvons conclure à une baisse significative des résultats après couplage du modèle. C'est plus particulièrement le forçage avec le LAI<sub>BP</sub> (P5) qui a l'effet le plus significatif sur le modèle brut (p-value la plus faible).

## Estimation de biomasse fourragère et télédétection



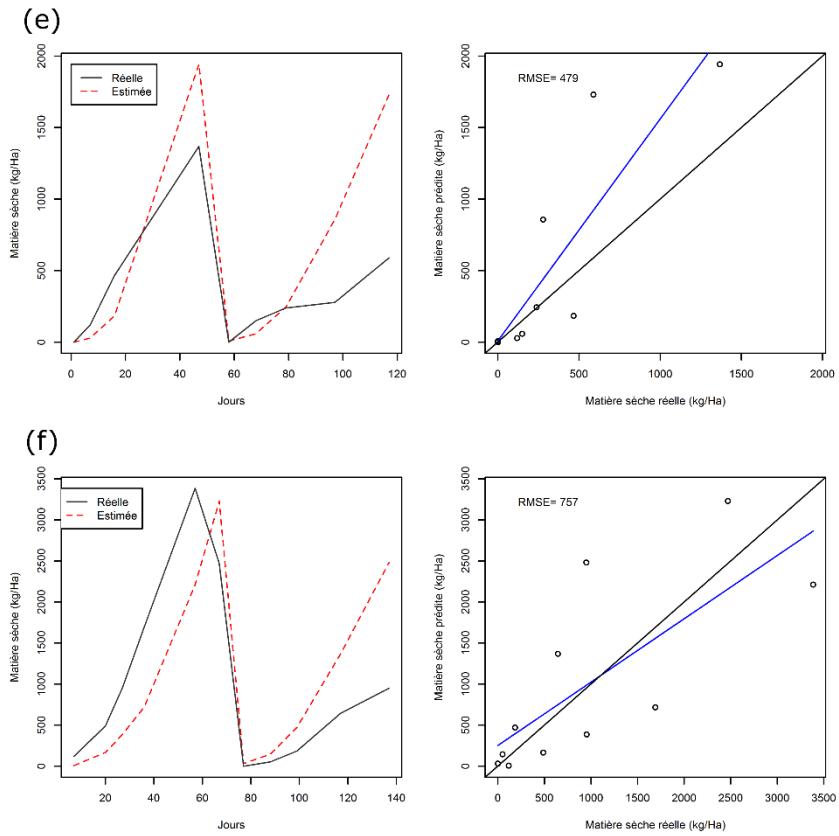


Figure 36. Évolution de la biomasse sur les parcelles de Pierrefonds (a), Saint-Joseph (b), Mont-Vert (c), Le Tampon (d), Sicalait (e), Pl des Cafres (f), après le forçage par le LAI<sub>BP</sub>.

Nous observons toutefois une erreur de prédiction de la biomasse très variable suivant les parcelles mais aussi suivant les cycles d'une même parcelle (Figure 36). Il est important de connaître la cause d'une erreur élevée pour connaître par suite le cas de figure pour lequel la prédiction est la meilleure. Une ANCOVA permet de définir les variables influentes sur le pourcentage de RMSE obtenu lors du forçage des modèles avec le LAI<sub>BP</sub>. Le modèle étudié est celui des effets du nombre de forçages sur le pourcentage de RMSE avec pour covariable le nombre de forçages, le jour du premier forçage, le jour de forçage moyen et l'espèce.

Analysis of Variance Table						
Response: data\$RRMSE	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr (>F)	
data\$NbForcages	1	4754	4754	5.2750	0.105303	
data\$PremierForage	1	23	23	0.0255	0.883348	
data\$JrForageMoyen	1	7354	7354	8.1598	0.064761	.
data\$Espece	1	615	615	0.6824	0.469324	
data\$NbForcages : data\$PremierForage	1	67625	67625	75.0324	0.003237	**
data\$NbForcages : data\$JrForageMoyen	1	13276	13276	14.7307	0.031190	*
data\$PremierForage : data\$JrForageMoyen	1	23	23	0.0260	0.882217	
data\$NbForcages : data\$PremierForage : data\$JrForageMoyen	1	1452	1452	1.6109	0.293888	
Residuals	3	2704	901			
---						
signif. codes: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1						

Figure 37. Résultats de l'ANCOVA déterminant les variables influentes sur le pourcentage de RMSE

Nous ne détectons pas d'effet seul du nombre de forçages, du jour du premier forçage ou de l'espèce ( $p>0.1$ ). De même, le jour de forçage moyen n'a pas d'effet réellement significatif. En revanche, deux interactions ont un effet sur la RRMSE : le nombre de forçages associé au premier forçage et le nombre de forçages associé au jour de forçage moyen (Figure 37). Grâce à cela, il est possible de définir une typologie pour obtenir des résultats significatifs lors du forçage.

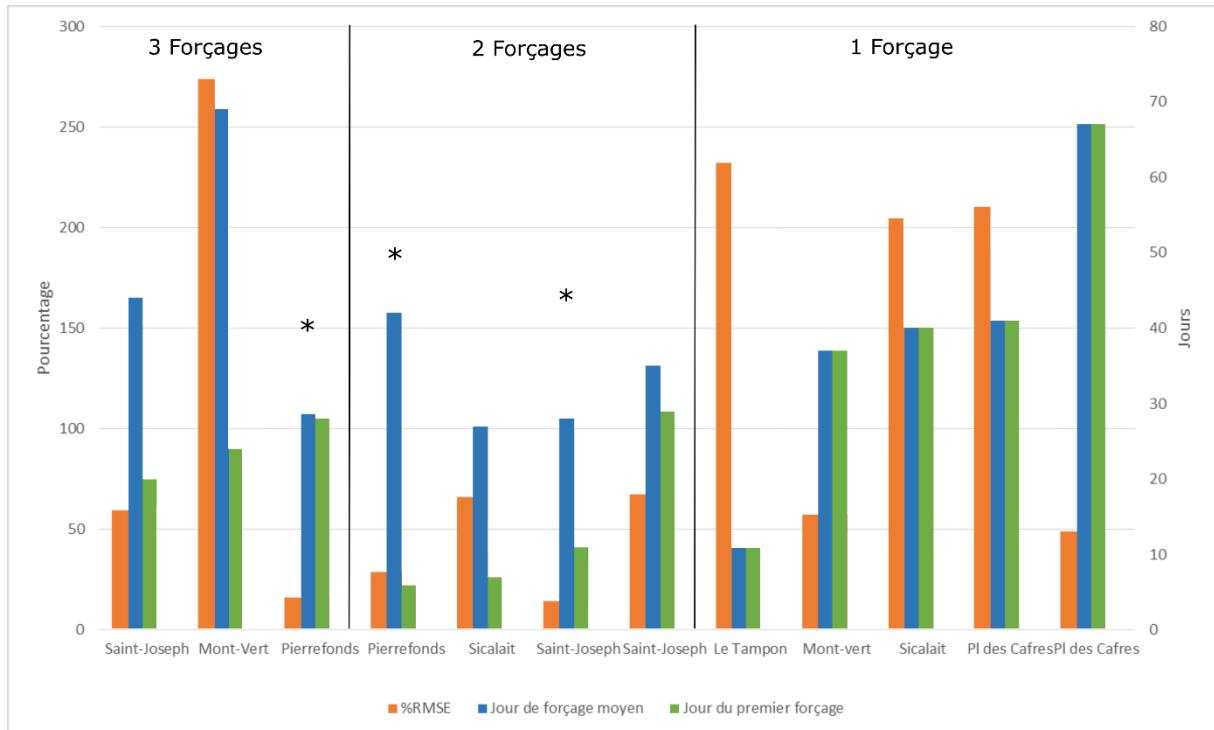


Figure 38. Pourcentage d'erreur des simulations en fonction du nombre de forçages, du jour de forçage moyen et du jour du premier forçage.

Obtenir un bon forçage de nos modèles par le LAI<sub>BP</sub> passe donc par plusieurs règles. Un unique forçage ne suffit pas à garantir une prédiction fiable. Il est nécessaire de forcer plusieurs fois le modèle et d'avoir un forçage qui intervient tôt dans le cycle de pousse.

Les trois meilleurs résultats en termes de pourcentage de RMSE sont obtenus avec deux forçages minimum et un jour moyen de forçage inférieur à 30 jours (présentés avec une \* Figure 38). Trois parcelles sont concernées : deux tropicales et une tempérée. Dans l'optique d'une mise en application réelle du modèle avec les données des satellites Sentinel2 A et B, il serait possible de forcer celui-ci cinq fois dans les 30 premiers jours (avec une image satellite tous les 5 jours).

Peu d'études portent sur le forçage de modèles de croissance de graminées fourragères tropicales. De la même manière, il n'existe pas de modèles spécifiques aux fourrages tropicaux. Ils sont adaptés de modèles de culture ou de fourrage tempéré (Andrade *et al.*, 2016). Pequeno *et al.* (2014) adaptent le modèle CROPGRO sur une population de *Bracharia brizantha*. Après calibration du modèle grâce à des mesures de terrain, la RMSE obtenue se situe entre 464 et 526 kg.MS/ha pour des biomasses maximales similaires à notre étude.

Dans la thématique télédétection, nous pouvons citer Nouvellon *et al.* (2001) qui étudient le couplage d'un modèle avec des images Landsat sur une période de 10 années. Ils utilisent le modèle SAIL afin de prédire le NDVI du modèle et tentent de réduire l'écart avec le NDVI réel. Le maximum de matière sèche récoltée sur un pic de croissance est d'environ 800 kg.MS/ha. La RMSE du modèle après couplage est de 100 kg.MS/ha. Duru *et al.* (2009) obtiennent une RMSE de 540 kg.MS/ha sur des prairies tempérées sans forçage de modèle. Yuping *et al.* (2008) constatent un baissant de la RMSE de 1 500 kg.MS/ha à 1 100 kg.MS/ha sur une production de blé dont la biomasse maximale est de 12 t.MS/ha. Les erreurs obtenues sont donc dans la moyenne basse par rapport aux études similaires. Cependant, quelques réserves sont émises étant donné le nombre de cycles restreints pour la validation du forçage.

Toutes ces études ont un point commun : un cycle unique de croissance par année. La pousse est régulière et le nombre données satellites et/ou terrains sont conséquentes. Dans notre étude, la croissance est rapide (jusqu'à six cycles par an) et le nombre de mesures par cycle est donc très limité.

Globalement, le forçage est réussi. Il faut garder à l'esprit que ce sont les modèles qui ne prennent pas en compte la fertilisation ou encore que le module sol est très simpliste. Il est donc possible d'améliorer la prédiction de fourrage relative au modèle brut entre les forçages.

Tableau 20. Tableau récapitulatif des résultats des simulations des modèles tropical et tempéré.

<i>Nativel</i>															<i>Saint-Joseph</i>															
P1			P2			P3			P4			P5			P1			P2			P3			P4			P5			
R <sup>2</sup>	RMSE	RRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	RRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	RRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	RRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	RRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	RRMSE													
Cycle 1	1*	726	0,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,99	828	0,55	0,99	833	0,56	0,99	891	0,59	0,99	653	0,44	0,99	218	0,15	
Cycle 2	0,98	508	0,46	0,96	486	0,36	0,99	319	0,23	0,97	250	0,18	0,99	216	0,16	0,99	1426	0,71	0,99	1461	0,73	0,99	1417	0,71	0,99	1426	0,71	0,99	1348	0,68
Cycle 3	0,99	1765	0,96	0,99	1475	0,61	0,99	973	0,4	0,99	1374	0,57	0,99	696	0,29	0,99	1464	0,92	0,99	1310	0,82	0,99	1088	0,69	0,99	1295	0,82	0,99	946	0,6
Tous	0,87	1160	0,88	0,95	911	0,64	0,96	601	0,42	0,92	811	0,57	0,96	427	0,3	0,93	1277	0,78	0,95	1217	0,73	0,97	1123	0,68	0,92	1162	0,7	0,88	918	0,55

\* N=2

<i>Corré</i>															<i>Sedael</i>															
P1			P2			P3			P4			P5			P1			P2			P3			P4			P5			
R <sup>2</sup>	RMSE	RRMSE																												
Cycle 1	0,86	273	1,06	0,8	156	0,61	0,85	253	0,99	0,8	390	1,52	0,85	595	2,32	0,95	708	0,99	0,95	708	0,99	0,96	868	1,21	0,95	708	0,99	0,94	412	0,57
Cycle 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9	3471	5,5	0,91	2228	3,1	0,96	447	0,71	0,89	2749	4,35	0,89	1728	2,74	
Cycle 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Tous	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,51	2864	4,34	0,64	1864	2,82	0,22	620	0,94	0,57	2281	3,45	0,37	1431	2,17	

<i>Picard</i>															<i>Sicalait</i>															
P1			P2			P3			P4			P5			P1			P2			P3			P4			P5			
R <sup>2</sup>	RMSE	RRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	RRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	RRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	RRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	RRMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	RRMSE													
Cycle 1	0,87	472	0,31	0,87	472	0,31	0,7	1085	0,72	0,87	472	0,31	0,73	746	0,49	0,96	427	0,87	0,93	216	0,44	0,93	217	0,44	0,94	323	0,66	0,94	323	0,66
Cycle 2	0,99	1089	2,97	0,99	1094	2,99	0,96	308	0,84	0,99	1111	3,03	0,98	769	2,1	0,91	1248	4,97	0,9	528	2,1	0,96	308	1,14	0,93	644	2,05	0,93	642	2,04
Cycle 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Tous	0,64	813	0,82	0,64	816	0,82	0,52	828	0,83	0,63	826	0,83	0,56	757	0,76	0,49	973	2,73	0,65	419	1,18	0,65	418	1,17	0,74	480	1,34	0,74	478	1,34

#### IV. Forçage et visualisation spatiale du modèle

Ocelet est une plateforme et un langage de programmation spatiale. Elle permet l'exécution de programmes et l'export des résultats sous forme de fichiers de forme. Le format de fichier .kml (*Keyhole Markup Language*) choisi permet la visualisation des résultats sous forme de série temporelle. Il faut pour cela utiliser la barre de données historiques pour naviguer dans le temps de la simulation.

