Université Paul Sabatier de Toulouse

MASTER 2 PROFESSIONNEL

« **A**ménagement du **T**erritoire et **T**élédétection »

RAPPORT DE STAGE

Etude de faisabilité de la mise en place d'un modèle d'estimation du rendement fourrager des prairies d'élevage bovin à la Réunion par télédétection.

Emilie DOBIGNARD

Maîtres de stage : **Emmanuel Tillard & Pierre Todoroff**

Septembre 2011

Remerciements

Je tenais à adresser mes remerciements au CIRAD-Réunion et à l'ARP pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce mémoire.

Merci à Pierre Todoroff (CIRAD-CA), et Emmanuel Tillard (CIRAD-Elevage), mes maîtres de stages.

Je remercie également Charles-Emile Bigot et Vladimir Barbet-Massin (ARP) pour leurs conseils précieux concernant mes relevés terrains ainsi que pour m'avoir fourni le matériel et surtout un extrait du parcellaire fonctionnel bovin réunionnais (sans lesquels rien n'aurai été envisageable).

Je tiens à remercier également Thierry Rabaute (KALIDEOS-CNES) pour son aide concernant la programmation et le traitement de mes images SPOT.

Un grand merci à Serge Nabeneza et son stagiaire Guillaume (CIRAD-Elevage) pour leurs conseils concernant les manipulations en laboratoire.

Enfin, merci à tous les éleveurs et les coopératives qui m'ont accueillis et m'ont permis d'acquérir mes données terrain, M. Corré, M. Hoarau, M. Picard, la SICALAIT et la SEDAEL.

Je suis également **très** reconnaissante à tous les stagiaires du CIRAD résidant Ligne Paradis et à Martin, pour leur soutient sans failles quels que soient mes humeurs.

Table des matières

INTRODUCTION

1. ÉTAT DE L'ART 6
   1.1. Les prairies 6
      1.1.1. Présentation générale 6
      1.1.2. La fauche 6
      1.1.3. La pâture et l'organisation de la rotation du cheptel 7
      1.1.4. Évolution des caractéristiques des systèmes prairiaux 8
   1.2. La géomatique agricole 9
      1.2.1. Outil au service de l'agriculture 9
      1.2.2. Utilisation de la télédétection comme outil d'aide à la gestion raisonnée des cultures 10
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES 12
   2.1. Les sites d'études 12
      2.1.1. À l'échelle de l'exploitation 13
      2.1.2. À l'échelle de la parcelle 15
   2.2. Acquisition des données agronomiques 16
      2.2.1. Protocole de mesures 16
   2.3. Acquisition des données radiométriques 18
      2.3.1. La chaine de prétraitement de KALIDEOS 19
   2.4. Calcul de l'indice de végétation NDVI 20
3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS 22
   3.1. Analyse de l'évolution des données au cours du cycle cultural 22
      3.1.1. Analyse de l'évolution des paramètres biophysiques au cours du cycle cultural 22
      3.1.2. Relation entre les paramètres agronomiques 24
      3.1.3. Analyse de l'évolution de l'indice NDVI au cours du cycle cultural 25
      3.1.4. Corrélation des données biophysiques avec le NDVI 27
4. APPLICATION POUR LA FILIÈRE 28
   4.1. Suivi des événements de fauches 28
   4.2. Prévision du rendement fourrager potentiel 32
   4.3. Suivi de l'état du couvert 32

4.3.1. Suivi intraparcellaire des fauches 32
4.3.2. Variabilité interparcellaires 34
4.4. Préconisations pour l'amélioration des résultats 38
CONCLUSION
GLOSSAIRE
LISTE DES FIGURES
LISTE DES TABLEAUX
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES
ANNEXES

INTRODUCTION

L'espace réunionnais se caractérise par un déséquilibre majeur entre son centre géographique (les Hauts) et sa périphérie (le littoral). Cette organisation est une résultante de l'héritage d'un passé colonial ainsi que de la topographie insulaire (Jauze, 1998). Le littoral, qui s'organise suivant un axe passant par l'ouest reliant les deux agglomérations de Saint Denis au nord et Saint Pierre au sud, joue le rôle de noyau décisionnel et relationnel (85% de la population s'y concentre voir l'annexe 1). Cette ceinture abrite également l'essentiel de l'activité économique et sociale (70 % des entreprises industrielles, 65 % de l'activité tertiaire, 85 % des établissements financiers, 75 % des commerces, 80 % du produit touristique (Jauze, 1998)) et réduit les Hauts et les cirques à un rôle périphérique. Cette inversion de polarité a toujours été marquante, mais il faut attendre les années 70 avant de déceler un réel désir de rééquilibrage spatial, démographique et économique avec notamment la politique nationale de solidarité sur les massifs montagneux.

Ainsi donc, un programme d'aménagement ciblé, présenté en 1976, classe les Hauts en zone spéciale d'action rurale. Ce programme qui doit « *participer de manière déterminante au sauvetage de la société réunionnaise* » (Conseil régional de la Réunion de 1976) repose sur trois principes : engager un développement économique fondé sur les productions agricoles et forestières ; améliorer les conditions de vie dans les Hauts ; assurer la promotion socioculturelle des populations des Hauts. L'objectif est d'initier une nouvelle représentation de l'organisation spatiale de l'île, par le biais d'une politique de revalorisation qui permettra notamment, de stabiliser la population à l'intérieur des terres.

L'élevage bovin qui constitue une part marquante de l'espace rural est choisi comme axe stratégique de développement pour les Hauts. Ce choix est conforté par l'analyse préalable du territoire. En effet, les contraintes physiques et climatiques de la montagne réunionnaise : très fortes pentes, andosols impropres à la culture et sensibles à l'érosion, déficit hydrique dans les Hauts de l'ouest de l'île, restreignent les possibilités d'exploitation de ses sols. À cet égard, la mise en place de systèmes herbagers consacrés à l'exploitation d'élevage de bovins apparaît comme l'une des stratégies les mieux adaptées pour valoriser ces zones d'altitudes.

L'élevage bovin des Hauts de la Réunion reste et restera de dimension économique modeste ; l'importance du secteur étant limitée en valeur absolue (seulement 20 % de l'espace agricole utile de la Réunion) (Mandret, 1999). Son rôle économique et social a pour but, à son échelle, de freiner l'exode rural en créant des emplois. Cette filière est néanmoins susceptible de couvrir une part non négligeable de la consommation locale de lait et de viande, limitant ainsi les importations et donc la dépendance de l'île par rapport au marché mondial. Il s'agit de près de 7000 hectares de terrains domaniaux (rapport de 1976 du conseil régional) qui une fois aménagés permettront la mise en place d'un élevage qui ne concurrencera pas l'agriculture traditionnelle et valorisera en prime un espace sous-exploité. De plus, le fourrage présente une alternative économique intéressante du fait de son faible coût de production et d'utilisation, notamment en pâturage ou à la fauche. Cependant, la conduite des systèmes herbagers nécessite de la vigilance et une forte anticipation face à

l'irrégularité de la pousse de l'herbe et donc des stocks (saisonnalité de la production) (Theau *et al*., 2008).

Ce projet de développement de l'élevage bovin est encadré par un groupe d'associations libres : l'Union des Afp qui, depuis 1977, se charge de la mise en valeur foncière et de la gestion des terres agricoles des Hauts à vocation pastorale. Ces associations rassemblent des propriétaires fonciers des Hauts, des titulaires de baux à ferme ainsi que deux techniciens. Elle a pour but, grâce aux subventions de la Région (synthétisé en annexe 2) de réaliser des améliorations techniques dans un cadre associatif. Le CIRAD épaulera l'action de l'Union des Afp un peu plus tard, en initiant une gestion raisonnée des prairies via des actions de recherches axées sur la production fourragère. Dès lors, la répartition des tâches s'effectue en concertation et selon le partage des compétences : appui technique aux éleveurs pour l'Union des Afp et actions de recherche pour le CIRAD.

La télédétection a prouvé depuis plusieurs années son potentiel d'appui au suivi et à la gestion de la production agricole (Moran *et al*., 1997 ; Bastiaanssen *et al.*, 2000 ; Pinter *et al*., 2003). Des méthodes d'estimation du rendement de nombreuses cultures sont élaborées dès le début des années 1980 à partir de l'analyse de données radiométriques (Rasmussen, 1997 ; Everingham *et al.,* 2005) parallèlement, de nombreuses recherches aboutissent à des systèmes de prévision sophistiqués utilisant des données de télédétection pour initier ou ajuster des modèles de croissances (Maas, 1988; Bouman, 1992). Le but étant de proposer aux acteurs de la filière des outils finalisés, améliorant leur capacité de gestion. Ces innovations permettent **aux collectivités locales** comme la Chambre d'agriculture ou la D.A.A.F d'apporter une aide technique plus précise et d'évaluer le plus tôt possible les subventions et compensations éventuelles à verser. Elles permettront aussi de faciliter les déclarations graphiques des agriculteurs que demande notamment La D.A.A.F en réponse à la nouvelle réglementation européenne. Elles donnent également la possibilité **aux_agriculteurs** d'optimiser leurs interventions culturales (fertilisation et traitements phytosanitaires, planification des dates de fauches).

Le thème de mon stage s'intègre dans cette dynamique de recherche, appliquée aux écosystèmes prairiaux réunionnais. Il s'agit dans ce mémoire de proposer un outil d'estimation du rendement fourrager des prairies réunionnaises à partir d'imagerie satellite.

Pour mener à bien ce projet, une campagne d'acquisition d'images multispectrales dix mètres SPOT 4 et 5 s'étalant de mi-avril à mi-juillet a été initié, ceci grâce à la base de données ISLE_Reunion du portail KALIDEOS mise en place sur l'initiative du CNES depuis 2002. Simultanément à cette campagne, le déroulement et la mise en place d'un protocole de mesures au champ a été effectué et permet de suivre l'évolution des paramètres descriptifs de l'état du couvert. Le traitement des données est issu d'un couplage entre les données terrain et les images satellites.

La première partie de ce mémoire est consacrée à la recherche bibliographique concernant d'une part, la description du contexte agronomique (le mode d'exploitation, le type d'espèce fourragère rencontré, l'évolution des paramètres descriptifs de l'état du couvert prairial) et d'autre part, à une revue des techniques en télédétection pour estimer ces paramètres. Cet état de l'art permet de juger de l'avancement des recherches dans ce domaine et retenir ainsi les méthodologies et le matériel les plus adaptés pour développer le modèle. Les résultats présentés dans une troisième partie permettent d'envisager diverses applications (notamment cartographiques) qui ont pour but d'améliorer la gestion des systèmes prairiaux réunionnais.

1. ÉTAT DE L'ART

L'élaboration d'une démarche scientifique nécessite une étude bibliographique qui permet de connaitre l'avancement des connaissances et des recherches sur le sujet. Cet état de l'art concerne l'agronomie des systèmes prairiaux, mais également la potentialité de la télédétection appliquée au calcul des rendements fourragers.

1.1. Les prairies

1.1.1. Présentation générale

Les prairies dévolues à l'élevage de bovins représentent 25 % de la surface agricole utile de la Réunion soit environ 10 250 ha (Grimaud *et al.,* 2002). Ces milieux herbagers d'altitude se définissent comme des systèmes d'exploitation pastoraux consacrés à l'élevage de bovins sur la base de couverts prairiaux herbacés pâturés ou récoltés. À la Réunion, la « culture » de l'herbe s'est substituée à l'usage exclusif de parcours extensifs en un laps de temps relativement court (moins de 20 ans). Les éleveurs sont maintenant confrontés aux problèmes de la gestion et de l'exploitation de leurs prairies avec pour finalité de bien nourrir leurs animaux tout en conservant des pâtures en bon état (Mandret *et al.,* 2000). Ainsi, le choix des plantes fourragères devient décisif. Il est déterminé par deux paramètres principaux qui sont : les conditions du milieu et l'objectif de la culture fourragère (la pâture ou la fauche). Les espèces fourragères prépondérantes à la Réunion ainsi que les conduites culturales sont listées en annexe 3.