Les deux modèles de croissances ont été traduits en langage Ocelet. Le forçage est automatique. Le fichier parcellaire est chargé à l'avance et les modèles vont tourner simultanément sur chaque parcelle. Les images doivent être placées dans un répertoire spécifique et nommées par leur date de prise de vue. Le nom du fichier est alors chargé et c'est à cette date que le modèle est forcé. Un masque de nuages issus de la correction atmosphérique Sen2Cor permet de ne pas forcer en présence de nuage. On notera toutefois que le masque Sen2Cor ne détecte pas tous les nuages, particulièrement les Cirrus. Une erreur de prédiction peut alors être causée par la présence de nuages.

Nous obtenons en sortie un fichier permettant de se déplacer dans le temps de la simulation. Une partie de ce fichier permet de visualiser l'attribution des données climatiques aux parcelles. L'autre partie permet de visualiser l'ensemble des parcelles colorées, grâce à un gradient de couleur allant du rouge au vert. Il permet graphiquement de rapidement détecter un manque de biomasse (Figure 39).

Devant une puissance de calcul demandé importante, nous avons fait le choix de ne pas effectuer une sortie graphique tous les jours. Si le modèle simule la biomasse disponible de manière quotidienne, l'écriture sur le fichier .kml se fait tous les dix jours. Pour les mêmes raisons, nous avons dû réduire le nombre de parcelles pour lesquelles la biomasse a été simulée. Tout d'abord en choisissant les limites de la commune du Tampon, terre d'élevage des Hauts de La Réunion au cœur de la problématique de la production fourragère. C'est plus de 800 parcelles qui sont présentes. Afin de réduire encore le nombre de ces dernières, le choix a été fait de ne sélectionner que les parcelles de plus de 20 000 m<sup>2</sup>, soit 407 parcelles. La Figure 39 montre l'évolution de la biomasse sur ces parcelles de mai à juin 2017.

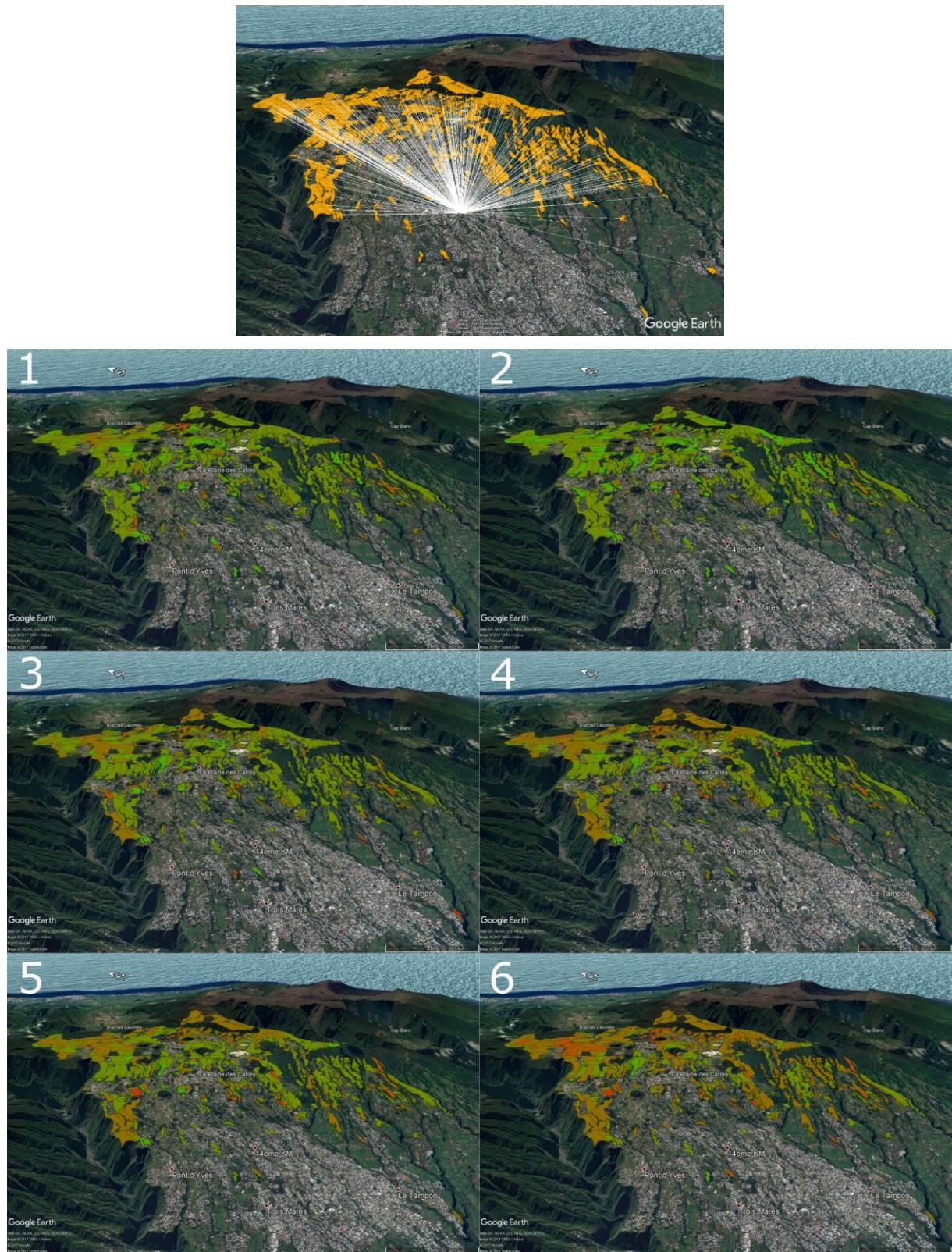


Figure 39. Capture d'écran de la visualisation d'un fichier KML en sortie d'Ocelet. Exemple sur la Commune du Tampon et une station météorologique qui diffuse ses données. Simulation de mai à juin 2017.

Nous imaginons la suite du développement des modèles sur la plateforme Ocelet en trois volets :

- Améliorer la prédiction des modèles de croissance. Affiner les simulations en prenant en compte les types de sol par exemple. Ils pourraient être intégrés via la carte pédomorphologique de l'île au format raster.
- Améliorer l'autonomie du modèle. Actuellement c'est un rythme de fauche qui est imposé au modèle. L'étape suivante est la détection des fauches. Il est possible d'explorer une combinaison des images Sentinel-2 avec les images radar Sentinel-1. Pour détecter les dates de fauche.
- Améliorer les performances du modèle. Actuellement le programme développé sous Ocelet permet le forçage du modèle de croissance et la simulation de la biomasse disponible. Cela étant ce processus est encore trop lent et mérirait d'être optimisé.

Enfin le parcellaire utilisé est encore trop peu précis ou en partie inadaptée à notre problématique, en particulier dans les Hauts (Figure 40). Sur certaines parcelles on observe de vastes zones de forêts. Dans ces zones catégorisées en élevage, la pâture se fait sous couvert. La prédiction est alors biaisée par la réponse spectrale des arbres. Sur d'autres, le découpage n'est pas assez fin. On peut alors observer plusieurs parcelles de taille inférieure dans une même entité du parcellaire. C'est alors la moyenne de LAI de ces différentes parcelles qui est utilisé pour forcer le modèle.

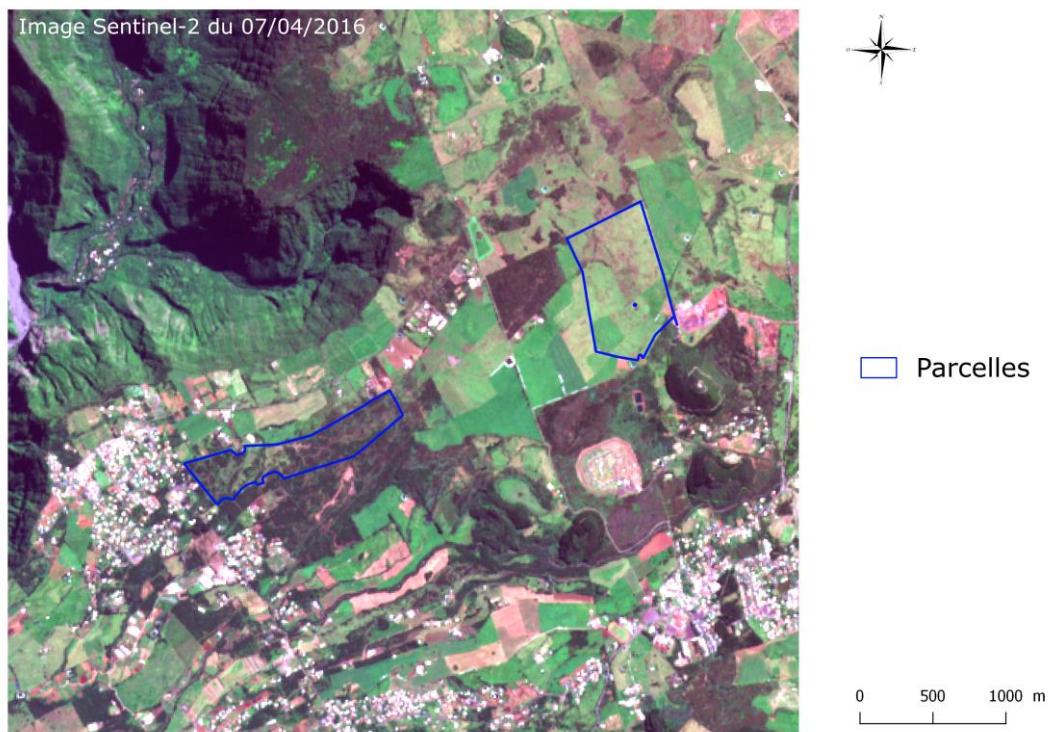


Figure 40. Exemple de deux parcelles de Bourg-Murat comportant une incompatibilité avec notre étude.

## **Partie V : Conclusion**

Simuler la prédition de biomasse fourragère en indianocéanie est une activité complexe, influencée par des facteurs multiples, spatio-temporels et cultureaux. Afin d'explorer cette diversité de conditions, deux terrains d'étude très différents ont été sélectionnés. La partie sud-africaine du Kalahari est une zone de savane semi-aride. Le sol sableux, très pauvre, et le manque d'eau sont la principale contrainte au développement de l'élevage. Les techniques de forage se sont développées et ont permis à l'élevage de s'installer durablement. La pratique est alors extensive et fonctionne en pâturage tournant afin de pouvoir nourrir correctement les animaux.

Le contexte insulaire de La Réunion ainsi que son relief escarpé jouent un rôle déterminant sur l'élevage. La Réunion est une île volcanique de 2 500 km<sup>2</sup>. Son sommet, le Piton des Neiges culmine à plus de 3 000 m d'altitude, à seulement 20km des côtes à vol d'oiseau. Ce relief influe sur le climat de l'île. À l'est, où les nuages amenés par les alizés sont bloqués par le haut relief, le climat est pluvieux. Il contraste avec l'ouest plus sec, qui souffre régulièrement de périodes de sécheresse. Nous observons également un gradient d'altitude qui définit le climat mais aussi les espèces de graminées cultivées. Les Bas bénéficient d'un climat tropical qui devient tempéré avec l'altitude. Toutes ces conditions déterminent l'usage des terres. C'est en grande partie le Plan d'aménagement des Hauts qui détermine l'actuelle répartition des cultures. La canne à sucre ayant déjà un rôle et une implantation profonde sur l'île, les Hauts de l'île souffrent d'une mise à l'écart. Ce contraste entre les Hauts et les Bas est accentué par la différence de niveau de vie, engendrée par la part importante d'emplois qui se développe dans le tertiaire le long de la côte. Le Plan d'aménagement a pour but de rééquilibrer le territoire. Un des axes définis dans ce plan est le développement de l'élevage sur ces terres. La pâture du bétail peut permettre de mettre en valeur une partie des terrains en pentes et les prairies permettent de lutter contre l'érosion des sols. Très vite le problème de déficit fourrager s'est fait sentir durant la période hivernale. Aujourd'hui, un système de report est mis en place. De l'ensilage est gardé pour l'hiver, du foin produit dans les bas et des importations d'intrants constituent l'alimentation durant la période d'hiver austral.

A La Réunion, comme en Afrique du Sud, connaître le disponible fourrager paraît nécessaire afin de gérer au mieux les stocks. À la fois dans le cadre d'un pâturage tournant pour préserver au mieux la ressource mais aussi dans le cas de La Réunion afin d'améliorer le système de report fourrager.

Cette variabilité de caractéristiques spatio-temporelles ainsi que culturelles fait que la prédition de la biomasse fourragère disponible reste difficile. Conventionnellement effectuée par des modèles dynamiques de simulation de croissance, cette technique trouve ici ces limites.

Afin de pallier ces limites, l'imagerie spatiale permet de prendre un point de vue plus global, à l'échelle du territoire. Grâce à l'imagerie optique il est possible d'étudier l'état d'un couvert végétal afin d'en déterminer certaines caractéristiques biophysiques.