1.1.2. La fauche

La production fourragère réunionnaise est fortement influencée par une saisonnalité marquée. En saison fraîche, la baisse des températures et de la pluviométrie est responsable d'un ralentissement de la croissance des plantes. Cela peut entrainer un excédent fourrager en saison chaude, et un déficit en saison fraîche (***Figure 1***). L'influence de la saison est nette sur la cinétique de la croissance de l'herbe (Barbet-Massin *et al.,* 2006). La récolte mécanique et les modes de conservation du fourrage (ensilage) permettent de pallier le déficit hivernal en constituant des réserves : c'est le principe du report de stock. L'éleveur doit donc compter dans son parcellaire des prairies destinées à la fauche pour réguler et ajuster la production d'herbe aux besoins du troupeau et prévoir en moyenne quatre fauches par an (Barbet-Massin *et al*., 2006). La qualité d'un fourrage se juge par son rendement (biomasse fraîche) autant que par sa qualité nutritive. Le fauchage doit donc intervenir au moment où l'herbe à atteint une valeur optimum. Plus l'herbe pousse, moins elle est riche en éléments nutritifs (sénescence de l'herbe plus importante). L'animal doit donc absorber une part plus importante de fourrage pour compenser. Il s'agit donc de trouver l'équilibre et de planifier la fauche en conséquence. La teneur en matière nutritive d'un fourrage est donc un élément majeur que l'on suit en laboratoire (voir en annexe 6 Figure 5) et grâce auquel on peut tenter de modifier les pratiques culturales pour améliorer le rendu disponible pour les animaux. (Theau *et al.,* 1998 ; Mandret *et al.,* 2000).

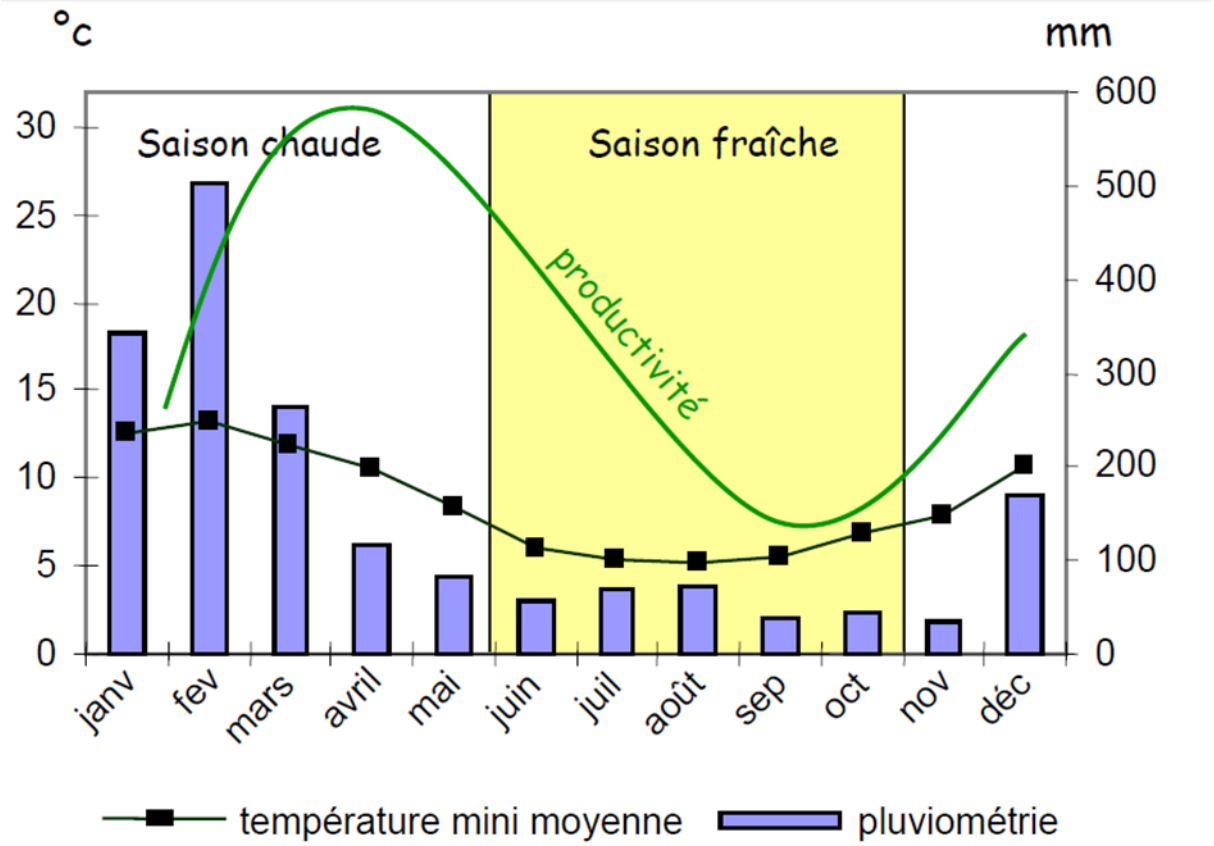


Figure 1. Saisonnalité de la production fourragère : l'exemple de la plaine des Cafres.

1.1.3. La pâture et l'organisation de la rotation du cheptel

La pâture est le seul mode d'exploitation possible des terrains non mécanisables. Il est le plus économique, mais présente des inconvénients comme le gaspillage d'herbe en saison de pluies et la dégradation du sol (Theau *et al.,* 1998). Il existe plusieurs modes de pâtures :

- **La pâture continue** : les animaux pâturent en continu une seule et grande parcelle tout au long de l'année.
- **La pâture en rotation** : Les animaux exploitent une zone divisée en petites parcelles délimitées par des clôtures fixes (pâturage tournant) ou mobiles (rationné : ***Figure 2***). Le choix du nombre de parcelles dépend de la taille de l'exploitation et du cheptel, mais doit respecter un temps de repos optimal de la prairie (temps durant lequel la parcelle est libérée par le troupeau) (Barbet-Massin *et al.,* 2006).

Figure 2. Organisation de pâtures en rotation : l'exemple d'un pâturage rationné. Le cheptel pâture la première journée le premier tiers de la parcelle : « 1 ». Le deuxième jour il pâture les deux tiers de la parcelle « 1+2 » enfin, le troisième jour, il pâture la totalité de la parcelle « 1+2+3 ». Puis, part sur la parcelle suivante et recommence « 4 » puis « 4+5 » puis « 4+5+6 ». Les clôtures (en noires) sont mobiles et permettent cette rotation. Le temps de retour moyen sur une même parcelle pour cette exploitation est de l'ordre de 23 jours.

1.1.4. Évolution des caractéristiques des systèmes prairiaux

Des références sont établies sur la croissance des grands types de peuplement prairiaux. La dynamique d'accumulation de la biomasse a été étudiée pour le Dactyle (Rebischung, 1962; Calvière, 1994). Les travaux sont plus fragmentaires pour les autres notamment pour le Kikuyu (Dugmore *et al.,* 1996 ; Bigot et Fontaine, 1988). Dans ces travaux la biomasse aérienne herbacée est mesurée indirectement par l'intermédiaire de la hauteur d'herbe grâce à un herbomètre électromécanique (Bossuet *et al.,* 1992). Ainsi on peut établir une relation entre hauteur et masse d'herbe. Des travaux sont aussi menés sur la croissance de l'herbe en fonction des sommes de températures (Theau *et al.,* 2008). L'expression du temps n'est plus en jours de repousse, mais en degrés-jours accumulés par

l'espèce fourragère (***Figure 3***). Ce mode de représentation est détaillé en annexe 11 et permet de prendre en compte dans la modélisation de la croissance de l'herbe les fluctuations dues aux variétés fourragères ou encore aux paramètres liés au lieu d'étude (température, altitude, pluviométrie). Ces modèles permettent la mise en place de courbe de croissance des graminées après une coupe ou une pâture (Mandret *et al.,* 2000 ; Clavière, 1994).

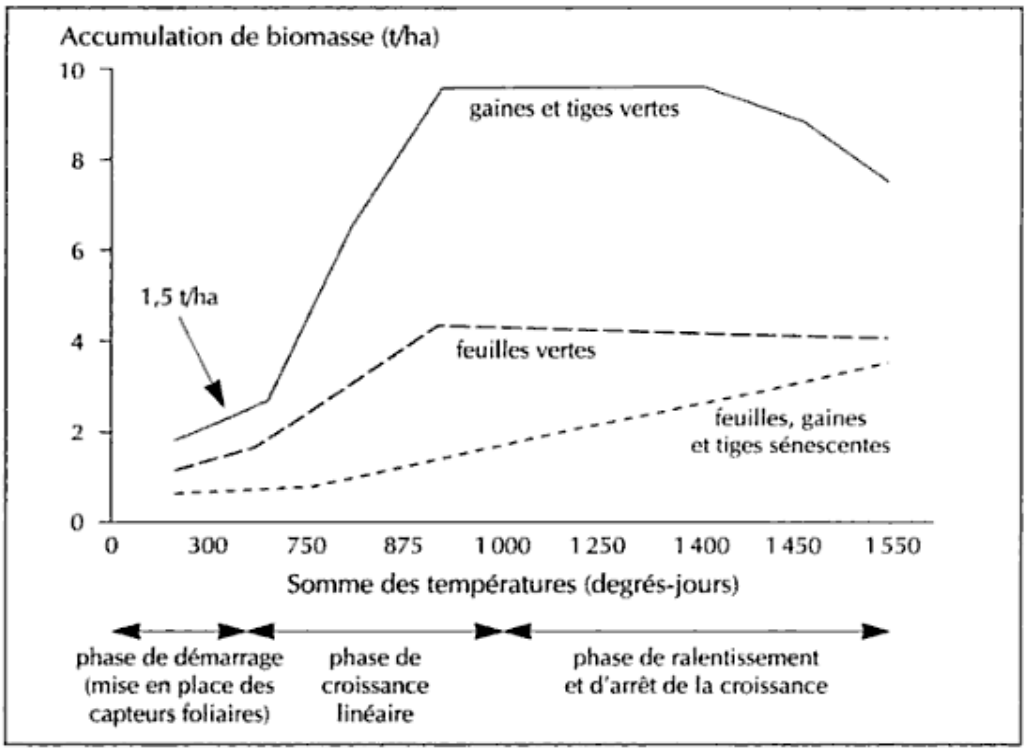


Figure 3. Schéma type de la croissance d'une prairie à dominance de graminées.

Le **temps de séjour** (temps ou une parcelle est pâturée par un troupeau) ne doit pas être trop court pour éviter un surpâturage. Le **temps de repos** (temps entre deux passages d'animaux sur une parcelle donnée ou entre deux coupes mécaniques, ou on laisse l'herbe se reposer et repousser sans être exploitée) est généralement d'environ trente jours, mais pourra être raccourci en saison de pluie quand l'herbe pousse vite pour éviter les excédents fourragers. Laisser pousser une parcelle trop longtemps entre deux fauches n'est pas une conduite culturale rentable puisqu'en moyenne après 1200 degrés-jours la qualité du fourrage diminue.

1.2. La géomatique agricole

1.2.1. Outil au service de l'agriculture

Quand la géomatique est appliquée aux besoins spécifiques d'une culture, elle ouvre la porte à de nouvelles pratiques agricoles regroupées sous l'appellation « agriculture de précision » (Viau, 2000). Ce concept récent illustre la volonté d'ajuster les pratiques culturales au plus près des besoins des plantes et affiche un objectif double : économique et écologique (améliorer le rendement du produit en initiant une gestion raisonnée). La géomatique agricole procure des outils de mesures et de positionnements qui permettent le suivi des cultures, le calcul des potentialités de rendement, la détection de problèmes (déficience azotée, maladies), et soutient ainsi la prise de décision pour une

agriculture durable (CRAAQ, 2003). Principalement par l'importance des surfaces couvertes par ses activités, le domaine agricole est une cible privilégiée pour la télédétection. De plus, les grandes exploitations sont gérées par peu de personnes et les cultures en perpétuelle évolution. (Moran *et al.,* 1994).

Les technologies géomatiques utilisées dans cette étude sont le GPS, l'imagerie satellite ainsi que les systèmes d'information géographique (SIG). Toutes, génèrent une grande quantité d'informations qu'il faut traiter pour les rendre accessibles à un large public.