Pour cela le couvert se doit d'être relativement homogène. En Afrique du Sud, si les objectifs n'ont pas été au rendez-vous, c'est qu'il n'était pas judiciable de se concentrer uniquement sur les graminées comme à La Réunion. Les parcours de la savane sont formés de plusieurs strates de végétation différente : arbres, buissons apétables ou non et végétation herbacée. Cette stratification rend difficile l'étude exclusive de graminées par télédétection.

Notre étude sur La Réunion a permis de faire ressortir des résultats intéressants sur l'apport de la télédétection à la prédition de biomasse fourragère. Grâce aux images Sentinel-2 nous avons pu estimer avec précision le LAI de couvert de graminées constituant la principale alimentation du cheptel réunionnais. Ce LAI est aussi une variable d'état du couvert, composante des modèles dynamiques de prédition de croissance de graminées. Deux modèles, tropical et tempéré, ont pu être couplés avec les données de télédétection afin d'améliorer les prédictions de biomasse.

Deux méthodes de couplage ont été évaluées, réajustement et forçage, avec deux sources d'estimation du LAI, par un modèle empirique avec le NDVI et par l'algorithme « *biophysical processor* ». La méthode de couplage retenue, car réduisant significativement l'erreur de prédition, est le forçage avec le LAI estimé directement depuis l'algorithme « *biophysical processor* ». En effet, contrairement au NDVI l'effet de saturation est beaucoup plus faible, permettant une meilleure estimation du LAI et donc un couplage plus efficace. De là, il a été possible de dégager des prérequis pour un forçage le plus efficace possible. Une bonne prédition de la biomasse par forçage nécessite un forçage à partir de plusieurs images et essentiellement dans les 30 premiers jours du cycle de pousse.

Afin de rendre accessible les prédictions des modèles et de les spatialiser, ils ont été transposés dans le langage de programmation spatiale Ocelet. Il est alors possible de simuler la croissance des graminées sur plusieurs entités géographiques que sont les parcelles, en fonction d'un climat géo-localisé. Ce langage permet une sortie graphique et spatiale des simulations de biomasse, observables sous forme de séries temporelles au format .kml. Le but final de cette opération est

de pouvoir proposer ces sorties graphiques pour des non-initiés au SIG via une plateforme Web. Cette plateforme pourrait être hébergée sur le site du réseau ARChE\_Net.

Plusieurs enseignements sont à tirer de cette étude au niveau même du modèle, et plusieurs pistes d'amélioration en découlent. Une étape certaine dans le développement futur sera la prise en compte de la saisonnalité et par là, la calibration du modèle en saison humide. Nous n'avons pas de données sur la saison d'été, très humide, où les cycles de pousse sont courts et la croissance est plus rapide. Il sera aussi intéressant d'étudier les capacités de couplage durant cette période pendant laquelle les images sans couvert nuageux sont plus rares. Malgré un rythme d'une image tous les cinq jours avec les satellites Sentinel-2A et B, la combinaison d'un cycle court et d'images sans couvert nuageux sera un défi intéressant à relever. S'il s'avère trop difficile d'obtenir des images alors il faut impérativement améliorer la prédition du modèle sans couplage de données satellite afin de pouvoir prédire de manière suffisamment précise la biomasse disponible hors période d'acquisition d'images. Ensuite, l'autonomisation du modèle sera un point important à étudier. Le rythme de fauche est actuellement défini de façon aléatoire mais respecte la fréquence moyenne de fauche des parcelles réunionnaises. Par la suite il faudra pouvoir détecter automatiquement ces fauches par des différences brutales de signal sur les images satellitaire, optique mais aussi radar.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## Références

- Aboelghar, M., Arafat, S., Saleh, A., Naeem, S., Shirbeny, M. et Belal, A. (2010) Retrieving leaf area index from SPOT4 satellite data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, vol. 13, n°2, p. 121-127.
- Acock, B. et Acock, M. C. (1991) Potential for Using Long-Term Field Research Data to Develop and Validate Crop Simulators. *Agronomy Journal*, vol. 83, n°1, p. 56.
- Adam, E., Mutanga, O. et Rugege, D. (2010) Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review. *Wetlands Ecology and Management*, vol. 18, n°3, p. 281-296.
- AGRESTE - DAAF La Réunion (2010) Recensement Agricole 2010.
- Ali, I., Cawkwell, F., Dwyer, E., Barrett, B. et Green, S. (2016) Satellite remote sensing of grasslands: from observation to management. *Journal of Plant Ecology*, vol. 9, n°6, p. 649-671.
- Andrade, A. S., Santos, P. M., Pezzopane, J. R. M., de Araujo, L. C., Pedreira, B. C., Pedreira, C. G. S., Marin, F. R. et Lara, M. A. S. (2016) Simulating tropical forage growth and biomass accumulation: an overview of model development and application. *Grass and Forage Science*, vol. 71, n°1, p. 54-65.
- Asner, G. P., Scurlock, J. M. O. et A. Hicke, J. (2003) Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography*, vol. 12, n°3, p. 191-205.

- Asrar, G., Fuchs, M., Kanemasu, E. T. et Hatfield, J. L. (1984) Estimating Absorbed Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat1. Agronomy Journal, vol. 76, n°2, p. 300.
- Bappel, E., Bégué, A., Martiné, J. F., Pellegrino, A. et Siegmund, B. (2005) Assimilation of a biophysical parameter estimated by remote sensing using SPOT 4&5 data into a sugarcane yield forecasting model. Proc. ISSCT, vol. 25.
- Baret, F., Guyot, G. et Major, D. J. (1989) TSAVI: A Vegetation Index Which Minimizes Soil Brightness Effects On LAI And APAR Estimation, vol. 3, p. 1355-1358. IEEE.
- Bertile, W. (1978) Les Hauts de La Réunion, étude géographique. Cahier du Centre Universitaire de La Réunion, vol. 9, p. 16-67.
- Bertile, W. (1987) Les« Hauts » de La Réunion. La Réunion, atlas thématique et régional (Editions Arts Graphiques Modernes., p. 130-137). Saint-Denis.
- Bouman, B. A. M., van Keulen, H., van Laar, H. H. et Rabbinge, R. (1996) The ‘School of de Wit’ crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. Agricultural Systems, vol. 52, n°2-3, p. 171-198.
- Buckley, R. C., Gubb, A. et Wasson, R. J. (1987) Parallel dunefield ecosystems: predicted soil nitrogen gradient tested. Journal of Arid Environments, n°12, p. 105-110.
- Buckley, R. C., Wasson, R. J. et Gubb, A. (1987) Phosphorus and potassium status of arid dunefield soils in central Australia and southern Africa, and biogeographic implications. Journal of Arid Environments, n°13, p. 211-216.

- Canisius, F., Fernandes, R. et Chen, J. (2010) Comparison and evaluation of Medium Resolution Imaging Spectrometer leaf area index products across a range of land use. *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, n°5, p. 950-960.
- Collet, C. (2001) *Précis de Télédétection: Traitements Numériques d'Images de Télédétection*. PUQ.
- Cook, B. G. (2005) Tropical forages: an interactive selection tool. CSIRO, Dept of Primary Industries & Fisheries (Qld), Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) and the International Livestock Research Institute (ILRI).
- Cui, X., Gibbes, C., Southworth, J. et Waylen, P. (2013) Using Remote Sensing to Quantify Vegetation Change and Ecological Resilience in a Semi-Arid System. *Land*, vol. 2, n°2, p. 108-130.
- Dadhwal, V. K. (2003) Crop growth and productivity monitoring and simulation using remote sensing and GIS. Proc. Satellite Remote Sensing and GIS applications in agricultural meteorology, p. 263-289.
- Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Schlerf, M., Atzberger, C., Corsi, F. et Cho, M. (2008) LAI and chlorophyll estimation for a heterogeneous grassland using hyperspectral measurements. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 63, n°4, p. 409-426.
- de Witt, C. T. (1958) Transpiration and crop yield. *Agricultural research report*, vol. 64.
- Debenham, F. (1952) The Kalahari today. *Geographical Journal*, n°118, p. 12-23.
- Defos Du Rau, J. (1960) L'île de La Réunion. Etude de Géographie humaine. Thèse de doctorat, Institut de Géographie, Bordeaux, 716 p.

- Degenne, P., Lo Seen, D., Parigot, D., Forax, R., Tran, A., Ait Lahcen, A., Curé, O. et Jeansoulin, R. (2009) Design of a Domain Specific Language for modelling processes in landscapes. Ecological Modelling, vol. 220, n°24, p. 3527-3535.
- Delécolle, R., Maas, S. J., Guérif, M. et Baret, F. (1992) Remote sensing and crop production models: present trends. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 47, n°2-3, p. 145-161.
- Dorigo, W. A., Zurita-Milla, R., de Wit, A. J. W., Brazile, J., Singh, R. et Schaepman, M. E. (2007) A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 9, n°2, p. 165-193.
- Duncan, W. G. (1972) SIMCOT: a simulation of cotton growth and yield, p. 115-118. Duke University, NC.
- Duncan, W. G., Loomis, R. S., Williams, W. A. et Hanau, R. (1967) A model for simulating photosynthesis in plant communities. Hilgardia, vol. 38, n°4, p. 181-205.
- Duru, M., Adam, M., Cruz, P., Martin, G., Ansquer, P., Ducourtieux, C., Jouany, C., Theau, J. P. et Viegas, J. (2009) Modelling above-ground herbage mass for a wide range of grassland community types. Ecological Modelling, vol. 220, n°2, p. 209-225.
- Dusseux, P., Corpetti, T., Hubert-Moy, L. et Corgne, S. (2014) Combined Use of Multi-Temporal Optical and Radar Satellite Images for Grassland Monitoring. Remote Sensing, vol. 6, n°7, p. 6163-6182.
- Eagleman, J. R. (1971) An experimentally derived model for actual evapotranspiration. Agricultural Meteorology, vol. 8, p. 385-394.

Fulkerson, W. J., Blacklock, M., Nelson, N., NSW Agriculture et Dairy Research and Development Corporation (Australia) (1997) Managing pastures. Wollongbar, N.S.W. : NSW Agriculture.

Gabrielle, B., Menasseri, S. et Houot, S. (1995) Analysis and Field Evaluation of the Ceres Models Water Balance Component. Soil Science Society of America Journal, vol. 59, n°5, p. 1403.

Gao, B. (1996) NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, vol. 58, n°3, p. 257-266.

Gao, X. (2000) Optical–Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination. Remote Sensing of Environment, vol. 74, n°3, p. 609-620.

Gitelson, A. A. (2004) Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. Journal of Plant Physiology, vol. 161, n°2, p. 165-173.

Goswami, S., Gamon, J., Vargas, S. et Tweedie, C. (2015) Relationships of NDVI, Biomass, and Leaf Area Index (LAI) for six key plant species in Barrow, Alaska. PeerJ PrePrints.

Grassland species (s.d.).

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Stocker, T., Qin, D. et Plattner, G.-K. (2013) Changements climatiques 2013 les éléments scientifiques: résumé à l'intention des décideurs : rapport du groupe de travail I du GIEC : résumé technique : rapport accepté par le Groupe de travail I du GIEC mais non approuvé dans le détail et foire aux questions : extraits de la contribution du groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur

l'évolution du climat. Geneva, Switzerland : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Guellec, A. (1992) L'aménagement des Hauts à La Réunion. Annales de Géographie, vol. 101, n°563, p. 1-27.

Haddon, I. G. et McCarthy, T. S. (2005) The Mesozoic–Cenozoic interior sag basins of Central Africa: The Late-Cretaceous–Cenozoic Kalahari and Okavango basins. Journal of African Earth Sciences, vol. 43, n°1-3, p. 316-333.

Hatfield, J. L., Kanemasu, E. T., Asrar, G., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J. et Idso, S. B. (1985) Leaf-area estimates from spectral measurements over various planting dates of wheat†. International Journal of Remote Sensing, vol. 6, n°1, p. 167-175.

Hobbs, T. J. (1995) The use of NOAA-AVHRR NDVI data to assess herbage production in the arid rangelands of Central Australia. International Journal of Remote Sensing, vol. 16, n°7, p. 1289-1302.

Huete, A. . (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, vol. 25, n°3, p. 295-309.

Hussin, Y. A., Reich, R. M. et Hoffer, R. M. (1991) Estimating splash pine biomass using radar backscatter. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 29, n°3, p. 427-431.

Jauze, J. M. (1998) Les centralités emboîtées de l'espace réunionnais. Mappemonde, n°51, p. 27-30.

Jauze, J.-M. (1986) L'élevage à La Réunion (Mémoire de maîtrise) (p. 161).

- Jauze, J.-M. (2011) Les Hauts de La Réunion, terres de tradition et d'avenir. Saint-Denis (Réunion); [Saint-André (Réunion) : Université de La Réunion ; Océan éd.
- Jeltsch, F., Milton, S. J., Dean, W. R. J. et Rooyen, N. (1997) Simulated pattern formation around artificial waterholes in the semi-arid Kalahari. *Journal of Vegetation Science*, vol. 8, n°2, p. 177-188.
- Jin, Y., Yang, X., Qiu, J., Li, J., Gao, T., Wu, Q., Zhao, F., Ma, H., Yu, H. et Xu, B. (2014) Remote Sensing-Based Biomass Estimation and Its Spatio-Temporal Variations in Temperate Grassland, Northern China. *Remote Sensing*, vol. 6, n°2, p. 1496-1513.
- Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., Godfray, H. C. J., Herrero, M., Howitt, R. E., Janssen, S., Keating, B. A., Munoz-Carpena, R., Porter, C. H., Rosenzweig, C. et Wheeler, T. R. (2017) Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*, vol. 155, p. 240-254.
- Jordan, C. F. (1969) Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, vol. 50, n°4, p. 663-666.
- Joshi, N., Baumann, M., Ehamer, A., Fensholt, R., Grogan, K., Hostert, P., Jepsen, M., Kuemmerle, T., Meyfroidt, P., Mitchard, E., Reiche, J., Ryan, C. et Waske, B. (2016) A Review of the Application of Optical and Radar Remote Sensing Data Fusion to Land Use Mapping and Monitoring. *Remote Sensing*, vol. 8, n°1, p. 70.
- Kumar, L., Sinha, P., Taylor, S. et Alqurashi, A. F. (2015) Review of the use of remote sensing for biomass estimation to support renewable energy generation. *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 9, n°1, p. 097696.

- Kurtz, D. B., Schellberg, J. et Braun, M. (2010) Ground and satellite based assessment of rangeland management in sub-tropical Argentina. *Applied Geography*, vol. 30, n°2, p. 210-220.
- Lagabrielle, E., Metzger, P., Martignac, C., Lortic, B. et Durieux, L. (2007) Les dynamiques d'occupation du sol à La Réunion (1989-2002). *Mappemonde*, n°14, p. 23.
- Lajoie, G. et Hagen-Zanker, A. (2007) La simulation de l'étalement urbain à La Réunion : apport de l'automate cellulaire Metronamica® pour la prospective territoriale. Cybergeo.
- Lancaster, N. (1988) Development of linear dunes in the southwestern Kalahari, Southern Africa. *Journal of Arid Environments*, vol. 14, n°3, p. 233-244.
- Le changement climatique à La Réunion (2013).
- Le Mezo, L. (2012) Caractérisation de la ressource fourragère des prairies cultivées de La Réunion par image satellite. VetAgro Sup.
- Leleux, M. (2016) Analyse prospective de la production fourragère. BRL ingénierie.
- Li, F., Zeng, Y., Luo, J., Ma, R. et Wu, B. (2016) Modeling grassland aboveground biomass using a pure vegetation index. *Ecological Indicators*, vol. 62, p. 279-288.
- Lim, J., Kawamura, K., Lee, H.-J., Yoshitoshi, R., Kurokawa, Y., Tsumiyama, Y. et Watanabe, N. (2015) Evaluating a hand-held crop-measuring device for estimating the herbage biomass, leaf area index and crude protein content in an Italian ryegrass field. *Grassland Science*, vol. 61, n°2, p. 101-108.
- Lougnon, A. (2006) Sous le signe de la tortue: voyages anciens à l'Île Bourbon, 1611-1725 (5. éd.). Sainte-Clotilde, Réunion : Orphie.

- Luckman, A., Baker, J., Honzák, M. et Lucas, R. (1998) Tropical Forest Biomass Density Estimation Using JERS-1 SAR: Seasonal Variation, Confidence Limits, and Application to Image Mosaics. *Remote Sensing of Environment*, vol. 63, n°2, p. 126-139.
- Major, D. J., Baret, F. et Guyot, G. (1990) A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, n°5, p. 727-740.
- Mandret, G. (2000) L'élevage bovin à La Réunion: synthèse de quinze ans de recherche. Montpellier, France : CIRAD.
- Martiné, J. F. (2003) Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées. Applications du modèle (Thèse de doctorat en Agronomie). Thèse de doctorat, Institut national agronomique Paris-Grignon, 131 p.
- Mishra, N., Crews, K., Miller, J. et Meyer, T. (2015) Mapping Vegetation Morphology Types in Southern Africa Savanna Using MODIS Time-Series Metrics: A Case Study of Central Kalahari, Botswana. *Land*, vol. 4, n°1, p. 197-215.
- Morel, J., Bégué, A., Todoroff, P., Martiné, J.-F., Lebourgeois, V. et Petit, M. (2014) Coupling a sugarcane crop model with the remotely sensed time series of fIPAR to optimise the yield estimation. *European Journal of Agronomy*, vol. 61, p. 60-68.
- Müller, M. A. N., Giess, W. et Loutit, B. (1983) Grasse van Suidwes Afrika/Namibië. Namibië : Direktoraat Landbou en Bosbou, Departement Landbou en Natuurbewaring.
- Mundava, C., Helmholz, P., Schut, A. G. T., Corner, R., McAtee, B. et Lamb, D. W. (2014) Evaluation of vegetation indices for rangeland biomass estimation in the Kimberley

area of Western Australia. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. II-7, p. 47-53.

Nouvellon, Y., Moran, M. S., Seen, D. L., Bryant, R., Rambal, S., Ni, W., Bégué, A., Chehbouni, A., Emmerich, W. E., Heilman, P. et Qi, J. (2001) Coupling a grassland ecosystem model with Landsat imagery for a 10-year simulation of carbon and water budgets. *Remote Sensing of Environment*, vol. 78, n°1-2, p. 131-149.

Penman, H. L. (1956) Estimating evaporation. *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 37, n°1, p. 43.

Pequeno, D. N. L., Pedreira, C. G. S. et Boote, K. J. (2014) Simulating forage production of Marandu palisade grass (*Brachiaria brizantha*) with the CROPGRO-Perennial Forage model. *Crop and Pasture Science*.

Perret, S. (1993) Propriétés physiques, hydriques, et mécaniques de sols andiques de La Réunion : facteurs naturels et anthropiques d'évolution des horizons culturaux, implications agronomiques et écologiques (Thèse de Doctorat). Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure agronomique, Montpellier, 278 p.

Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J. et Stenseth, N. C. (2005) Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 20, n°9, p. 503-510.

Pontailler, J.-Y., Hymus, G. J. et Drake, B. G. (2003) Estimation of leaf area index using ground-based remote sensed NDVI measurements: validation and comparison with two indirect techniques. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 29, n°3, p. 381-387.

Préfecture de La Réunion (1976) Programme général d'aménagement des Hauts de La Réunion, étude préliminaire. Saint-Denis.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H. et Sorooshian, S. (1994) A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, vol. 48, n°2, p. 119-126.

Rahetlah, V. B., Salgado, P., Andrianarisoa, B., Tillard, E., Razafindrazaka, H., Le Mézo, L. et 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*, vol. 26, n°95.

Raunet, M. (1988) Carte morpho-pédologique de La Réunion.

Rignot, E. J., Zimmermann, R. et van Zyl, J. J. (1995) Spaceborne applications of P band imaging radars for measuring forest biomass. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, n°5, p. 1162-1169.

Roberts, B. R. et Fourie (1975) *Algemene grasse van Noord-Kaapland*. Noordkaap Lewende Hawe Koöperasie Beperk.

Roujean, J.-L. et Breon, F.-M. (1995) Estimating PAR Absorbed by Vegetation from Bidirectional Reflectance Measurements. *REMOTE SENS. ENVIRON*, n°51, p. 375-384.

Rousse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. et Deering, D. W. (1974) Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp, vol. 1, n°Sect A, p. 309-317.

Schino, G., Borfecchia, F., De Cecco, L., Dibari, C., Lanetta, M., Martini, S. et Pedrotti, F. (2003) Satellite estimate of grass biomass in a mountainous range in central Italy. *Agroforestry Systems*, vol. 59, p. 157-162.

- Sejian, V., Gaughan, J., Baumgard, L. et Prasad, C. (2015) Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation. New Delhi : Springer India.
- Sellers, P. J. (1985) Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. International Journal of Remote Sensing, vol. 6, n°8, p. 1335-1372.
- Shaw, M. R., Pendleton, L., Cameron, D. R., Morris, B., Bachelet, D., Klausmeyer, K., MacKenzie, J., Conklin, D. R., Bratman, G. N., Lenihan, J., Haunreiter, E., Daly, C. et Roehrdanz, P. R. (2011) The impact of climate change on California's ecosystem services. Climatic Change, vol. 109, n°S1, p. 465-484.
- Sporton, D. et Thomas, D. S. G. (2002) Sustainable livelihoods in Kalahari environments: a contribution to global debates. Oxford geographical and environmental studies. Oxford ; New York : Oxford University Press.
- Stapleton, H. N., Buxton, D. R., Watson, D. J. et Noiting, D. J. (1974) Cotton: A Computer Simulation of Cotton Growth. College of Agriculture, University of Arizona (Tucson, AZ), Technical Bulletin (University of Arizona, Agricultural Experiment Station), n°206.
- Suttie, J. M., Reynolds, S. G. et Batello, C. (2005) Grasslands of the world. (Food and Agriculture Organization of the United Nations, Dir.)Plant production and protection series. Rome : Food and Agricultural Organization of the United Nations.
- Thenkabail, P. S., Smith, R. B. et De Pauw, E. (2000) Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. Remote Sensing of Environment, vol. 71, n°2, p. 158-182.
- Thomas, D. S. G. (1991) The Kalahari environment. Cambridge ; New York : Cambridge University Press.

- Thompson, L. M. (1969) Weather and Technology in the Production of Corn in the U. S. Corn Belt1. *Agronomy Journal*, vol. 61, n°3, p. 453.
- Tomassino, L. (1999) Choix et couplage de modèles du système sol-plante pour l'aide à la gestion des effluents d'élevage à La Réunion (Mémoire de DAA Génie de l'Environnement) (p. 52). Ensa Rennes.
- Truong, B. (1989) Evaluation de l'efficacité agronomique de phosphates naturels provenant d'Afrique de l'Ouest (Thèse de Doctorat). Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Loraine, Nancy.
- Tucker, C. J. (1977) Asymptotic nature of grass canopy spectral reflectance. *Applied Optics*, vol. 16, n°5, p. 1151.
- Tucker, C. J. (1979) Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, vol. 8, n°2, p. 127-150.
- Tucker, C. J., Vanpraet, C. L., Sharman, M. J. et Van Ittersum, G. (1985) Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the senegalese sahel: 1980–1984. *Remote Sensing of Environment*, vol. 17, n°3, p. 233-249.
- University Of East Anglia Climatic Research Unit, Harris, I. C. et Jones, P. D. (2017) CRU TS4.00: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.00 of high resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901- Dec. 2015). Centre for Environmental Data Analysis (CEDA).
- Van Bavel, C. H. M. (1953) A drought criterion and its application in evaluating drought incidence and hazard. *Agronomy Journal*, vol. 4, p. 167-172.
- Van Rooyen, N., Bezuidenhout, H. et De Kock, E. (2001) Flowering plants of the Kalahari dunes (1st ed.). [Lynnwood : Ekotrust.

Vayssières, J., Guerrin, F., Paillat, J.-M. et Lecomte, P. (2009) GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises Part I – Whole-farm dynamic model. Agricultural Systems, vol. 101, n°3, p. 128-138.

Wallach, D. (2006) The two forms of crop models. Working with Dynamic Crop Models (p. 3 -9). Elsevier.

Weiss, M. (2016) S2ToolBox Level 2 products: LAI,FAPAR, FCOVER (p. 53).

White, J. D., Running, S. W., Nemani, R., Keane, R. E. et Ryan, K. C. (1997) Measurement and remote sensing of LAI in Rocky Mountain montane ecosystems. Canadian Journal of Forest Research, vol. 27, n°11, p. 1714-1727.

Yuping, M., Shili, W., Li, Z., Yingyu, H., Liwei, Z., Yanbo, H. et Futang, W. (2008) Monitoring winter wheat growth in North China by combining a crop model and remote sensing data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 10, n°4, p. 426-437.