1.2.2. Utilisation de la télédétection comme outil d'aide à la gestion raisonnée des cultures

L'estimation des paramètres biophysiques d'une culture par télédétection fait appel aux propriétés optiques des couverts végétaux (Jensen, 2000). Les bases physiques de la télédétection et ses applications sont présentées en annexe 4.

L'observation des cultures à partir des données satellites permet d'estimer un certain nombre de variables biophysiques qui sont de bons indicateurs de l'état de la culture (stades culturaux, biomasses) (Baret, 1999 ; Haboudane, 2002). L'annexe 4 permet de comprendre l'application de la télédétection sur les couverts végétaux.

1.2.2.1. Estimation de la densité d'un couvert végétal

Les propriétés optiques d'un couvert de blé (Goel et Thompson, 1984) de soja et de maïs (Goel et Grier, 1987) montrent que la réflectance diminue dans le visible et augmente dans le proche infrarouge quand le couvert végétal se densifie. Jusqu'à cependant, atteindre un palier de saturation au-delà duquel l'accroissement du couvert n'a plus d'effet sur son comportement spectral. Ces résultats ont poussé les chercheurs à proposer les indices de végétation (ratio de bandes de réflectances) notamment le NDVI (Rouse *et al.,* 1974) qui a l'avantage de diminuer la contribution spectrale du sol et les variations d'éclairement de la surface (Baret et Guyot, 1991). L'annexe 4 détaille l'usage de l'indice de végétation NDVI.

1.2.2.2. Estimation du rendement d'un couvert végétal (biomasse fraiche)

Les images de réflectance dans le proche infrarouge permettent de détecter les variabilités spatiales, comme les différences de rendements, à l'intérieur des parcelles de cultures (Chaerle et Straten, 2000).

Les rendements de champs de blé (Asrar *et al.,* 1985 ; Jackson *et al.,* 1983 ; Aase et Siddoway, 1981) d'orge (Kleman et Fagerlund, 1987), de soja et de maïs (Tucker *et al.,* 1979 ; Rasmussen*et al.,* 1998) ainsi que ceux de la canne à sucre (Bégué*et al.,* 2010) ont pu être estimés grâce aux indices de végétations. En effet la plus forte corrélation entre le rendement et l'indice de végétation apparait lors du « *boom stage* » c'est-à-dire quand la valeur de l'indice atteint quasiment son maximum au cours d'un cycle cultural. Le NDVI généré à partir de deux images LANDSAT TM est utilisé pour prédire le rendement final en canne à sucre pour deux districts en Australie (Noonan, 1999). La production mondiale de blé a pu être estimée avec des images satellites LANDSAT MSS, dans les projets LACIE (Large Area Crop Inventory Experiment) aux États-Unis, et MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing) dirigé par l'Union Européenne. Dans ces travaux les auteurs préconisent d'utiliser le NDVI issu de la télédétection pour estimer la biomasse, qui est ensuite utilisé

pour forcer un modèle de croissance (Martiné, 2003). Le forçage d'un modèle de croissance consiste à remplacer le rendement issu du modèle par les valeurs de rendement calculé grâce au NDVI pour, finalement comparer les résultats avec les rendements réels fournis par les exploitants. Si les résultats du forçage sont validés (meilleurs que ceux initialement donnés par le modèle sans forçage) alors il est possible de représenter les rendements simulés par le modèle avec forçage, sous forme cartographique.

La télédétection peut s'appliquer à la gestion des prairies tout comme aux autres types de cultures en prenant en compte ses caractéristiques. Dans mon étude il s'agit d'initier un modèle d'estimation du rendement (biomasse fraiche) en corrélant les valeurs de biomasse mesurées sur le terrain avec celles calculées grâce aux valeurs de NDVI issues de l'imagerie satellite. Le travail d'estimation de la production de fourrage découle de cette première approche.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Les sites d'études

Calculer un modèle de régression entre le NDVI et la biomasse, nécessite de pouvoir faire correspondre dans l'espace et dans le temps des mesures au champ avec des mesures de télédétection. Pour cela, nous devons disposer du parcellaire agronomique de l'élevage bovin de la Réunion. Le mode d'occupation du sol fourni par la D.A.A.F ne permet pas cette distinction. En effet il englobe les parcelles, ainsi que les zones non cultivées (bosquets, ravines) comprises dans l'exploitation. Il a donc fallu dans un premier temps acquérir un parcellaire fonctionnel des parcelles de fauches et des pâtures (***Figure 4***). Cette donnée a été le premier critère de sélection de nos sites d'études. Ce document mis en place par les techniciens de l'ARP (Association Réunionnaise Pastorale) est en cours de réalisation et a restreint considérablement nos choix.

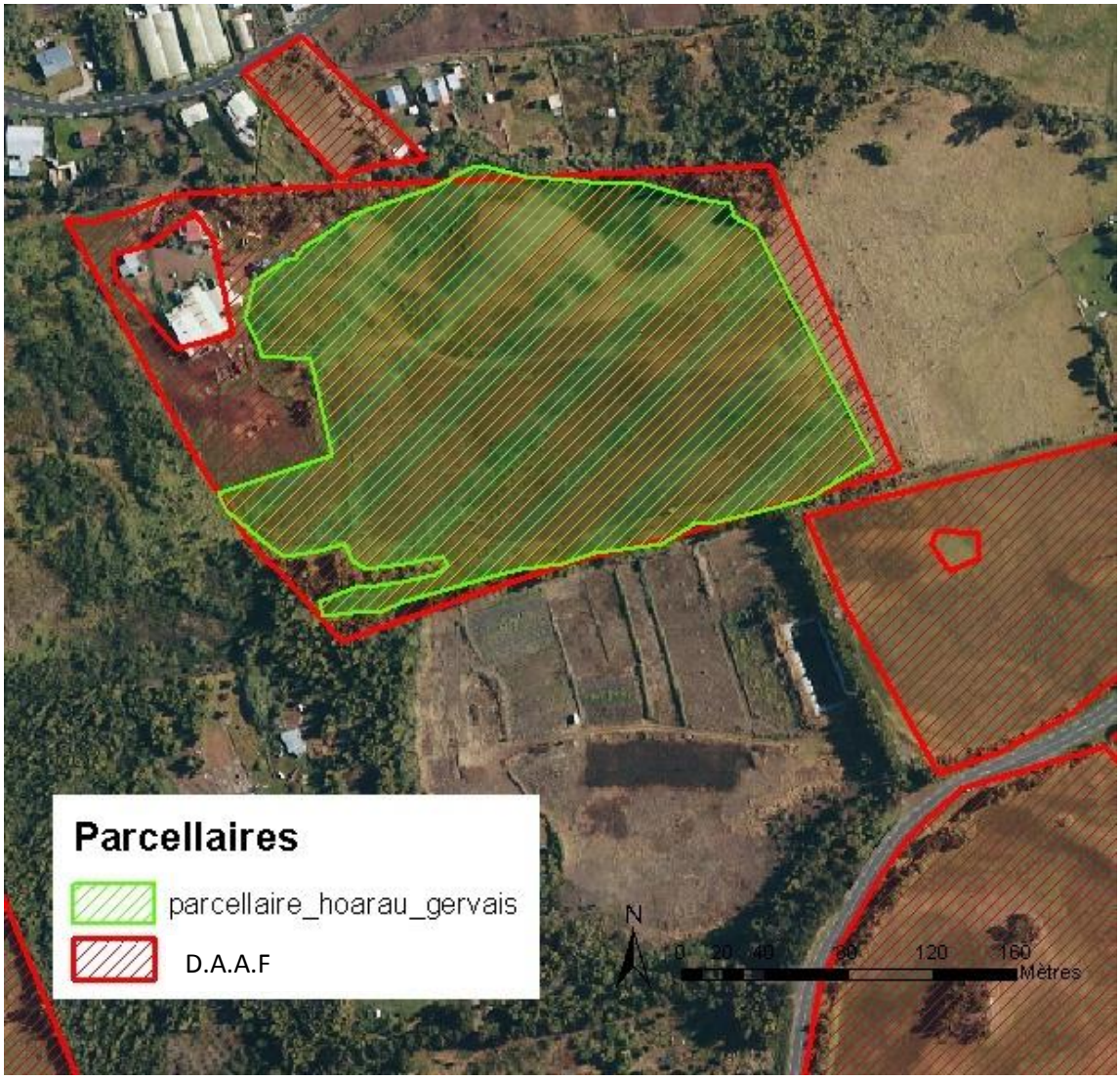


Figure 4. Superposition du parcellaire de la D.A.A.F (en rouge hachuré) et du parcellaire fonctionnel (en vert hachuré).

De plus, étant seule à réaliser les mesures au champ les sites se devaient d'être relativement proches géographiquement les uns des autres. Étant donné notre choix restreint à la zone des Hauts de

l'Ouest, aucune distinction concernant les paramètres bioclimatiques des exploitations n'a pu être retenue dans notre étude.

2.1.1. À l'échelle de l'exploitation

Cinq exploitations ont été sélectionnées. Elles sont toutes comprises dans le secteur de la Plaine des Cafres et de Mont-vert les Hauts (***Figure 5***). Deux d'entre elles (les coopératives de la SEDAEL et de SICALAIT) ont une surface agricole utile moyenne de 112ha, les trois autres, qui appartiennent à des éleveurs indépendants ne cumulent que 23ha (***Tableau 1***). On remarque que les grandes exploitations ont un nombre de parcelles de pâtures plus important que les petites ce qui induira des pratiques d'élevage différentes. Le temps de retour des bêtes sur une même pâture sera allongé ainsi, la parcelle est mise au repos plus longtemps.

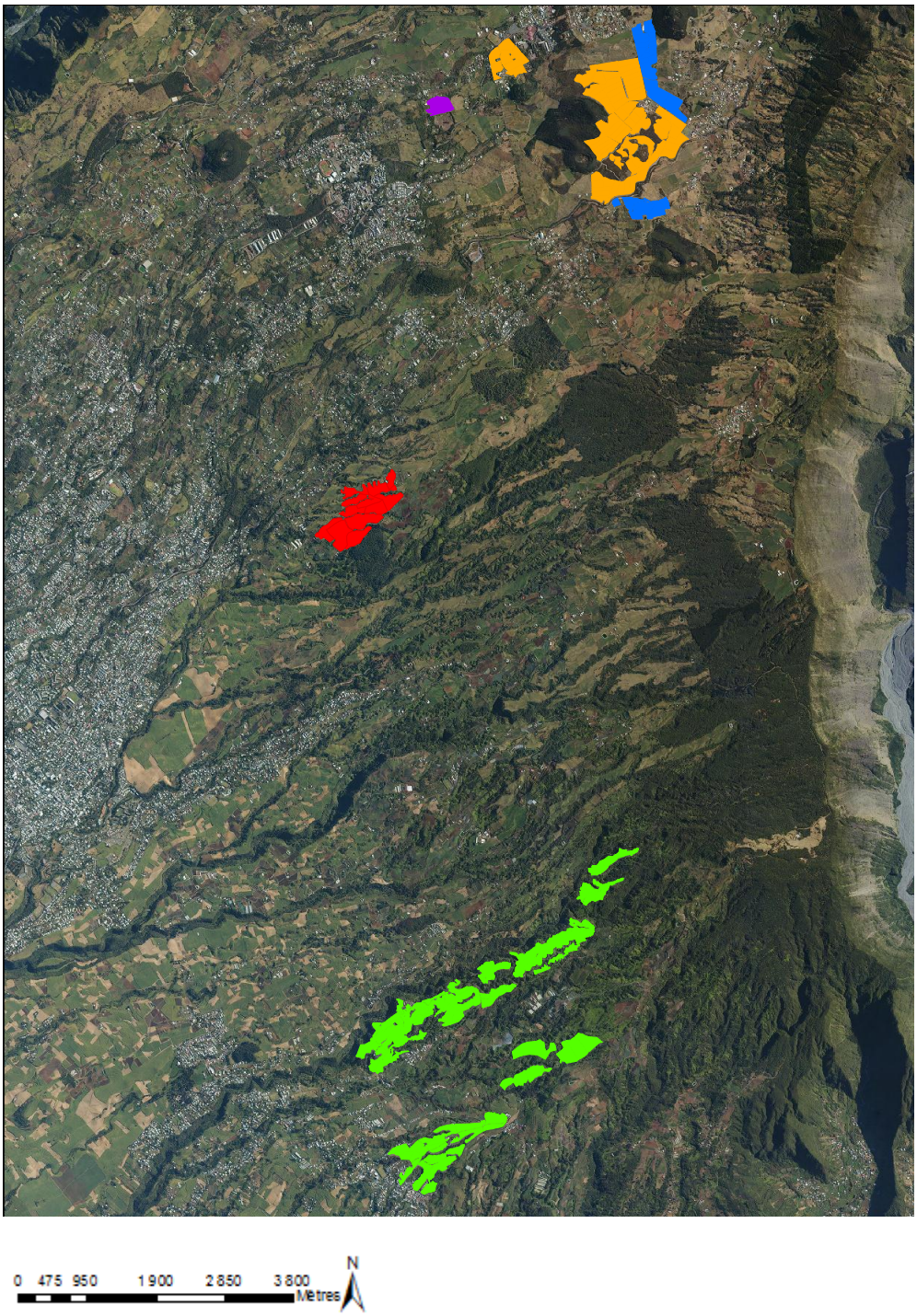


Figure 5. Carte de localisation des exploitations sur fond d'orthophoto 2008.

Exploitation	Statut	SAU	Mode de culture	Nombre de parcelles	Type de production
Hoarau	Individuel	4,3419	Fauche	1	Laitier
Corré	Individuel	33,5194	Fauche/Pâture	13	Naisseur
Picard	EARL	31,1865	Fauche/Pâture	30	Laitier
SEDAEL	Coopérative	130,9966	Fauche/Pâture	103	Naisseur/Engraisseur
SICALAIT	Coopérative	93,7122	Fauche/Pâture	76	Laitier/Naisseur

Tableau 1. Extrait de la table « Propriétaires » de la base de données « ÉTUDE PRAIRIES RÉUNION ».

2.1.2.À l'échelle de la parcelle

Propriétaires	Type de prairie	Surface réelle	Surface échantillonnée
Hoarau	Fauche 1	43489,07	34207,32
Corré	Fauche 1	54892,81	44761,24
Corré	Pâture 1	18855,59	9621,79
Picard	Fauche 1	39536,31	29462,32
Picard	Pâture 1	610,34	2329,29
Picard	Pâture 2	970,65	2521,37
Picard	Pâture 3	2061,48	4536,08
Picard	Pâture 4	2623,24	971,85
SEDAEL	Fauche 1	11908,31	17619,01
SEDAEL	Fauche 2	5934,26	11332,67
SEDAEL	Pâture 1	4291,53	9116,9
SICALAIT	Fauche 1	36920,34	5514,85
SICALAIT	Pâture 1	2295,71	4724,57
SICALAIT	Pâture 2	6552,24	3708,33

Tableau 2. Extrait de la table « Parcelles d'étude » de la base de données « ÉTUDE PRAIRIES RÉUNION ».

N. B. *Les surfaces sont en m².*

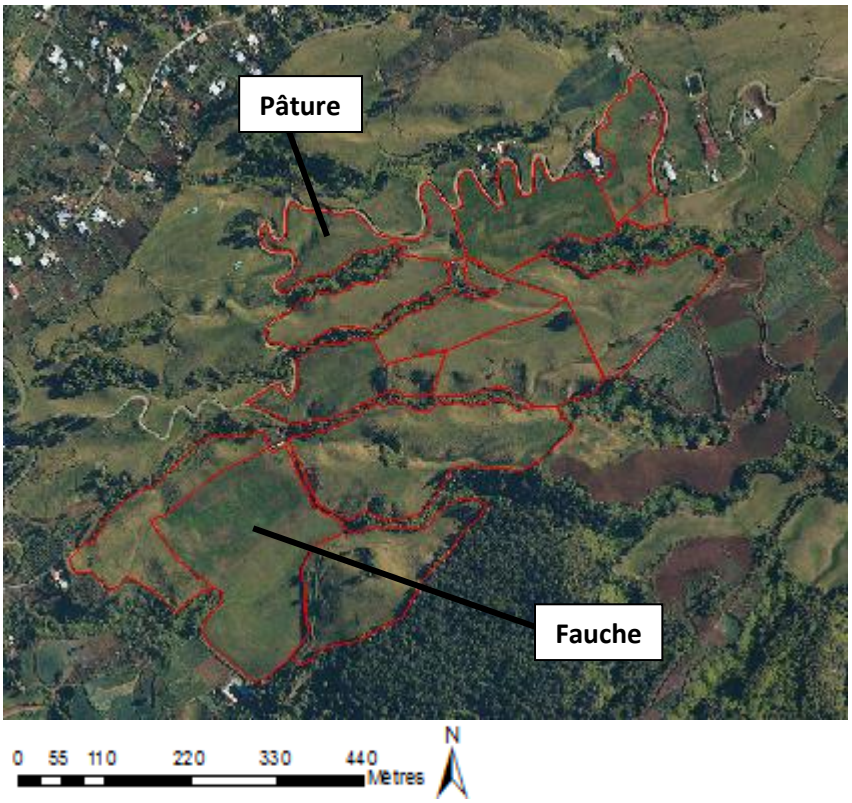


Figure 6. Parcelles d'étude chez Corré sur fond d'orthophoto 2008.

En annexe 5 sont présenté l'intégralité des parcelles d'étude des autres éleveurs sur fond d'orthophoto 2008.

2.2. Acquisition des données agronomiques

Toutes les données agronomiques seront couplées avec les données radiométriques des satellites SPOT 4 et 5. Les localisations géographiques des mesures au champ sont obtenues avec la prise des coordonnées au GPS différentiel.

Notre protocole de mesure correspond à une approche diachronique. L'objectif initial est de suivre durant douze semaines les parcelles de fauches à différents stades de développement, à raison d'un échantillonnage tous les quinze jours afin de reconstituer l'intégralité du cycle compris entre deux fauches. En ce qui concerne les parcelles de pâtures, les mesures débutent lorsque les bêtes quittent la parcelle et se terminent quand elles y reviennent (un cycle de rotation). Chaque quinze jours, une parcelle d'étude s'ajoute à celle déjà échantillonnée, qui correspond à une parcelle de pâture venant d'être libérée par le troupeau.

2.2.1. Protocole de mesures

Pour chaque parcelle (fauche et pâture confondue) l'échantillonnage est réalisé à raison de 3 à 4 mesures par hectare de prairie, de façon à représenter l'hétérogénéité parcellaire. Les données mesurées sont constituées de :

2 Un relevé GPS avec le ***« GPS XT Trimble »***.

3 Une mesure de poids d'un échantillon d'herbe coupé compris à l'intérieur d'un carré de 50cm/50cm de côté

4 Un relevé de la hauteur d'herbe avec l'herbomètre ***« Folding Plate Pasture Meter JENQUIP ».***

5 Un échantillon d'herbe fraîche représentatif de l'hétérogénéité moyenne de la culture est ramené en laboratoire pour y être séché, pesé et broyé afin d'avoir accès aux valeurs nutritives moyennes du fourrage par parcelle (à chaque mesure il convient de garder 50 g d'herbe fraîche qui sera « poolé » c'est-à-dire réunit pour former un seul et même échantillon final d'environ 500 g).

Les fiches techniques du matériel utilisé ainsi que les protocoles d'analyse en laboratoire sont listées en annexe6.

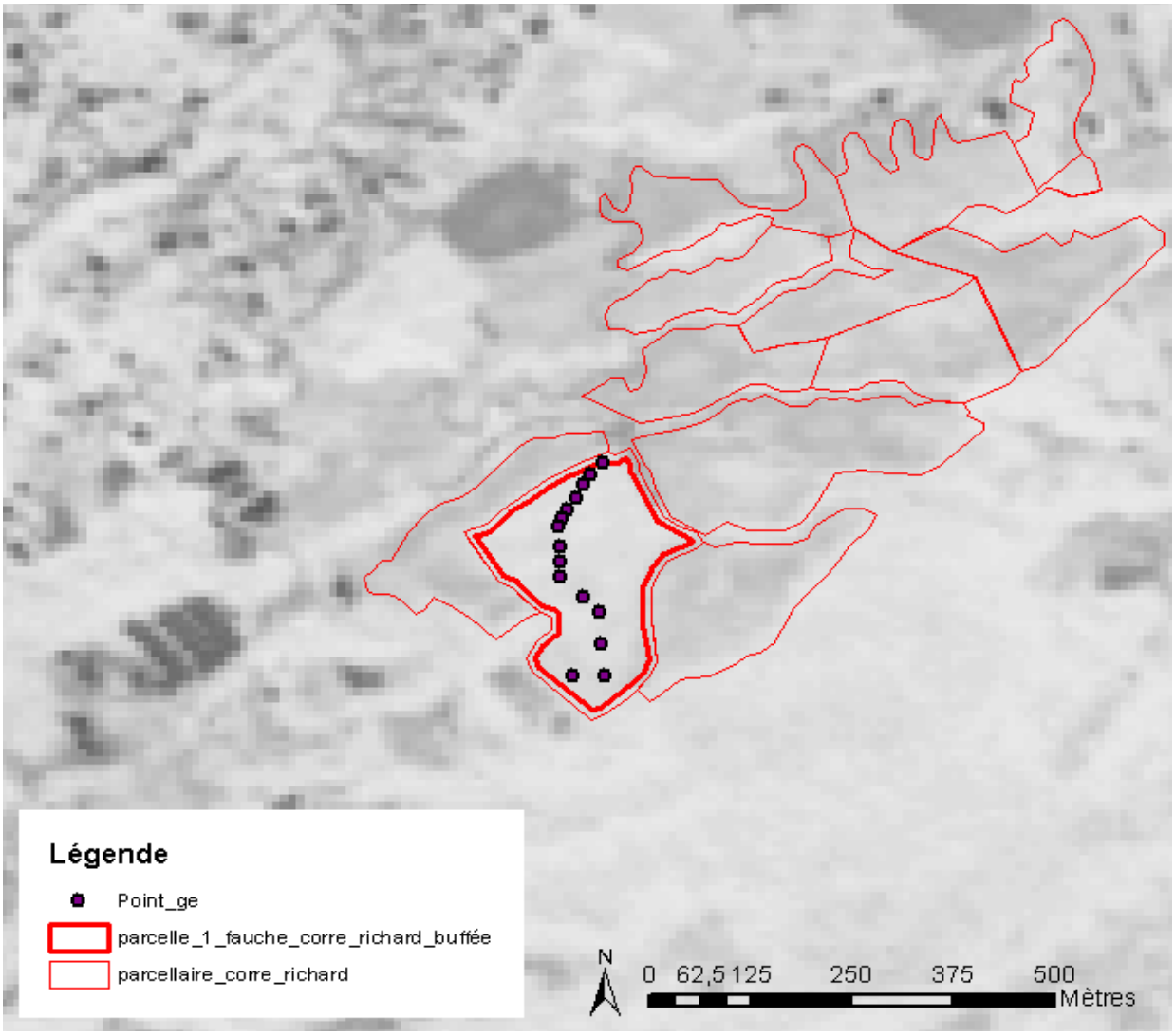


Figure 7. Localisation des points de mesures GPS pour la fauche de Corré sur fond de SPOT 5 « indice NDVI » du 21 mai 2011.

Échantillon terrain	Dates terrains	Numéro de couche GPS	Biomasse fraiche ponctuelle g/2,5m²	Hauteur d'herbe ponctuelle cm/2,5m²
carré échantillon n° 1	18-mai-11	7	1020	53
carré échantillon n° 2	18-mai-11	7	500	53
carré échantillon n° 3	18-mai-11	7	1010	53
carré échantillon n° 4	18-mai-11	7	500	53
carré échantillon n° 5	18-mai-11	7	1300	53
carré échantillon n° 6	18-mai-11	7	440	53
carré échantillon n° 7	18-mai-11	7	290	40
carré échantillon n° 8	18-mai-11	7	390	48
carré échantillon n° 9	18-mai-11	7	200	27,3
carré échantillon n° 10	18-mai-11	7	210	41,8
carré échantillon n° 11	18-mai-11	7	710	53
carré échantillon n° 12	18-mai-11	7	310	50,1
carré échantillon n° 13	18-mai-11	7	260	46,3
carré échantillon n° 14	18-mai-11	7	210	29,8
carré échantillon n° 15	18-mai-11	7	500	53

Tableau 3. Extrait de la table « Points échantillons » de la base de données « ÉTUDE PRAIRIES RÉUNION » pour la fauche de Corré au 18 mai 2011.