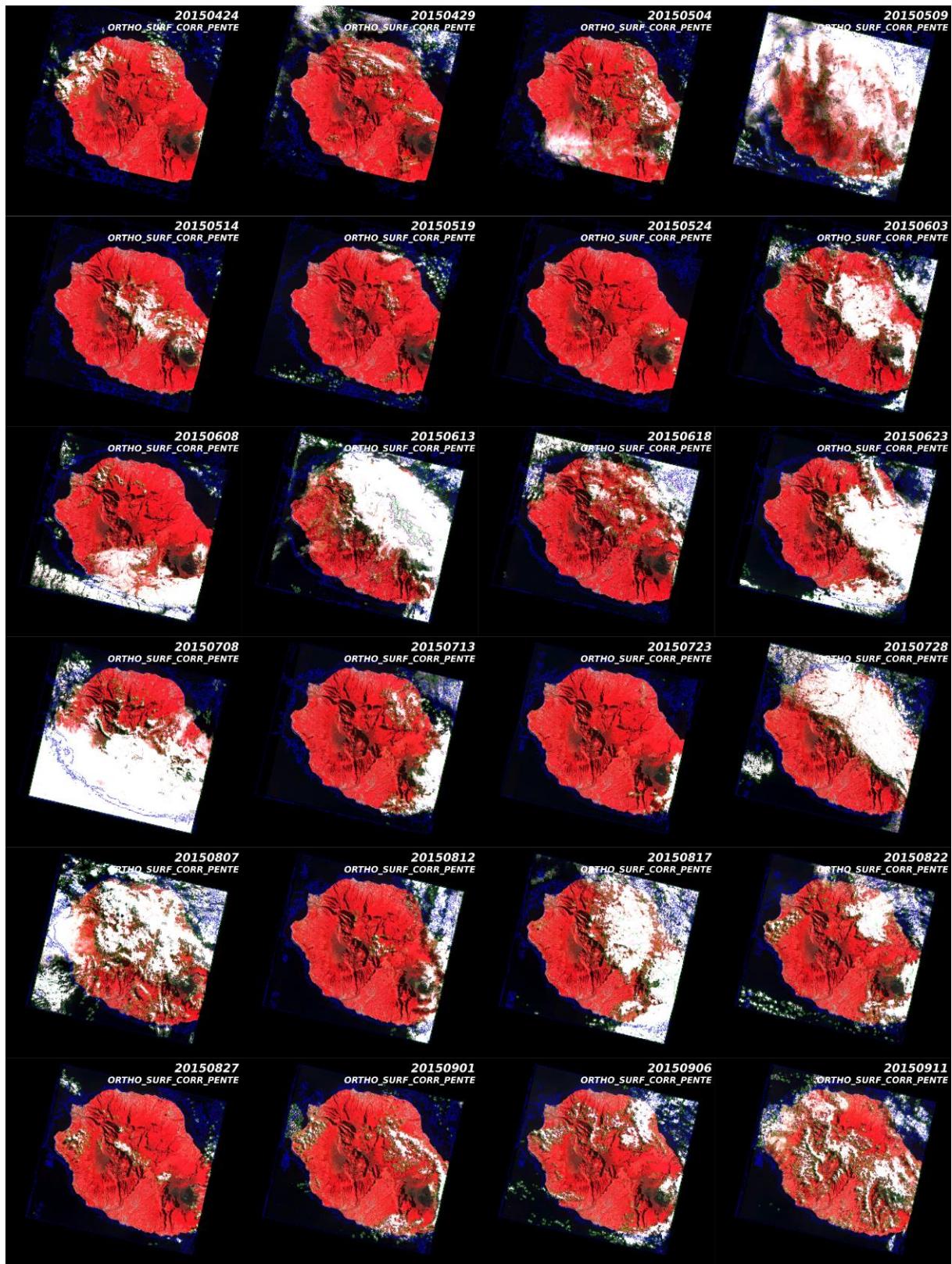


## **ANNEXES**

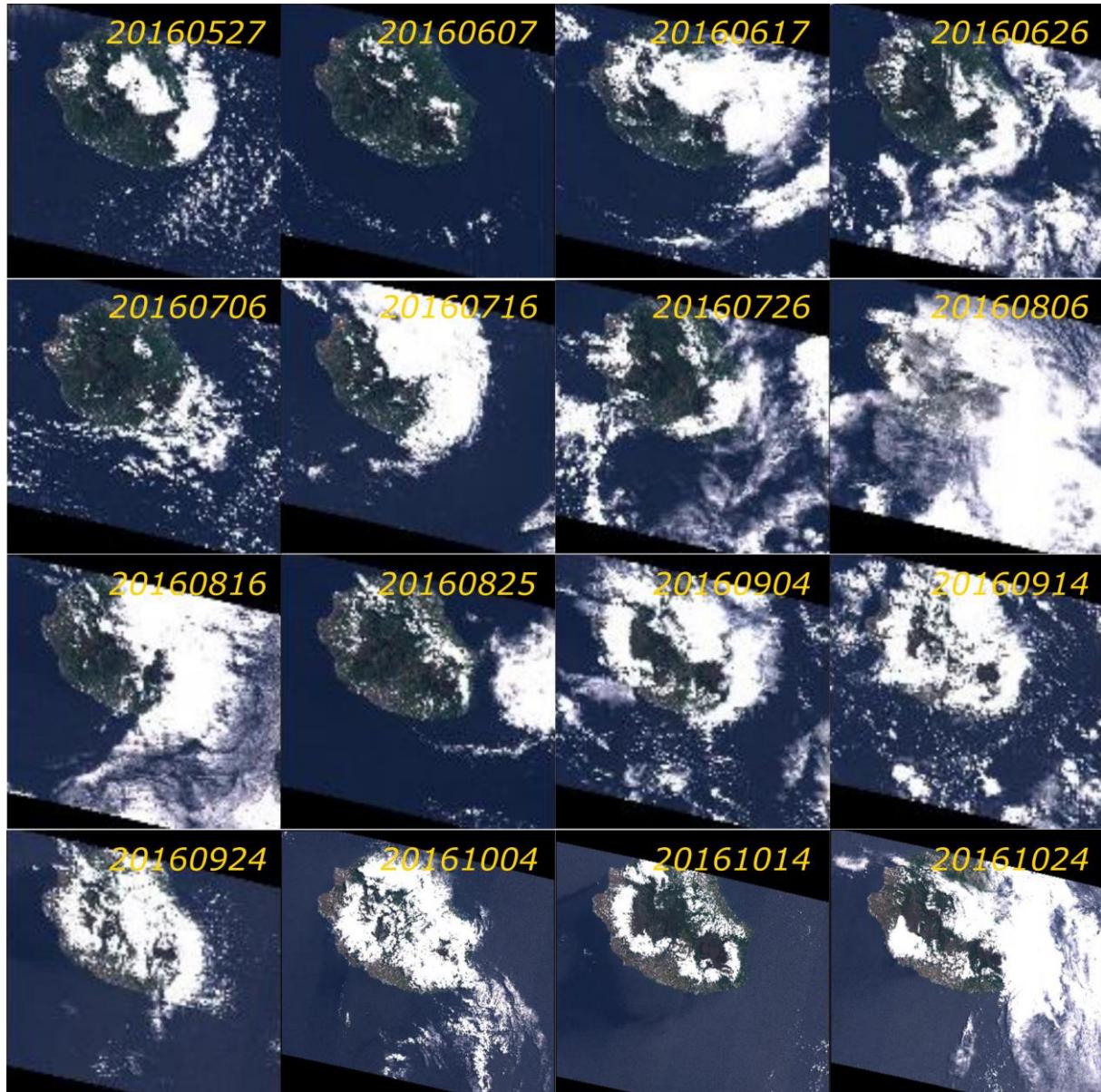
## Table des annexes

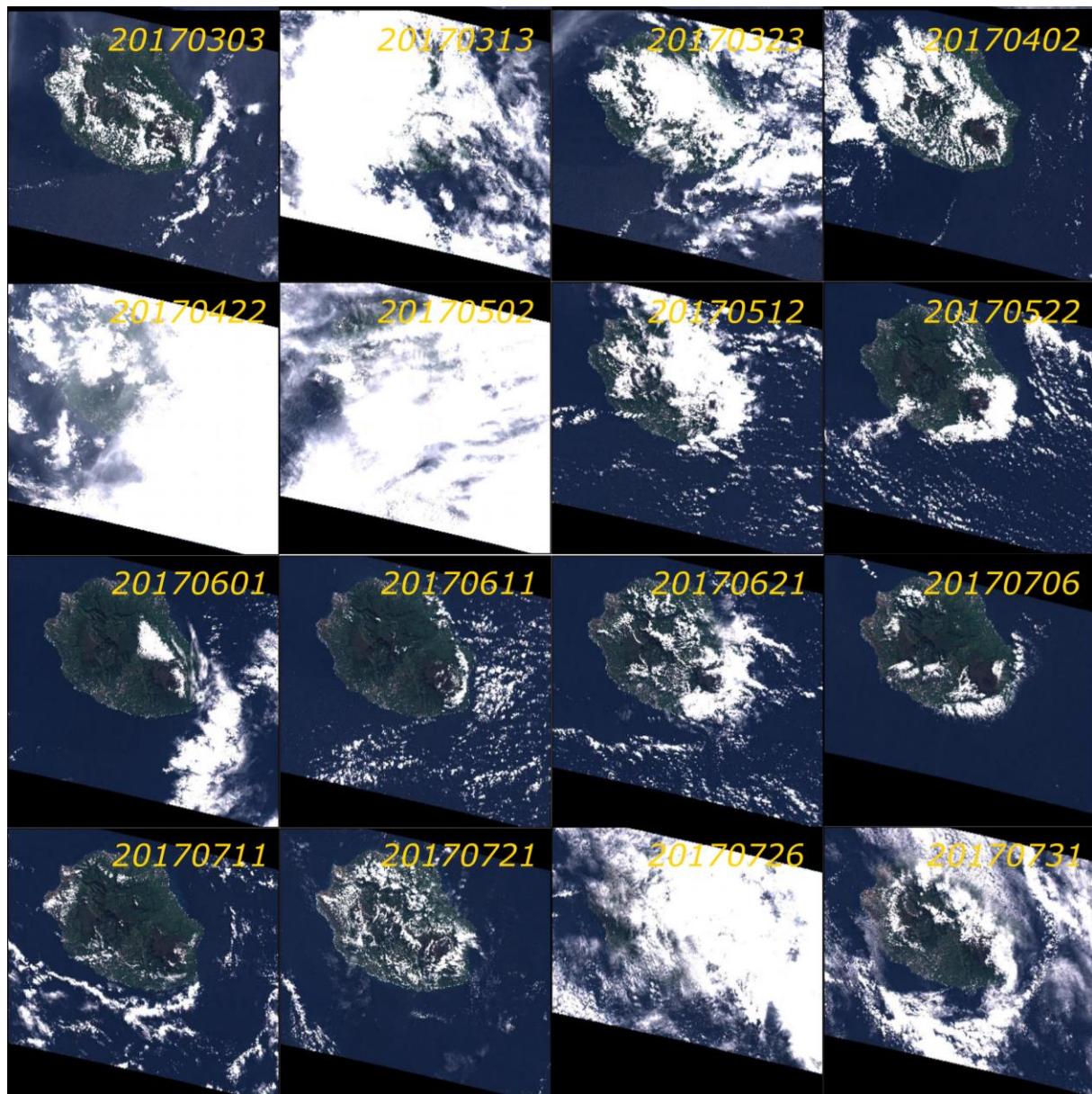
Annexe 1 : Quicklook des images SPOT5take5 .....	<b>127</b>
Annexe 2 : Quicklook des images Sentinel-2 .....	<b>128</b>
Annexe 3 : Poster présenté au Living Planet Symposium 2016 .....	<b>130</b>
Annexe 4 : Article soumis à la revue Photo-Interpretation, EJARS .....	<b>131</b>

ANNEXE 1 : Quicklook des images SPOT5take5



ANNEXE 2 : Quicklook des images Sentinel-2





## ANNEXE 3 : Poster présenté au Living Planet Symposium 2016



## Validation of NDVI/LAI empirical model to force a pasture growth model

C. Alexandre<sup>1,2</sup>, G. Lajoie<sup>1</sup>, E. Tillard<sup>2</sup>, P. Salgado<sup>2</sup><sup>1</sup> Université de La Réunion<sup>2</sup> Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

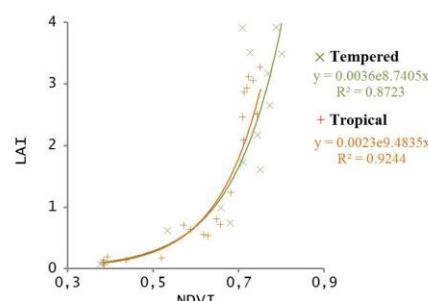
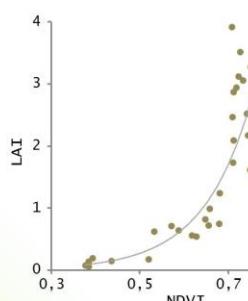
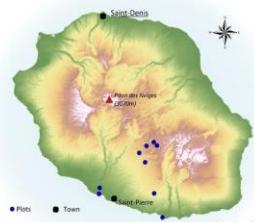
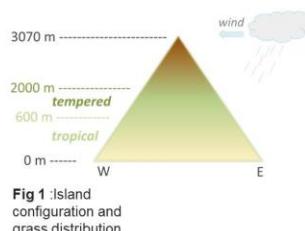
### Introduction

Evaluating the available forage biomass on a territory is nowadays becoming compulsory for a good farm management. The objective of our study is to establish an empirical model between the LAI (Leaf Area Index) and NDVI for our study sites. This result will be used in future work in order to force the existing growth models so the predictions would be improved.

### Reunion Island specificities

Reunion Island is a volcanic territory in the Indian Ocean between Madagascar and Mauritius. The forage production on an island like Reunion is difficult. On the one hand, the import of forage or food supplements represents an additional cost due to the distance of the production and supply centers. On the other hand, an increase in local production is hardly possible because of the impossibility of extending agricultural land.

With an altitude from 0 to 3070m and a hilly landscape, we can find in this island different micro-climates and so different type of grass. This specificity is also an opportunity to study on the same territory, tempered and tropical grasses.



	R <sup>2</sup>	RMSE
All	0.92	0.63
Tropical	0.92	0.41
Tempered	0.87	0.82

Fig 3 : Empirical model between NDVI and LAI for all type of grass and tropical-tempered distinguish.

### Material and methods

The LAI measurements are carried out on the ground thanks to a ceptometer which measures the solar radiation received on and under the canopy. We measure the LAI in four different direction and process the average. One of the most constraining limit is to link LAI measurement date to image date. We need a maximum gap of three days between the measurement and the image. Thanks to the SPOT5Take5 program, we have been able to know the exact date of a satellite pass and therefore coordinate the field measurements with the images.

Nine plots have been selected in order to cover tempered and tropical grasses and different climates.

### Results and conclusion

From the SPOT5Take5 temporal series' advantages, we can confirm the correlation between the LAI and NDVI on our study sites. This correlation is even strong on the exponential model as we obtain a coefficient of 0.87 (RMSE = 0.82) for temperate grass and 0.92 (RMSE = 0.41) for tropical grass. We can explain this higher RMSE value on tempered plots by their heterogeneity, that make grass difficult to sample.

The LAI is a parameter of a lot of grass growth models. The next step is now to correct the model used in Reunion Island with LAI from satellite images (Sentinel2).