L'intégralité des mesures GPS et des points échantillonnés pour d'autres parcelles **OU** pour d'autres dates est en annexe 7. Grâce à toutes ces données récoltées, les valeurs de biomasse et de hauteur d'herbe moyenne sont calculées :

Parcelles	Dates terrain	Biomasse fraîche moyenne g/2,5m²	Hauteur d'herbe moyenne cm/2,5m²	Numéro des couches GPS	Rendement en tonnes pour la parcelle
Fauche 1	18-mai-11	523,3	50	7	114,9
Fauche 1	01-juin-11	10	11,25	8	2,19
Fauche 1	22-juin-11	31,33	16,9	9	6,88
Fauche 1	29-juin-11	66	20,8	10	14,49
Fauche 1	13-juil-11	256	19,23	11	56,21
Pâture 1	04-mai-11	243,75	14,8	12	18,38
Pâture 1	13-mai-11	297,5	15,31	13	22,44

Tableau 4. Extrait de la table « Données-terrain » de la base de données « ÉTUDE PRAIRIES RÉUNION » pour Corré.

Les mesures de biomasse et de hauteur d'herbe moyenne effectuées pour les autres éleveurs sont compilées en annexe 8.

2.3. Acquisition des données radiométriques

Les données radiométriques sont issues des capteurs embarqués sur les satellites SPOT 4 et 5. Le jeu d'images SPOT utilisé dans ce mémoire provient de la base de données spatiale KALIDEOS ISLE_Réunion réalisée sur l'initiative du CNES depuis 2002. Cette base de données nous a permis d'avoir à disposition suffisamment d'images pour constituer une série temporelle exploitable

sur nos sites d'études. Le paramètre de la nébulosité a été le plus restrictif dans le choix des images (***Figure 8 : Exemples d'images SPOT 4 et 5 utilisées***) :

Figure 8 : SPOT 4 du 23 avril SPOT 4 du 8maiSPOT 5 du 21mai

Dates	Formats	Capteurs	Angle (degrés)
23-avr-11	P+XI	SPOT 4	16.60R
08-mai-11	P+XI	SPOT 4	02.90 L
21-mai-11	J	SPOT 5	
30-mai-11	J	SPOT 5	24.05 L
09-juin-11	P+XI	SPOT 4	26.20R
24-juin-11	P+XI	SPOT 4	05.20R
04-juil-11	P+XI	SPOT 4	10.40 L
14-juil-11	P+XI	SPOT 4	

Tableau 5. Caractéristiques des images SPOT 4 et 5 utilisées. P= Panchromatique SPOT 4 ; XI = Produit natif multispectral SPOT 4 ; PXI= Fusion d'image ; J = Produit natif multispectral SPOT 5. Pour l'angle : R= Droite et L= Gauche.

Les caractéristiques des capteurs des satellites sont décrites en annexe 9.

2.3.1. La chaine de prétraitement de KALIDEOS

2.3.1.1. Corrections

Lorsqu'une image est acquise par le dispositif Kalideos auprès du fournisseur SPOT Image, elle est enregistrée dans la base de données spatiale KALIDEOS ISLE_Réunion au **niveau 1A**. Elle n'a donc subi aucun traitement. La chaine de corrections des images SPOT 4 et 5 est assurée par le CNES à travers deux étapes de prétraitement (May *et al.,* 2010). L'image est orthorectifiée et corrigée afin d'atteindre le **niveau 3**. Elle est ainsi superposable géométriquement, restituée dans un référentiel connu, calibrée radiométriquement : par étalonnage, les comptes numériques sont convertis en réflectance et permettent le suivi temporel ainsi que la comparaison de grandeur physique (l'image est de type **TOC = Top Of Canopy**), et enfin corrigée des effets de l'atmosphère et du relief.

2.3.1.2. Coefficient d'inter-étalonnage entre SPOT 4 et SPOT 5

La chaine de prétraitement du CNES se charge également d'appliquer les coefficients d'étalonnages nécessaires afin de permettre la comparaison inter-capteurs SPOT 4 et SPOT 5. En effet, les étalonnages relatifs entre deux capteurs issus d'un même satellite sont peu différents (coefficient de

l'ordre de 1.05), mais les variations relatives d'étalonnage sont importantes entre SPOT 4 et SPOT 5 (coefficient d'environ 0.8). La réflectance enregistrée par le capteur SPOT 5 est sensiblement plus élevée que celle enregistrée par SPOT 4. Il en va de même pour l'application du coefficient d'étalonnage relatif à la perte de sensibilité des capteurs avec les temps. Cette perte est importante les premières semaines de mise en service du capteur puis devient faible, mais régulière. Les images **« TOC»** sont toutes étalonnées.

2.3.1.3. La fusion de résolution des images SPOT

La série temporelle doit être constituée d'images SPOT 4 et 5 ayant la même résolution spatiale soit 10mètres. Or le format brut des images SPOT 4 multispectrales **« XI »** présente une résolution de pixel de 20 mètres (**« J »** pour le format brut de SPOT 5). La fusion entre les bandes multispectrales et la bande panchromatique de SPOT 4 donne une image multispectrale (4 bandes) de résolution égale à celle fournie par la bande panchromatique **« P »** (10mètres). Ce format est appelé **« PXI »**. Dans le cadre du projet ISLE_Réunion, les données satellitaires mises à disposition par le CNES via le catalogue du site Spot Image ont subi également ce prétraitement de fusion (**P+XI**).

2.4. Calcul de l'indice de végétation NDVI

Nous utilisons le logiciel Erdas Imagine v11 pour traduire les images multispectrales en indice NDVI. Le NDVI est un ratio des deux bandes de réflectance ROUGE et PROCHE INFRAROUGE. Voir l'annexe 4. Il est défini par l'équation : **PIR – ROUGE / PIR + ROUGE**

La courbe d'évolution de l'indice NDVI n'étant pas une fonction linéaire, nous estimons l'indice de chaque parcelle par la valeur médiane du des pixels de chaque parcelle :

Parcelles	Dates SPOT	NDVI médian
Fauche 1	23-avr-11	233
Fauche 1	08-mai-11	235
Fauche 1	21-mai-11	232
Fauche 1	30-mai-11	184
Fauche 1	09-juin-11	186
Fauche 1	24-juin-11	215
Fauche 1	04-juil-11	213
Fauche 1	14-juil-11	207
Pâture 1	23-avr-11	228
Pâture 1	08-mai-11	221
Pâture 1	21-mai-11	211
Pâture 1	30-mai-11	221
Pâture 1	09-juin-11	205
Pâture 1	24-juin-11	211
Pâture 1	04-juil-11	214
Pâture 1	14-juil-11	211

Tableau 6. Extrait de la table « NDVI par parcelle » de la base de donnée « ÉTUDE PRAIRIES RÉUNION »pour Corré.

Les mesures effectuées pour les autres éleveurs sont compilées en annexe 8. L'annexe 10 répertorie les manipulations sous SIG antérieures au calcul du NDVI médian. Ces données doivent maintenant être couplées et traitées afin d'évaluer si l'on peut établir une corrélation entre le NDVI et le rendement des parcelles de prairies réunionnaise.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Après l'analyse et le traitement des différentes données acquises, nous nous intéresserons à l'apport de la télédétection dans l'utilisation d'un modèle d'estimation du rendement (qualité/quantité) fourrager des prairies.

3.1. Analyse de l'évolution des données au cours du cycle cultural

Nous avons procédé à l'analyse des différentes données acquises sur le terrain et par la télédétection. Nous présenterons tout d'abord l'évolution des paramètres agronomiques, puis celle du NDVI mesuré tout au long du cycle cultural, pour finir par l'établissement des corrélations existantes entres les mesures terrain et les données issues de l'imagerie satellite (NDVI). L'évolution des paramètres descriptifs de l'état du couvert végétal au cours du cycle cultural est représentée en somme des degrés/jours accumulés par le couvert végétal. Les variations d'altitudes et d'espèces de graminées rencontrées entre nos différents sites de mesure, influence le développement du couvert prairial. La somme des degrés/jours accumulés entre la date de fauche (ou de rotation) précédente, et la date de la mesure renseigne de manière pertinente (Martiné, 2003) sur le stade de croissance des graminées. L'intérêt de l'utilisation de la somme des degrés/jours accumulés par le couvert végétal est présenté en annexe 11.

3.1.1. Analyse de l'évolution des paramètres biophysiques au cours du cycle cultural

3.1.1.1. Évolution de la biomasse fraîche (rendement)

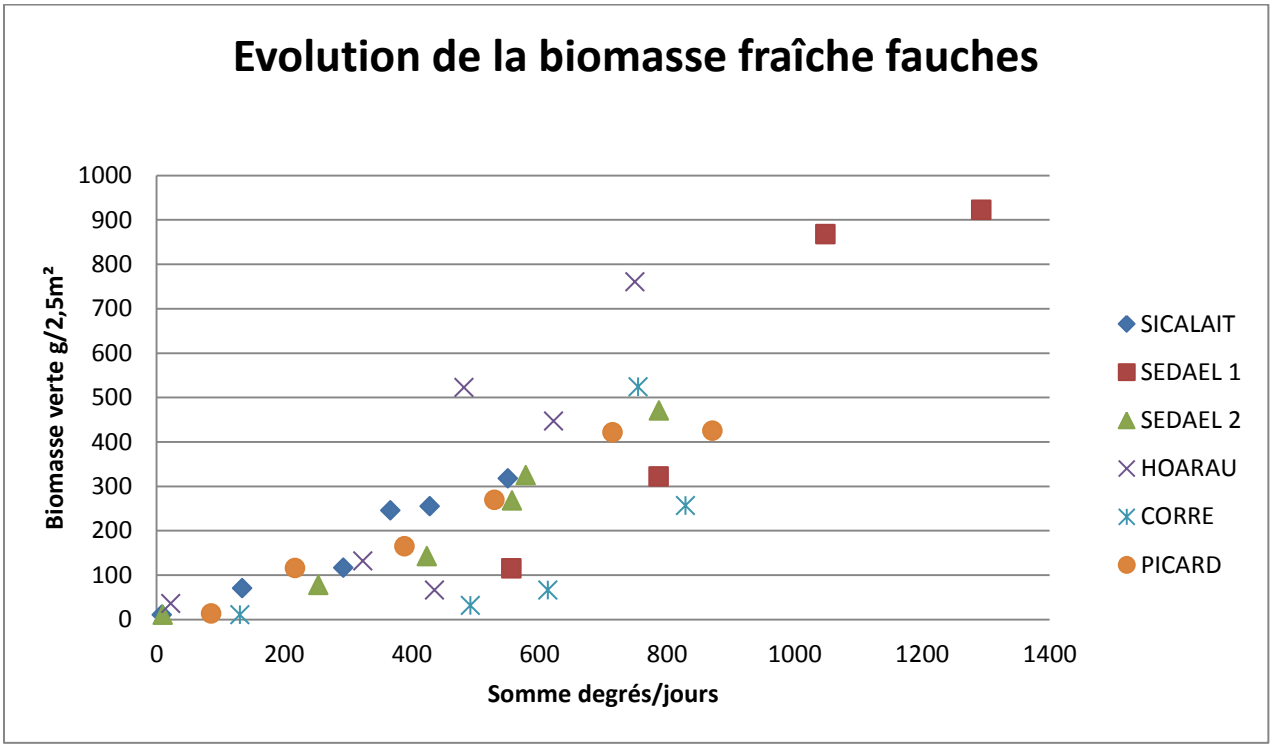


Figure 9. Évolution temporelle de la biomasse fraîche pour les fauches.