ANNEXE 4 : Article et figures associées, soumis à la revue Photo-Interpretation, EJARS

## **Validation of an empirical model, LAI~VI, to force a grass growth model on Reunion Island, France**

Validation d'un modèle empirique LAI ~ IV pour le forçage d'un modèle de croissance à La Réunion, France

Cyprien Alexandre \*<sup>1</sup>, Emmanuel Tillard <sup>1</sup> and Paulo Salgado <sup>2</sup>, Gilles Lajoie <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement,  
7 chemin de l'Irat – Ligne Paradis 97410 Saint Pierre

+262 262 499 254 [emmanuel.tillard@cirad.fr](mailto:emmanuel.tillard@cirad.fr)

<sup>2</sup> Centre de Coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement,  
BP 319 Antsirabe 110 MADAGASCAR

+261 327 899 459 [paulo.salgado@cirad.fr](mailto:paulo.salgado@cirad.fr)

<sup>3</sup> Université de La Réunion, 15 Avenue René Cassin CS 92003, 97715 Sainte-Clotilde

+262 262 938 018 [gilles.lajoie@univ-reunion.fr](mailto:gilles.lajoie@univ-reunion.fr)

Keywords: SPOT5take5; Leaf Area Index; Vegetation Index; NDVI; Grass; Model

Mots Clés : SPOT5take5; Leaf Area index; Indice de végétation; NDVI; Fourrage; Modèle

Abstract: The Leaf Area Index (LAI) is a parameter of many growth models used to predict biomass. LAI was used, for instance, in the Mosicas (Martiné, 1999) and Gamede (Vayssières et al., 2009) growth models for sugarcane and grass respectively, on Reunion Island, France. Those models have exhibited some limitations and prediction error can be significant. The aim of our study was to estimate LAI from satellite imaging in order to force a grass growth model. Around 430 samples were obtained from nine experimental plots situated around Saint-Pierre and Plaine-des-Cafres (South-West of the island) from April to August 2015. The sample LAI values were averaged by plot and associated with average vegetation indices (VI), computed from Spot5take5 data. Due to the testing of different VI we observed a stronger correlation between NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and LAI compared to other VI. The relation was so great that we found correlation values of 0.87 and 0.92 for temperate and tropical grass, respectively.

Résumé: Pouvoir prédire la quantité de biomasse disponible représente un enjeu majeur pour l'agriculture réunionnaise. La pression foncière ainsi que les périodes de sécheresse plus fréquentes ces dernières années amènent au désir d'anticiper le manque de fourrage, mais aussi à celui de mieux le répartir sur le territoire. Le Leaf Area Index (LAI) est un paramètre de nombreux modèles de croissance utilisés pour prédire la biomasse. Le LAI est par exemple utilisé dans les modèles Mosicas (Martiné, 1999) et Gamede (Vayssières et al., 2009) pour prédire respectivement la biomasse de canne à sucre et d'herbe, à La Réunion. Ces modèles présentent certaines limites et l'erreur de prédiction peut être significative. Les conditions météorologiques étant très variées (22 microclimats sur l'île) et changeantes le modèle Mosicas a par exemple des difficultés à modéliser les pics de croissance des espèces tropicales. Le but de cette étude est d'estimer le LAI à partir d'images multispectrales afin de forcer un modèle de croissance de l'herbe. Le modèle corrigé régulièrement donnera une estimation plus précise de

la biomasse disponible. Environ 430 échantillons ont été obtenus à partir de neuf parcelles expérimentales situées dans la région de Saint-Pierre et Plaine-des-Cafres (sud-ouest de l'île) d'avril à août 2015. Les valeurs de LAI de chaque échantillon ont été moyennées par parcelle et associées aux valeurs moyennes des indices de végétation (VI) calculés à partir d'images Spot5take5. Quatre indices de végétation ont été testés pour leurs caractéristiques différentes : NDWI (Normalized Difference Water Index), MSAVI2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index), RDVI (Renormalized Difference Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Nous avons observé une très forte corrélation entre le NDVI et le LAI par rapport à d'autres VI. Les résultats ont montré des corrélations de 0,94 et 0,92 respectivement pour les espèces tempérées et tropicales avec une RMSE à 0,35.

## 1. INTRODUCTION

Due to its insularity and constantly increasing population, Reunion Island is exposed to certain agricultural problems, such as land pressure and environmental issues. Livestock farming on the island is an agricultural sector undergoing continual change. The ruminant sector wishes to develop production and increase the self-sustainability of the island for meat and milk production, despite severe land availability constraints. More frequent drought periods have been seen in the last few years. To compensate for the lack of grass, farmers import lucerne and wheat straw, generating heavy costs for the farming economy. Today, the major issue is to be able to estimate forage availability, on a territory scale, in order to optimize forage distribution throughout the year, and anticipate the need for forage imports.

Available forage biomass (per unit area) can be predicted using grass growth models based on soil, plant and meteorological parameters. However, Reunion Island is an extremely complex

territory due to its steep relief of volcanic origin and its different microclimates. While these models are correct, they are impacted by extreme and highly fluctuating meteorological conditions. In addition, they need field control measurements, such as grass samples, in order to calibrate the models according to different types of soils, grass species, etc. Such measurements are time-consuming and constraining.

Satellite imagery is an essential tool for vegetation monitoring, on both local and global scales (Xie et al., 2008). Imagery for agriculture is very useful for biomass prediction goals. Most often, we find studies on a territory scale (region, country) with mid-spatial resolution, such as Modis or Landsat (Yunxiang et al., 2014, Zhao et al., 2014, Samimi et Kraus, 2004, Schino et al., 2003) or low resolution (Wylie et al., 1995). Some studies can also be found on a plot scale for crop monitoring (Bacchini et Miguez, 2015). To estimate biomass, such studies use an empirical model between a vegetation index (VI) and biomass yield measurements. However, this leads to a loss of the functional aspect of the growth model which allows daily estimations, unlike high resolution satellite images taken at a lower time frequency.

Our study set out to combine these two methods in a hybrid approach, based on a growth model corrected by satellite image data where model prediction is replaced by satellite data. The first stage was to analyze the relationship between LAI computed from high spatial resolution SPOT5 imagery (10 m) and several VI, then compare different regression models able to predict biomass yield on plot and farm scales.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Study area

The study was conducted on Reunion Island, located in the Indian Ocean, 800 km east of Madagascar (latitude 21°8'60"S, longitude 55°8'32"E, with a maximum elevation of 3,069 m asl). The island has diverse climatic and environmental conditions due to variations in altitude,

rainfall, and agricultural activities. The coastal area is dominated by sugarcane production, whereas the upland central area is mainly used for cattle farming. Although the island is in the tropics, most forage crops are produced in upland areas, above an altitude of 400 m, with temperate, wet summers, from December to May, and cool, dry winters, from June to November. The heavy rainfall makes for quick forage growth. In winter, from June to September, the dry and cold climatic conditions considerably decrease forage growth rates. A wide variety of forage resources, both temperate and tropical grasses, is available depending on the altitude. *Chloris gayana* is a perennial tropical grass giving excellent productivity up to an altitude of 800 m. *Pennisetum clandestinum* (kikuyu) is a high-altitude tropical grass which is very hardy due to its creeping nature. It grows mainly between 600 and 1,600 m in altitude. Beyond 1,600 m, it is not resistant to low winter temperatures. Therefore, in the cool season, kikuyu is characterized by a vegetative pause. Temperate grass species (*Dactylis glomerata*, *Lolium perenne*, *Bromus catharticus*) are all mainly cultivated from an altitude of 800 m. All these species, other than *C. gayana*, can either be grazed or mowed. The sampling areas were multi-species grasslands, including up to four species in the same plot.

## 2.2. Satellite data

The satellite images used came from the SPOT5Take5 program simulating Sentinel-2. During the deorbiting of SPOT5, special programming was provided for Reunion Island allowing the reception of images up to September 2015. That programming offered two advantages: (i) the images were received every five days whereas they were only received every 15 days with SPOT5; (ii) the exact dates of satellite passes were known in advance, making it possible to match the sampling dates (field measurements) with image dates, thereby reducing the time gap (less than one day on average) between these two dates.

SPOT5 images offer four bands, Green (500-590 nm), Red (610-680 nm), NIR (780-890 nm) and MIR (1,580-1,750 nm) with a 10-m spatial resolution. In order to select an index providing

a LAI prediction that was as accurate as possible, we calculated four VI from among the most widely used.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Tucker, 1980) (equation 1) is the most widely used for vegetation monitoring (Collet and Caloz, 2001). It is found in many studies concerning LAI, giving good results on forage (Lim et al., 2015) and wheat (Kaur et al., 2015), both with 'R<sup>2</sup>' correlation values of around 0.8.

$$\text{NDVI} = (\text{PIR-R}) / (\text{PIR+R}) \quad (1)$$

NDWI (Normalized Difference Water Index) (Gao, 1996) (equation 2), which can be used to study water concentration, is used for vegetation monitoring (Psomas et al., 2011).

$$\text{NDWI} = (\text{PIR-MIR}) / (\text{PIR+MIR}) \quad (2)$$

MSAVI2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) (Qi et al., 1994) (equation 3) is a soil corrected index, effective for low covering vegetation. It provides a good estimation of LAI, as can be seen in Bal et al (2013) with wheat.

$$\text{MSAVI2} = (2*\text{PIR} + 1 - \sqrt{((2*\text{PIR} + 1)^2 - 8*(\text{PIR-R}))}) / 2 \quad (3)$$

RDVI (Renormalized Difference Vegetation Index) (equation 4) was defined by Roujean et al (1995) as the combination of two VI: DVI (Difference Vegetation Index) (Tucker, 1980) and NDVI. RDVI inherits from these two indices the ability to provide information for low and dense covers, respectively.

$$\text{RDVI} = (\text{PIR-R}) / \sqrt{(\text{PIR-R})} \quad (4)$$

### **2.3. Field measurements**

The great diversity of forage systems on Reunion Island led us to take measurements on a wide altitudinal gradient. Nine plots were selected from the coastal zone to the highlands (from 600 to 1,600 m). Five of the plots were cultivated with tropical forage species, and the others with temperate species.

The Leaf Area Index (LAI) is defined by half of the total green leaf area per unit of ground area (Watson, 1947) and is used in several grass growth models (Martiné, 1999, Vayssières et al., 2009, Johnson et Thornley, 2006, Brisson et al., 2003) because of its decisive role in photosynthesis, growth, and senescence. LAI was measured with an AccuPAR LP-80. This monitoring tool enabled the measurement of PAR (Photosynthetically Active Radiation) on and under the canopy. With this measurement we were able to estimate LAI by inversion (equation 5) of a simplified equation of Norman (1979).

$$LAI = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K}\right)f_b - 1\right] \ln \tau}{A(1 - 0.47f_b)} \quad (5)$$

*Where  $\tau$  is the ratio of PAR measured below the canopy to PAR above the canopy,  $K$  the extinction coefficient for the canopy,  $f_b$  the fraction of incident PAR which is beamed,  $A = 0.283 + 0.785a - 0.159a^2$  ( $a$  is leaf absorptivity in the PAR band)*

One of the main issues for remotely sensed observation of vegetation is the scale difference between the size of the study sites and the resolution of the remote sensing data (Eisfelder et al. 2012). To limit the potential error between field measurements and remote sensing data it is common to sample in a homogenous area (Frison et al., 1998, Sannier et al., 2002, Wessels et al., 2006) or to increase the number of sampling units in one pixel (Baccini et al., 2008). The latter option is known to be more appropriate for low or mid-resolution satellite data. As we used high resolution data we chose to increase the number of sampling units within the plots.

According to the SPOT5 spatial resolution, each measurement was taken at more than 15 m from the plot boundaries, to avoid an edge effect due to trees, hedges and roads which might interfere with the spectral signal. Each sampling unit within a plot was more than 10 to 15 m away from the others and positioned at the center of a homogenous biomass area with a radius of 5 m. For each unit, four LAI measurements were taken in line with the four cardinal points, and then averaged.

#### **2.4. Treatments and data analyses**

LAI measurements were averaged by plot and linked to the average of the VI within a plot, while respecting as short as possible a time gap between the image and the measurement dates. Sampling was carried out within three days of the image being received. If the sampling sites were cloud covered on the images, they were excluded from the analysis.

Two types of models were used in similar studies, the linear model and the exponential model. The linear model is commonly used in arid areas (Ren et Feng, 2015, Schaffrath et al., 2011). Moreover, the most widely used model is the exponential model (Meneses-Tovar, 2011, Ji et Peters, 2007). The empirical relationship between LAI and VI led us to select an exponential model (equation 6):

$$Y = a \cdot \exp(b \cdot x) \quad (6)$$

The natural log transformation of the dependent variable  $y$  led to a linear model, which could be fitted with a standard regression analysis (equation 7).

$$\ln(y) = \ln(a) + b \cdot x \quad (7)$$

The diagnosis of the model was based on the correlation coefficient  $\sigma^*$  and the Sum of Squared Error (SSE) as follows (equation 8):

$$\sigma^* = \sqrt{SSE/(n-2)} \quad (8)$$

All statistical analyses were performed using R software (R Official Site 2017).

### **3. RESULTS**

The sampling campaign from April to August 2015 resulted in 429 samples of which only 315 were usable (not affected by clouds, not abnormal). All the samples averaged by plot gave a base of 34 usable values (Table 1).

Four VI were sufficient to obtain models with a reliable correlation coefficient and residual standard error (Table 2). NDWI, which seemed to be the least appropriate in its description for estimating LAI, was logically less efficient with a lower correlation coefficient than the other indices. RDVI, described as an index reliable for low and high coverage was particularly efficient for the tropical species. However this index was less efficient for the temperate species. Two indices emerged: MSAVI2 and NDVI. These two indices gave similar results for LAI estimation. Nevertheless, the estimation by NDVI was better with a correlation coefficient from 0.92 to 0.94 ( $p<0.0001$ ).