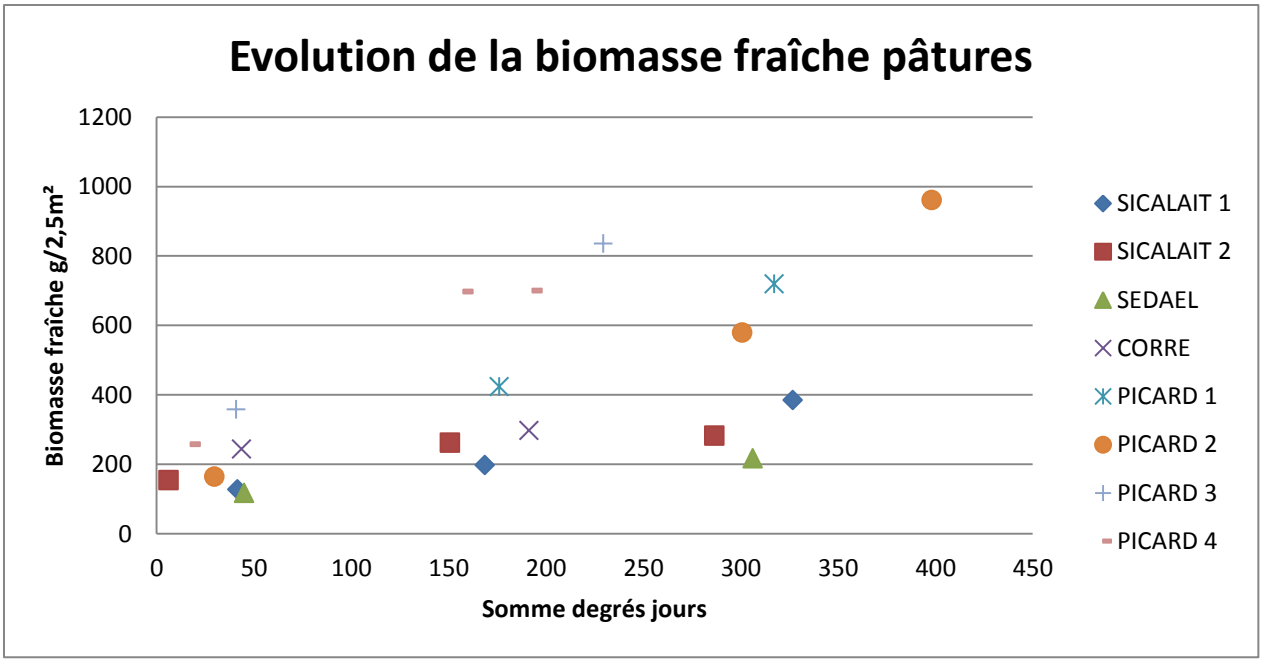


Figure 10 : Évolution temporelle de la biomasse fraîche pour les pâtures.

Les ***Figures 9 et 10*** présentent l'évolution de la biomasse fraîche en fonction de la somme des degrés/jours accumulés par les prairies de fauche d'une part, et de pâture d'autre part. La biomasse semble évoluer de façon linéaire. Même si la corrélation pour les pâtures est moins significative, la tendance globale de la courbe montre que la biomasse augmente au cours du cycle cultural. L'annexe 11 présente également les variations de biomasse liées à la localisation et aux espèces de graminées rencontrées sur les différents sites d'études.

3.1.1.2. Évolution de la hauteur d'herbe

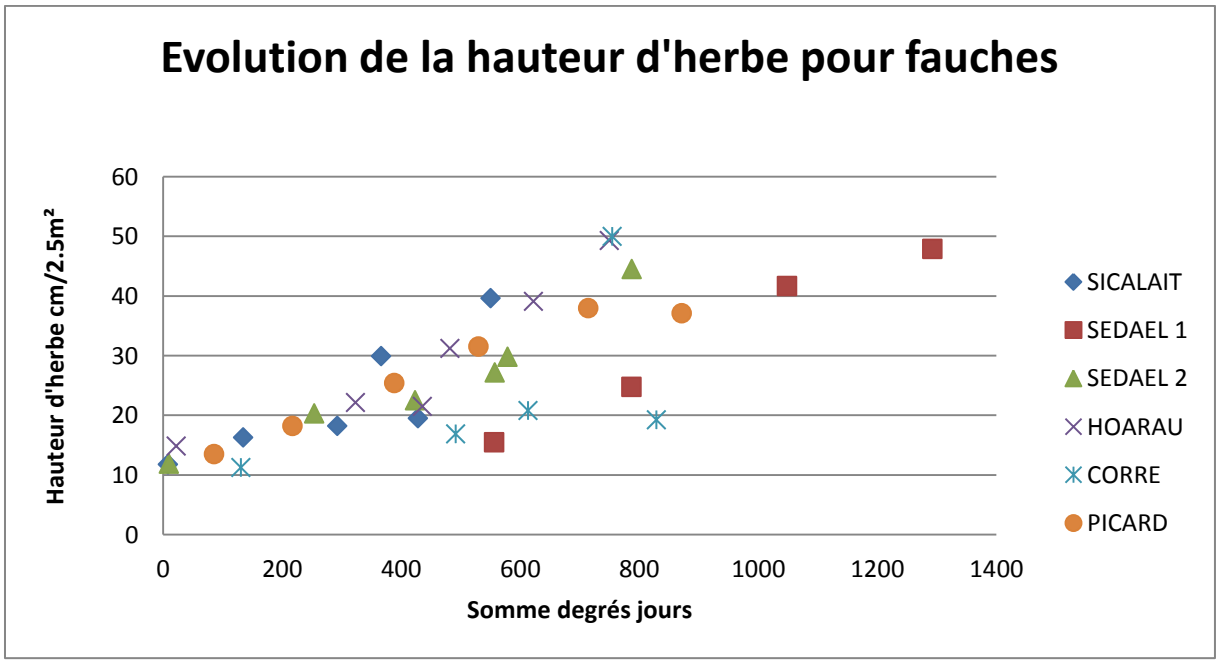


Figure 11 : Évolution temporelle de la hauteur d'herbe pour les fauches.

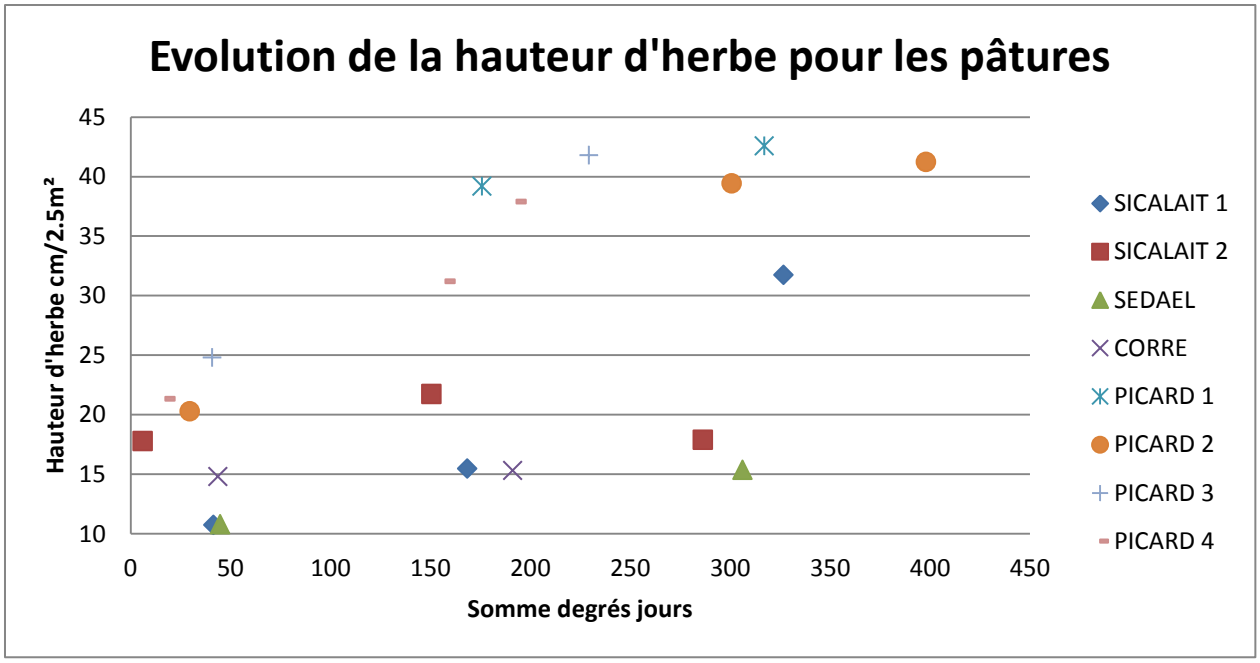


Figure 12. Évolution temporelle de la hauteur d'herbe pour les pâtures.

Les ***Figures 11 et 12*** présentent l'évolution de la hauteur d'herbe en fonction de la somme des degrés/jours accumulés par les prairies de fauche puis de pâture. La hauteur d'herbe évolue de façon linéaire pour les fauches. Cette évolution est moins caractéristique concernant les pâtures. La distribution des points montre une tendance à l'augmentation globale de la hauteur d'herbe au cours du cycle cultural.

3.1.2.Relation entre les paramètres agronomiques

- Hauteur d'herbe/Rendement

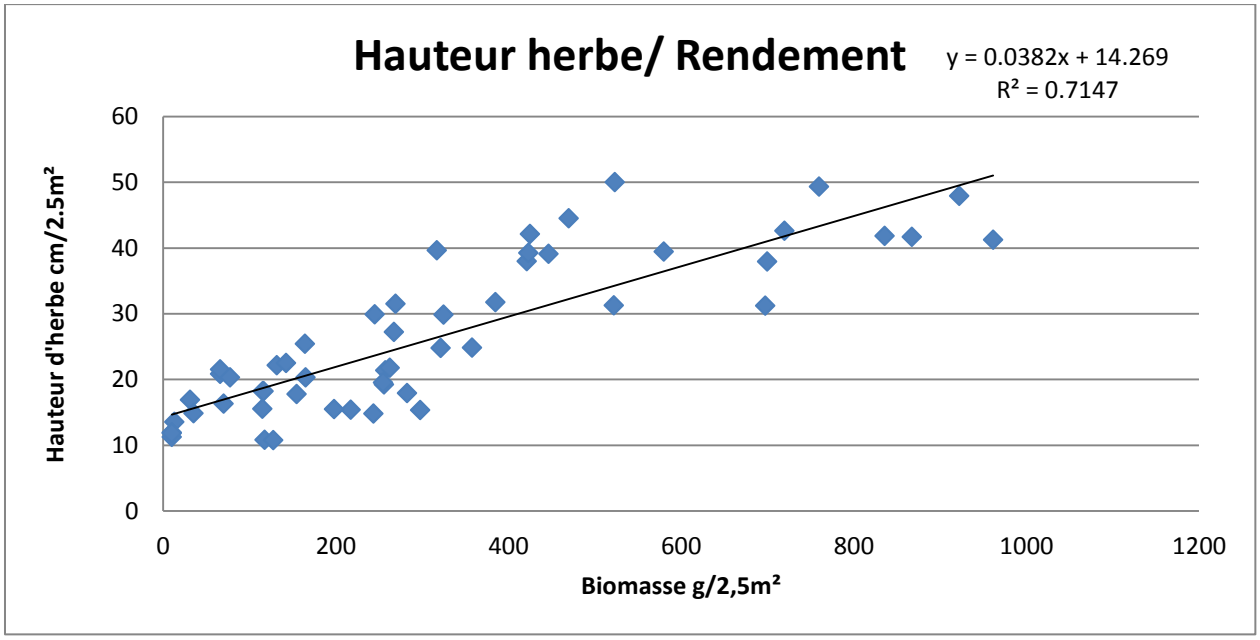


Figure 13. Relation entre la hauteur d'herbe et la biomasse fraîche (rendement).

La ***Figure 13*** indique qu'il existe une relation entre ces deux paramètres physiologiques. Le coefficient de corrélation est de 0.845 est hautement significatif (p<0.00001). La valeur de biomasse fraîche (rendement) est d'autant plus forte que la hauteur d'herbe augmente. Cette relation s'exprime suivant l'équation :

Hauteur d'herbe = 0.038 * Biomasse fraîche + 14.269

- Matière sèche/Rendement

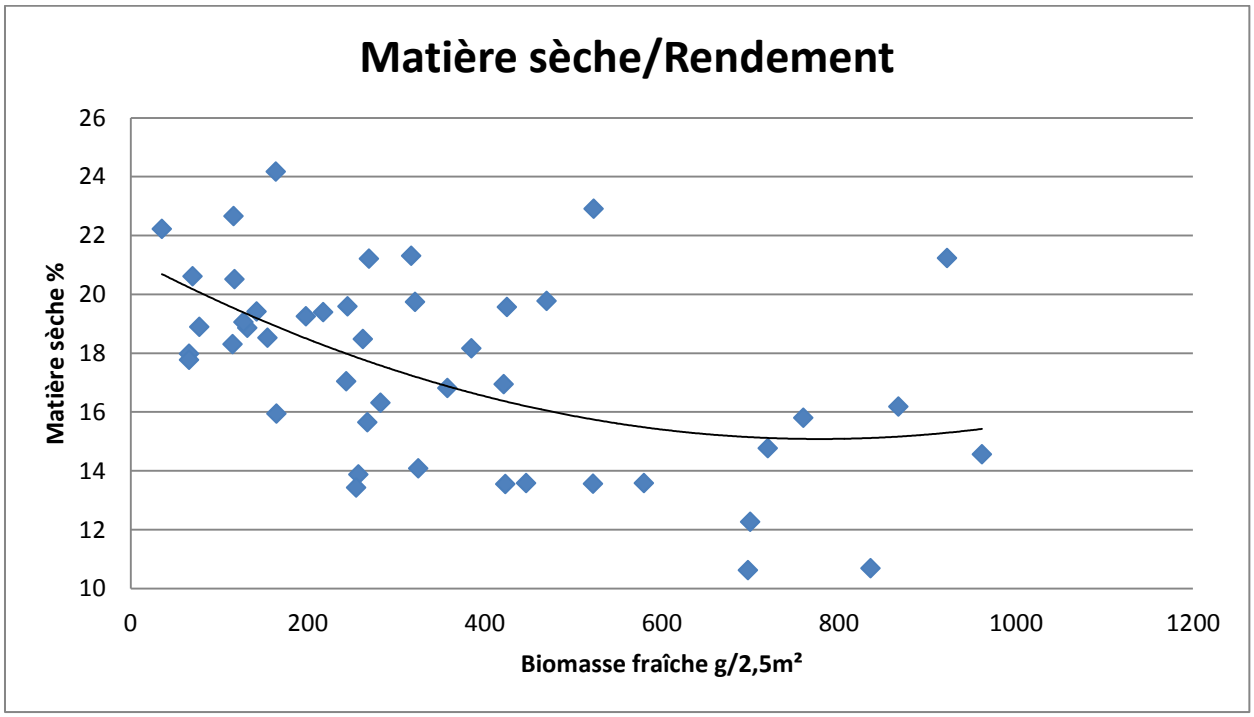


Figure 14. Relation entre la matière sèche et la biomasse fraîche (rendement).

La ***Figure 14*** indique que la matière sèche peut être corrélée au rendement frais. La tendance de la courbe démontre que plus le rendement (biomasse fraîche) augmente plus la matière sèche tends à diminuer. Le coefficient de corrélation calculé sous « **R** » est de -0.5 (avec p< 0.0006 et un intervalle de confiance…), la corrélation est donc significative. Si l'éleveur veut augmenter son rendement fourrager en terme quantitatif, il perdra en qualité nutritive. Son fourrage à tendance à perdre en richesse en élément nutritif : il se gorge d'eau.

3.1.3. Analyse de l'évolution de l'indice NDVI au cours du cycle cultural

Dans cette partie, nous allons étudier l'évolution des valeurs du NDVI aux différents états du couvert prairial. Les indices de végétations, notamment les ratios, sont sensibles au changement d'état du couvert (annexe 4). Les ***Figures 15*** et ***16*** présentent l'évolution du NDVI sur les 14 parcelles de fauches et de pâtures étudiées en fonction de la somme des degrés jours accumulés par les parcelles :

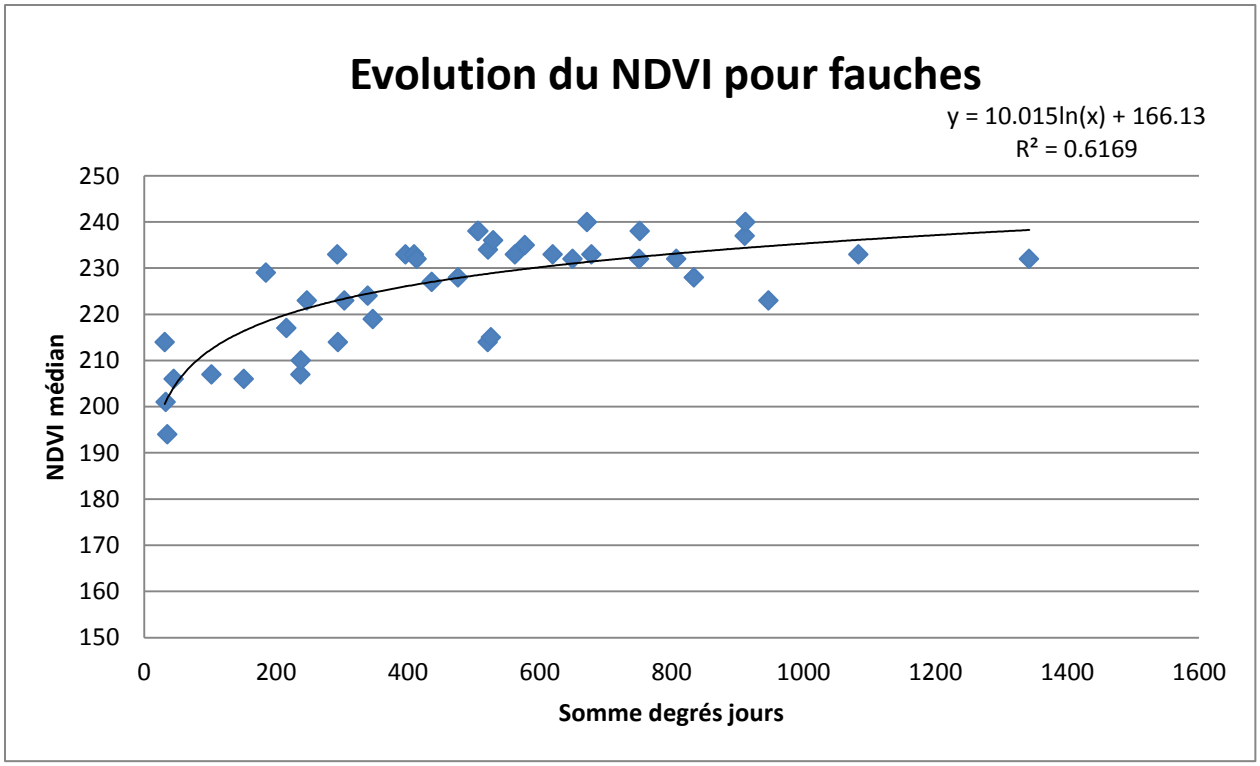


Figure 15 : Évolution temporelle du NDVI pour les fauches.

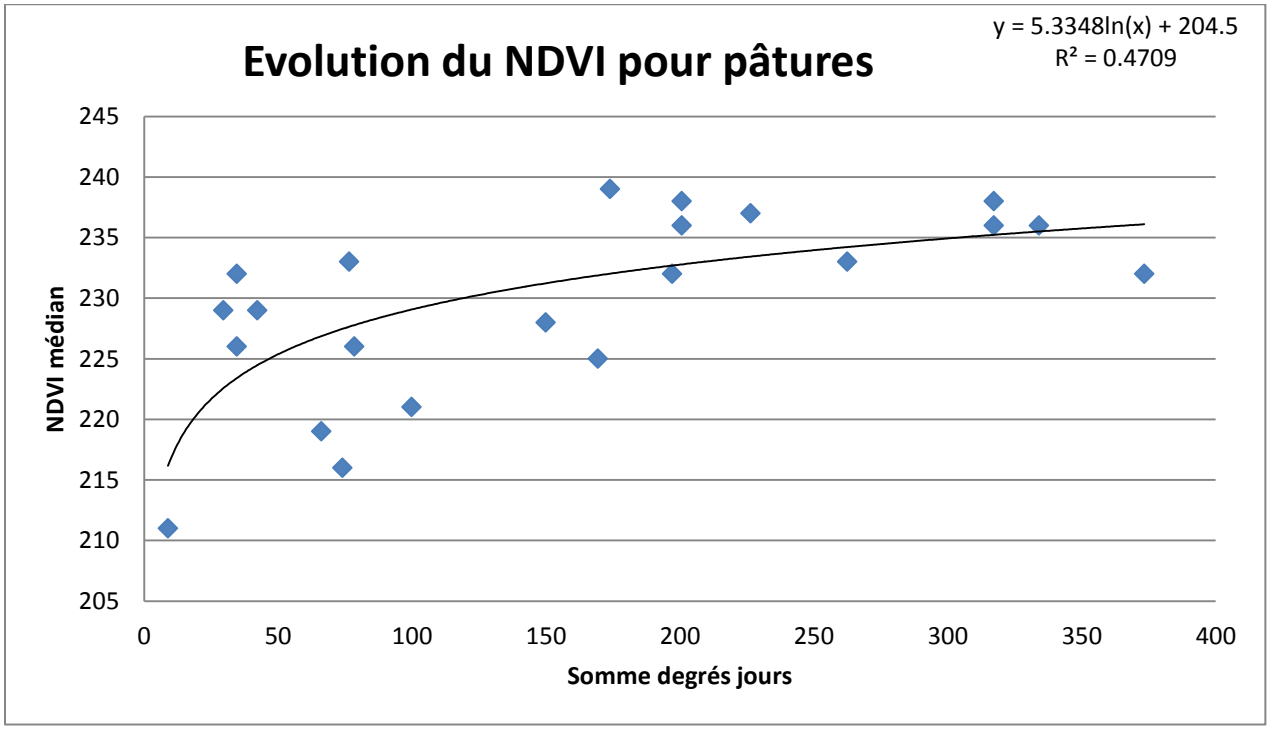


Figure 16. Évolution temporelle du NDVI pour les pâtures.

Même si la tendance de la courbe est moins caractéristique pour les pâtures que pour les fauches (R^2= 0.4 contre 0.6 pour les fauches), le NDVI augmente globalement durant une première phase qui correspond à celle de la croissance du couvert végétal puis se stabilise durant une deuxième phase

autour d'une valeur égale à environ 235. Cette évolution de NDVI est caractéristique du développement d'un couvert végétal.