We observed a saturation of NDVI for high LAI values. This saturation was reflected in the increase in difference between LAI and was predicted making growth the standard error. Figure 2 shows an under-estimation of LAI when LAI is high.

### **4. DISCUSSION**

The relationship between VI calculated from SPOT5 images and the LAI was very strong. Other studies which may have used different methods to estimate LAI from satellite images have been

undertaken. They gave similar results in terms of the significance of the results. Aboelghar et al (2010) dealt with rice along the Nile. The data used (Spot4) had the same resolution as SPOT5 images and the coverage was homogenous with a mono-species study area. The correlation between VI and LAI reached a maximum of 0.82 with NDVI. When comparing with our study we found that we had better results with an area that was more complex to sample because of the multi-species plots. Pontailler et al (2003) obtained a maximum correlation of 0.95 between LAI and estimated LAI. However, in that study, NDVI was not calculated from satellite images but from a laboratory sensor. Also, the number of measurements was much smaller (7) compared to our study. White et al (1997) also obtained similar results, but with a very heterogeneous population from grass to conifers.

Given that the vegetation index MSAVI2 is a soil adjusted index, we expected a better estimation of LAI than with the other indices. Theoretically this index can limit the soil effect in the VI. It is not necessarily the case, as experienced by Ren et al (2015) in Mongolia's arid and semi-arid zones, where the soil is rather more visible than on Reunion Island.

While the results allowed us to estimate LAI with great precision, it is still necessary to understand the possible sources of error. As in other studies (Menesses-Tovar, 2011, Moges et al., 2005) we found a saturation of VI for the estimation of vegetation cover characteristics. To explain this phenomenon, we had to look at the shape of the plant. There is densification of grass during the grass growth period. Thus, a certain share of the vegetation under the canopy is not visible from above, overshadowed by the upper part of the cover. While the VI provides information about the upper part of the vegetation, the grass continues to grow with a limited effect on the spectral signal Steltzer et Welker, 2006).

Another cause of error may be due to the sampling procedure. Some species are more or less adapted to the season and take over from others, changing the composition of the prairie during

the year. This phenomenon generates heavy heterogeneity in plots. Improving the number of samples could be a solution to correct this error, but it is certainly a time consuming method.

## 5. CONCLUSIONS

The livestock sector is playing a growing role in Reunion Island agriculture. At the present time, limited by the amount of forage available, imports are essential. The dependence of this overseas territory is heightened by strong urbanization on agricultural lands. A monitoring tool able to estimate forage quantities in order to manage stocks and anticipate import costs is crucial. Our study highlights a strong relationship between LAI and VI for both tropical herbaceous cover and temperate herbaceous cover. NDVI proved to be the best index for estimating this parameter out of the several indices tested. We obtained strong correlations with a value of 0.93 and 0.94 for tropical and temperate grasses, respectively. This estimation accuracy would not have been possible without the improvement in satellite imagery. The SPOT5take5 program was in fact a major factor in these results with regular image dates at 10 m. It enabled quick sampling, closest to the image dates. It should be noted that this program prefigured Sentinel2 which will allow free images every 5 days (with Sentinel-2 A and B). Estimations every five days will enable frequent data production to be fed into a grass growth model.

## References

- ABOELGHAR, M., ARAFAT, S., SALEH, A., NAEEM, S., SHIRBENY, M., ET BELAL, A., 2010. Retrieving leaf area index from SPOT4 satellite data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science.* 13. 121-127.
- BACCHINI, R.D., ET MIGUEZ, D.F., 2015. Agricultural risk management using NDVI pasture index-based insurance for livestock producers in south west Buenos Aires province. *Agricultural Finance Review.* 78. 77-91.
- BACCINI, A., LAPORTE, N., GOETZ, S.J., SUN, M., ET DONG, H., 2008. A first map of tropical Africa's above-ground biomass derived from satellite imagery. *Environmental Research Letters.* 3.
- BAL, S.K., CHOUDHURY, B.U., ANIL, S., SUNAYAN, S., MUKHERJEE, J., HARPREET, S., ET PRABHJYOT, K., 2013. Relationship between leaf area index of wheat crop and different spectral indices in Punjab. *Journal of Agrometeorology.* 15. 98-102.
- BRISSON, N., GARY, C., JUSTES, E., ROCHE, R., MARY, B., RIPOCHE, D., ZIMMER, D., SIERRA, J., BERTUZZI, P., BURGER, P., BUSSIÈRE, F., CABIDOCHÉ, Y., CELLIER, P., DEBAEKE, P., GAUDILLÈRE, J., HÉNAULT, C., MARAUX, F., SEGUIN, B., ET SINOQUET, H., 2003. An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy.* 18. 309-332.
- COLLET, C., CALLOZ, R., 2001. Précis de Télédétection: Traitements Numériques d'Images de Télédétection. Presses de l'Université du Québec, Universités francophones, Sillery, 403 pp.
- EISFELDER, C., KUENZER, C., ET DECH, S., 2012. Derivation of biomass information for semi-arid areas using remote-sensing data. *International Journal of Remote Sensing.* 33. 2937-2984.
- FRISON, P.L., MOUGIN, E., ET HIERNAX, P., 1998. Observations and Interpretation of Seasonal ERS-1 Wind Scatterometer Data over Northern Sahel (Mali). *Remote Sensing of Environment.* 63. 233-242.
- GAO, B., 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment.* 58. 257-266.
- JI, L., ET PETERS, A.J., 2007. Performance evaluation of spectral vegetation indices using a statistical sensitivity function. *Remote Sensing of Environment.* 106. 59-65.
- JIN, Y., YANG, X., QIU, J., LI, J., GAO, T., WU, Q., ZHAO, F., MA, H., YU, H., ET XU, B., 2014. Remote Sensing-Based Biomass Estimation and Its Spatio-Temporal Variations in Temperate Grassland. Northern China. *Remote Sensing.* 6. 1496-1513.
- JOHNSON, I.R., ET THORNLEY, J.H.M., 2006. Vegetative crop growth model incorporating leaf area expansion and senescence, and applied to grass. *Plant, Cell & Environment.* 6. 721-729.

KAUR, R., SINGH, B., SINGH, M., ET THIND, S.K., 2015. Hyperspectral Indices, Correlation and Regression Models for Estimating Growth Parameters of Wheat Genotypes. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*. 43. 551-558.

LIM, J., KAWAMURA, K., LEE, H.-J., YOSHITOSHI, R., KUROKAWA, Y., TSUMIYAMA, Y., ET WATANABE, N., 2015. Evaluating a hand-held crop-measuring device for estimating the herbage biomass, leaf area index and crude protein content in an Italian ryegrass field. *Grassland Science*. 61. 101-108.

MARTINE, J.-F., 1999. Croissance de la canne et stress hydrique : les apports d'un modèle plante. *Agriculture et développement*. 21-28.

MENESES-TOVAR, C.L., 2011. L'indice différentiel normalisé de végétation comme indicateur de la dégradation. *Unasylva*. 62. 39-46.

MOGES, S.M., RAUN, W.R., MULLEN, R.W., FREEMAN, K.W., JOHNSON, G.V., ET SOLIE, J.B., 2005. Evaluation of Green, Red, and Near Infrared Bands for Predicting Winter Wheat Biomass, Nitrogen Uptake, and Final Grain Yield. *Journal of Plant Nutrition*. 27. 1431-1441.

NORMAN, J.M., 1979. Modeling the complete crop canopy. *American Society of Agricultural Engineers*. 249-277.

PONTAILLER, J.-Y., HYMUS, G.J., ET DRAKE, B.G., 2003. Estimation of leaf area index using ground-based remote sensed NDVI measurements: validation and comparison with two indirect techniques. *Can. J. Remote Sensing*. 29. 381-387.

PSOMAS, A., KNEUBÜHLER, M., HUBER, S., ITTEN, K., ET ZIMMERMANN, N.E., 2011. Hyperspectral remote sensing for estimating aboveground biomass and for exploring species richness patterns of grassland habitats. *International Journal of Remote Sensing*. 32. 9007-9031.

QI, J., CHEHBOUNI, A., HUETE, A.R., KERR, Y.H., ET SOROOSHIAN, S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. 48. 119-126.

R 2017. Official Site. [www.r-project.org](http://www.r-project.org).

REN, H., ET FENG, G., 2015. Are soil-adjusted vegetation indices better than soil-unadjusted vegetation indices for above-ground green biomass estimation in arid and semi-arid grasslands?. *Grass and Forage Science*. 70. 611-619.

ROUJEAN, J.-L., ET BREON, F.-M., 1995. Estimating PAR Absorbed by Vegetation from Bidirectional Reflectance Measurements. *Remote Sensing of Environment*. 51. 375-384.

SAMIMI, C., ET KRAUS, T., 2004. Biomass estimation using Landsat-TM and -ETM+. Towards a regional model for Southern Africa?. *GeoJournal*. 177-187.

SANNIER, C.A.D., TAYLOR, J.C., ET PLESSIS, W.D., 2002. Real-time monitoring of vegetation biomass with NOAA-AVHRR in Etosha National Park, Namibia, for fire risk assessment. *International Journal of Remote Sensing*. 23. 71-89.

- SCHAFFRATH, D., BARTHOLD, F.K., ET BERNHOFER, C., 2011. Spatiotemporal variability of grassland vegetation cover in a catchment in Inner Mongolia, China, derived from MODIS data products. *Plant and Soil.* 340. 181-198.
- SCHINO, G., BORFECCIA, F., DE CECCO, L., DIBARI, C., LANETTA, M., MARTINI, S., ET PEDROTTI, F., 2003. Satellite estimate of grass biomass in a mountainous range in central Italy. *Agroforestry Systems.* 59. 157-162.
- STELTZER, H., ET WELKER, J.M., 2006. Modeling the effect of photosynthetic vegetation properties on the NDVI-LAI relationship. *Ecological Society of America.* 87. 2765-2772.
- TUCKER, C.J., 1980. A spectral method for determining the percentage of green herbage material in clipped samples. *Remote Sensing of Environment.* 9. 175-181.
- VAYSSIÈRES, J., GUERRIN, F., PAILLAT, J.-M., ET LECOMTE, P., 2009. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises Part I – Whole-farm dynamic model. *Agricultural Systems.* 101. 128-138.
- WATSON, D.J., 1947. Comparative Physiological Studies on the Growth of Field Crops. I. Variation in Net Assimilation Rate and Leaf Area between Species and Varieties, and within and between Years. *Annals of Botany.* 11. 41-76.
- WESSELS, K.J., PRINCE, S.D., ZAMBATIS, N., MACFADYEN, S., FROST, P.E., ET VAN ZYL, D., 2006. Relationship between herbaceous biomass and 1-km Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) NDVI in Kruger National Park. South Africa. *International Journal of Remote Sensing.* 27. 951-973.
- WHITE, J.D., RUNNING, S.W., NEMANI, R., KEANE, R.E., ET RYAN, K.C., 1997. Measurement and remote sensing of LAI in Rocky Mountain montane ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research.* 27. 1714-1727.
- WYLIE, B.K., DENDA, I., PIEPER, R.D., HARRINGTON JR, J.A., ET REED, B.C., 1995. Satellite-Based Herbaceous Biomass Estimates in the Pastoral Zone of Niger. *J. Range Manage.* 159-164.
- XIE, Y., SHA, Z., ET YU, M., 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology.* 1. 9-23.
- ZHAO, F., XU, B., YANG, X., JIN, Y., LI, J., XIA, L., CHEN, S., ET MA, H., 2014. Remote Sensing Estimates of Grassland Aboveground Biomass Based on MODIS Net Primary Productivity (NPP): A Case Study in the Xilingol Grassland of Northern China. *Remote Sensing.* 6. 5368-5386.

Table 1. Data description with the number of usable values, gap in days between image shoot and sampling date, minimum and maximum values, average and standard deviation of measured LAI.

Table 2. Correlation index and equation order by VI and species.

Figure 1. Location of the nine study sites, South Reunion Island

Figure 2. Distribution of sampled plots for the NDVI~LAI relation and comparison of estimated LAI vs measured LAI.

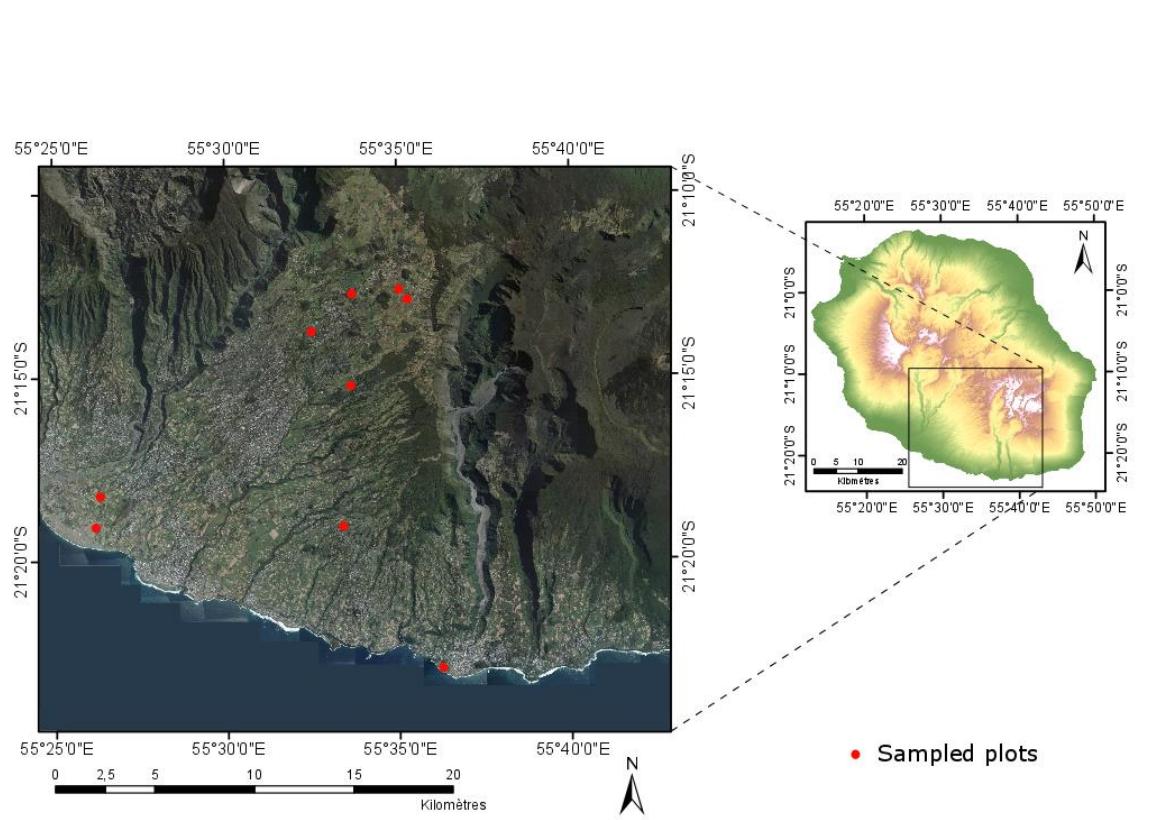
**Table 1**

<b>Species</b>	<b>N</b>	<b>Measurement -image gap (days)</b>	<b>Min LAI</b>	<b>Max LAI</b>	<b>Avg LAI</b>	<b>Std- Dev LAI</b>
Tropical	21	0.33	0.06	3.3	1.34	1.19
Temperate	13	0.54	0.08	3.9	2.20	1.29
All	34	0.41	0.06	3.9	1.67	1.29

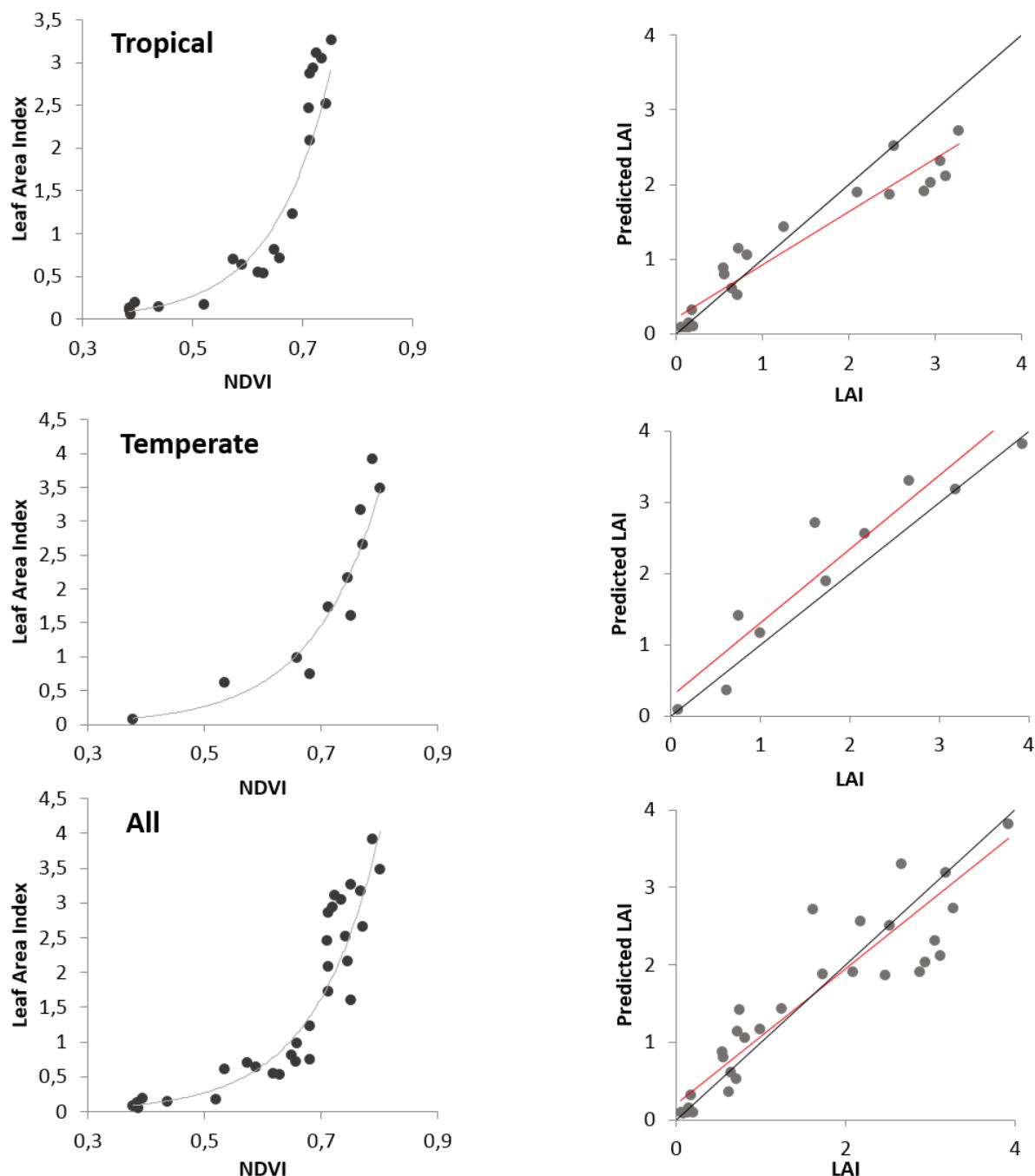
**Table 2**

<b>Indices</b>	<b>Species</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Std-Err</b>	<b>Equation</b>	<b>P-value</b>
NDVI	Tropical	0.9244	0.3711	0.0023*exp(9.4835*NDVI)	4.16E-12
	Temperate	0.9366	0.3007	0.0037*exp(8.5314*NDVI)	1.08E-06
	All	0.9258	0.352	0.003*exp(9.0022*NDVI)	< 2.2e-16
NDWI	Tropical	0.8947	0.438	0.0835*exp(8.6737*NDWI)	9.839E-11
	Temperate	0.8526	0.4585	0.0927*exp(7.3046*NDWI)	5.008E-05
	All	0.877	0.4533	0.0878*exp(7.9919*NDWI)	3.426E-15
MSAVI2	Tropical	0.9052	0.4154	0.0001*exp(11.1642*MSAVI2)	3.585E-11
	Temperate	0.9297	0.3166	0.0002*exp(10.6418*MSAVI2)	1.726E-06
	All	0.915	0.3768	0.0002*exp(10.8978 *MSAVI2)	< 2.2E-16
RDVI	Tropical	0.9319	0.3523	0.0056 *exp(0.4009*RDVI)	1.543E-12
	Temperate	0.8911	0.3941	0.22 *exp(0.2802*RDVI)	1.258E-05
	All	0.8912	0.4264	0.0111*exp(0.3376 *RDVI)	5.422E-16

**Figure 1**



**Figure 2**



Les pays de l'océan Indien sont sujets à une grande variabilité de production fourragère utilisés par les systèmes d'élevages de ruminants. Ces différences de production ont une causalité multiple. Le climat, le relief, la composition des sols ou encore les pratiques culturelles affectent la production. Ces causes sont observables à toutes les échelles, de façon intra-territoriale comme entre les pays de l'océan Indien. Une meilleure gestion des systèmes de production fourragère est indispensable. Pour cela une connaissance fiable de la biomasse disponible de graminées est déterminante. Elle permet de mieux gérer la répartition des animaux sur le parcellaire fourrager et les reports fourragers entre les saisons. Devant la multiplicité des causes affectant la production fourragère, les modèles dynamiques traditionnels de croissance de l'herbe sont difficilement applicables à l'échelle du territoire. Malgré cela ils ont la capacité à prédire la biomasse disponible quotidiennement. L'imagerie satellitaire, via les indices de végétation, permet l'étude de l'état de la végétation à l'échelle du territoire dans sa globalité. Les estimations obtenues sont un instantané de la production à un instant donné.

Cette étude a eu pour but d'étudier la possibilité de couplage de modèles dynamiques de croissance de l'herbe avec des données de télédétection, et ce pour deux terrains contrastés : La Réunion et le Kalahari (Afrique du Sud). Deux phases se sont succédé. Une première phase exploratoire, basée sur des images SPOT5 et SPOT5take5 désorbités en cours d'étude. Plusieurs enseignements ont été tirés de cette première phase dans le but de les corriger par la suite. A La Réunion l'ajustement d'un modèle empirique entre indices de végétation et biomasse engendre trop d'erreur. Il est en revanche possible d'estimer le Leaf Area Index (LAI) grâce au NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Les parcours du Kalahari, plus complexes, avec différentes strates de végétation (graminées, arbustes, arbres) n'ont pas permis d'estimer l'état du couvert de graminées.

Cette phase a ouvert la voie au travail effectué sur un capteur plus pérenne dans le temps, Sentinel-2. Les données Sentinel-2 ont permis d'estimer le LAI des prairies réunionnaises avec une RMSE (Root Mean Square Error) de 0,63 ( $r^2=0,82$ ). Le LAI ainsi estimé a été utilisé dans le couplage du modèle dynamique permettant une baisse générale de la RMSE de l'ordre de 40% par rapport au modèle sans couplage. Ces résultats ont été obtenus durant l'hiver austral, la saison sèche. Durant la période d'été austral les pluies plus abondantes accélèrent la croissance des plantes et les cycles de pousse se raccourcissent. Les images satellites sans couvert nuageux se font plus rares. La prise en compte de cette combinaison de facteurs pouvant impacter les prédictions de biomasse fourragère fera partie des principales perspectives de ce travail.

Mots clés : télédétection, imagerie optique, biomasse fourragère, modèle de croissance, couplage de modèles.

## LETTRE D'ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT

Je, soussigné(e) **Cyprien ALEXANDRE** ..,

en ma qualité de doctorant(e) de l'Université de La Réunion, déclare être conscient(e) que le plagiat est un acte délictueux passible de sanctions disciplinaires. Aussi, dans le respect de la propriété intellectuelle et du droit d'auteur, je m'engage à systématiquement citer mes sources, quelle qu'en soit la forme (textes, images, audiovisuel, internet), dans le cadre de la rédaction de ma thèse et de toute autre production scientifique, sachant que l'établissement est susceptible de soumettre le texte de ma thèse à un logiciel anti-plagiat.

Fait à Saint-Pierre le : 08/11/2017

Signature :



### Extrait du Règlement intérieur de l'Université de La Réunion (validé par le Conseil d'Administration en date du 11 décembre 2014)

#### Article 9. Protection de la propriété intellectuelle – Faux et usage de faux, contrefaçon, plagiat

L'utilisation des ressources informatiques de l'Université implique le respect de ses droits de propriété intellectuelle ainsi que ceux de ses partenaires et plus généralement, de tous tiers titulaires de tels droits.

En conséquence, chaque utilisateur doit :

- utiliser les logiciels dans les conditions de licences souscrites ;
- ne pas reproduire, copier, diffuser, modifier ou utiliser des logiciels, bases de données, pages Web, textes, images, photographies ou autres créations protégées par le droit d'auteur ou un droit privatif, sans avoir obtenu préalablement l'autorisation des titulaires de ces droits.

#### La contrefaçon et le faux

Conformément aux dispositions du code de la propriété intellectuelle, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle d'une œuvre de l'esprit faite sans le consentement de son auteur est illicite et constitue un délit pénal.

L'article 444-1 du code pénal dispose : « Constitue un faux toute altération frauduleuse de la vérité, de nature à causer un préjudice et accomplie par quelque moyen que ce soit, dans un écrit ou tout autre support d'expression de la pensée qui a pour objet ou qui peut avoir pour effet d'établir la preuve d'un droit ou d'un fait ayant des conséquences juridiques ».

L'article L335\_3 du code de la propriété intellectuelle précise que : « Est également un délit de contrefaçon toute reproduction, représentation ou diffusion, par quelque moyen que ce soit, d'une œuvre de l'esprit en violation des droits de l'auteur, tels qu'ils sont définis et réglementés par la loi. Est également un délit de contrefaçon la violation de l'un des droits de l'auteur d'un logiciel (...) ».

**Le plagiat** est constitué par la copie, totale ou partielle d'un travail réalisé par autrui, lorsque la source empruntée n'est pas citée, quel que soit le moyen utilisé. Le plagiat constitue une violation du droit d'auteur (au sens des articles L 335-2 et L 335-3 du code de la propriété intellectuelle). Il peut être assimilé à un délit de contrefaçon. C'est aussi une faute disciplinaire, susceptible d'entraîner une sanction.

Les sources et les références utilisées dans le cadre des travaux (préparations, devoirs, mémoires, thèses, rapports de stage...) doivent être clairement citées. Des citations intégrales peuvent figurer dans les documents rendus, si elles sont assorties de leur référence (nom d'auteur, publication, date, éditeur...) et identifiées comme telles par des guillemets ou des italiques.

Les délits de contrefaçon, de plagiat et d'usage de faux peuvent donner lieu à une sanction disciplinaire indépendante de la mise en œuvre de poursuites pénales.