3.1.4. Corrélation des données biophysiques avec le NDVI

La ***Figure 17*** présente les relations entre les paramètres physiologiques du couvert et les valeurs de NDVI mesurées par télédétection :

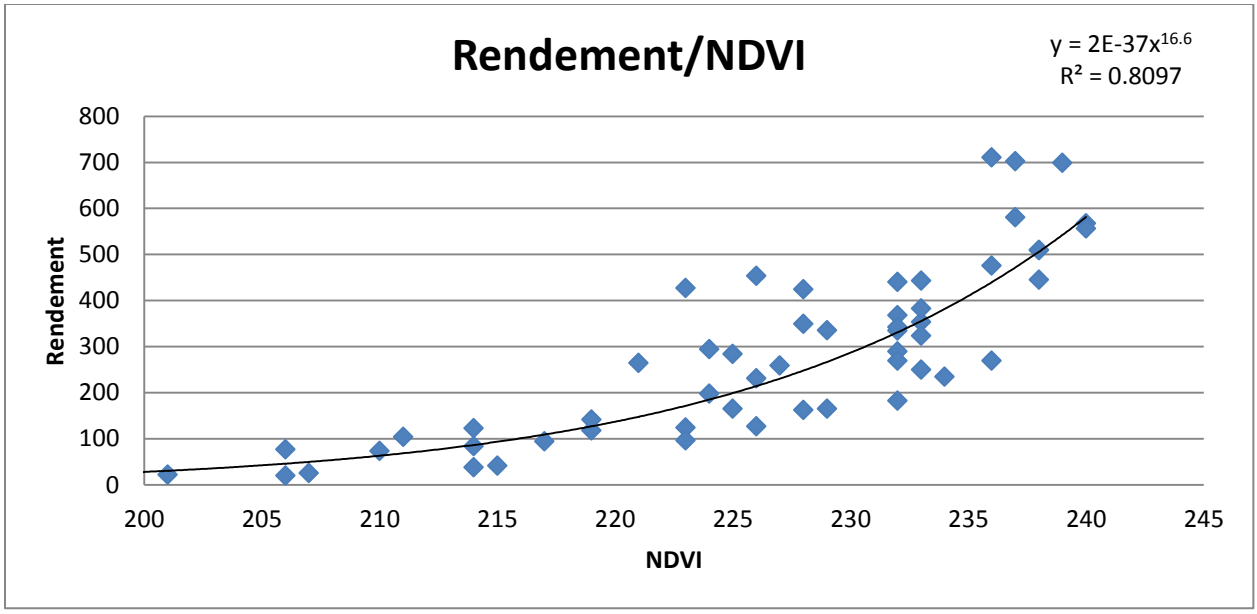


Figure 17. Évolution entre la biomasse fraîche (rendement) et le NDVI.

La ***Figure17*** présente la corrélation entre la biomasse fraîche (rendement) et le NDVI. Le déroulement des statistiques appliquées à cette étude est présenté en annexe 12. L'évolution du rendement augmente de façon linéaire avec les valeurs de NDVI. Le coefficient de corrélation est de 0.80, les résultats sont significatifs puisque $p<0.00001$. Les résultats obtenus indiquent que l'estimation du rendement frais peut être faite par l'utilisation du NDVI. Le rendement potentiel s'exprime en fonction de la valeur de NDVI par la relation suivante :

RDT prairie = 2^{E}-37 * $NDVI^{E}$ 16.6 (vraies valeurs)

ATTENTION : Pour avoir accès aux valeurs de NDVI médianes sur Erdas Imagine V11 il faut transformer l'image SPOT 4ou 5 de type « *continuous* » en type « *thematic* ». Par ce procédé les valeurs de NDVI comprises entre -1 et +1 (format 16 bits) sont ré-échantillonnées entre 0 et 256 (format 8 bits). L'annexe 13 compare la distribution des pixels entre les deux types d'images et montre qu'il n'y a pas de changement significatif. Ainsi, l'équation de la relation entre les valeurs de NDVI et la biomasse reste la même. Mais le calcul des valeurs réelles de rendements (après le forçage du modèle de croissance) nécessite les valeurs réelles de NDVI.

Tous les résultats des corrélations des paramètres biophysiques et radiométriques sont répertoriés en annexe 12 accompagnés des tests de validité effectués sous « **R** ».

4. APPLICATION POUR LA FILIÈRE

Les différents résultats que nous venons de présenter vont nous permettre de répondre aux besoins exprimés par les différents acteurs de l'élevage bovin réunionnais. Des outils d'aide à la gestion de leurs prairies de fauches et de pâtures pourront être mis en place comme par exemple des cartes thématiques d'estimation de rendements fourragers.

4.1. Suivi des événements de fauches

Cette partie présente une méthodologie utilisée pour suivre les fauches des parcelles par changements du NDVI. Il s'agit de déterminer un seuil de différence de NDVI qui indiquera que la parcelle peut être considérée comme fauchée. Ce seuil est fonction de la valeur de différence du NDVI entre avant et après la fauche sur une même parcelle. Par exemple, prenons la parcelle de Corré qui a été fauchée le 25 mai 2011 : l'image SPOT 4 du 21 mai est celle utilisée pour la valeur de NDVI avant la fauche et l'image SPOT 5 du 30 mai pour les valeurs de NDVI après la fauche. Ainsi la valeur médiane de NDVI passe de 232 à 184 la diminution est de l'ordre de **18,75 %.**

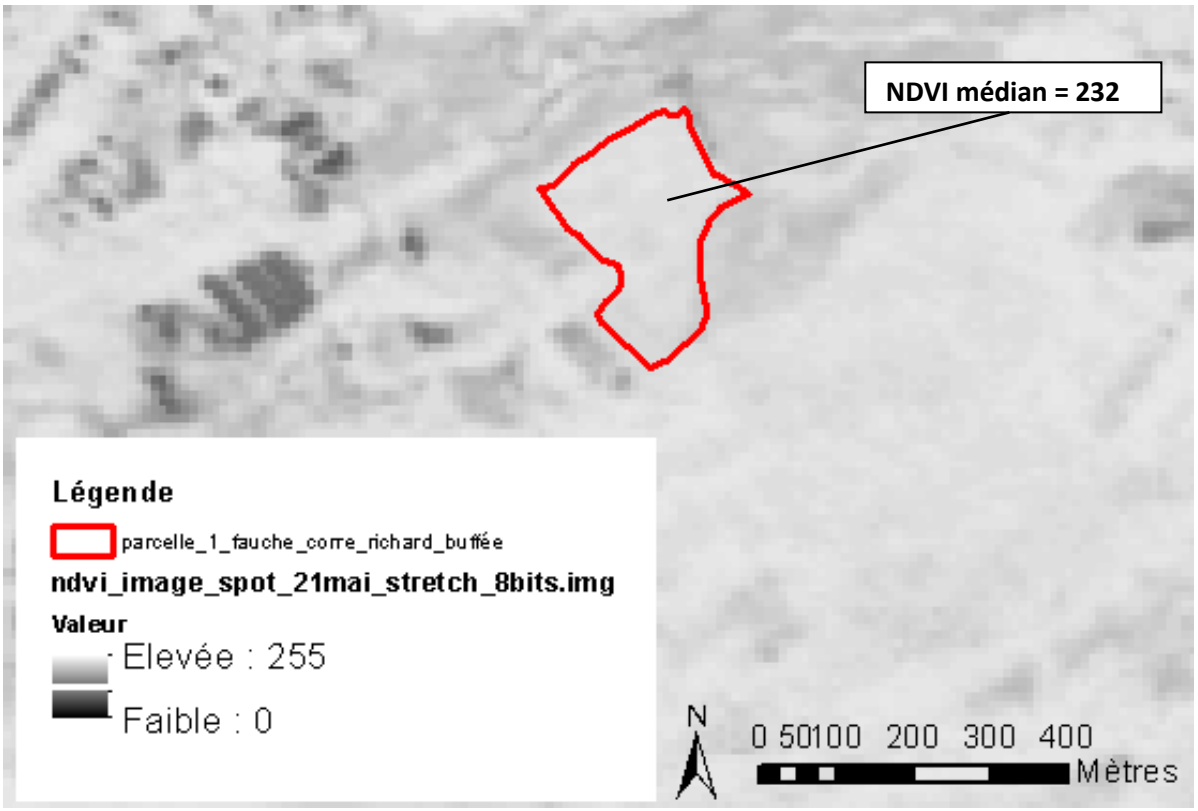


Figure 18. NDVI médian calculé pour la fauche de Corré avec l'image SPOT 5 du 21 mai 2011.

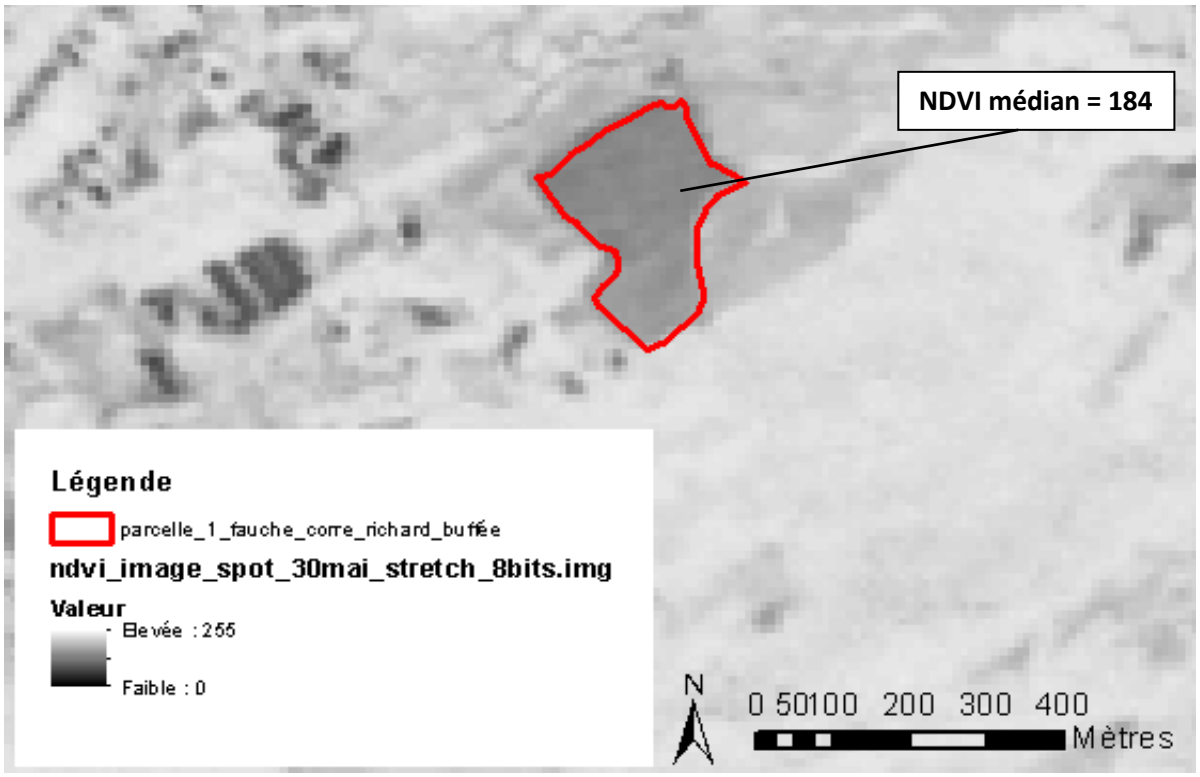


Figure 19. NDVI médian calculé pour la fauche de Corré avec l'image SPOT 5 du 30mai 2011.

Si le calcul est étendu à nos cinq autres fauches d'études, par le même procédé, le seuil de diminution du NDVI entre les images avant et après les fauches est d'environ **12,5 %.** La dernière étape consiste à ne conserver que les pixels dont la valeur de NDVI a augmenté d'au moins 12,5 %. Cette méthodologie est réalisable à l'aide d'Erdas Imagine v11. Ce logiciel permet de localiser les pixels ayant diminué de valeur de NDVI entre deux dates (zones gris très foncé).

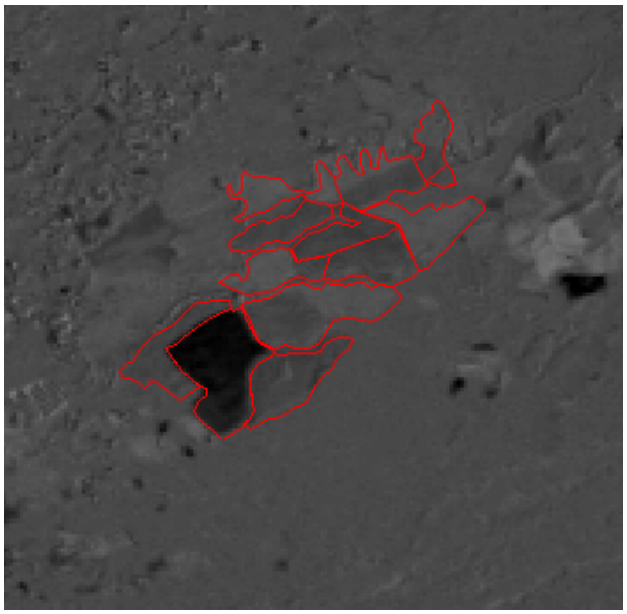


Figure 20a. Exemple de seuil de fauche appliquée sur l'exploitation de Corré.

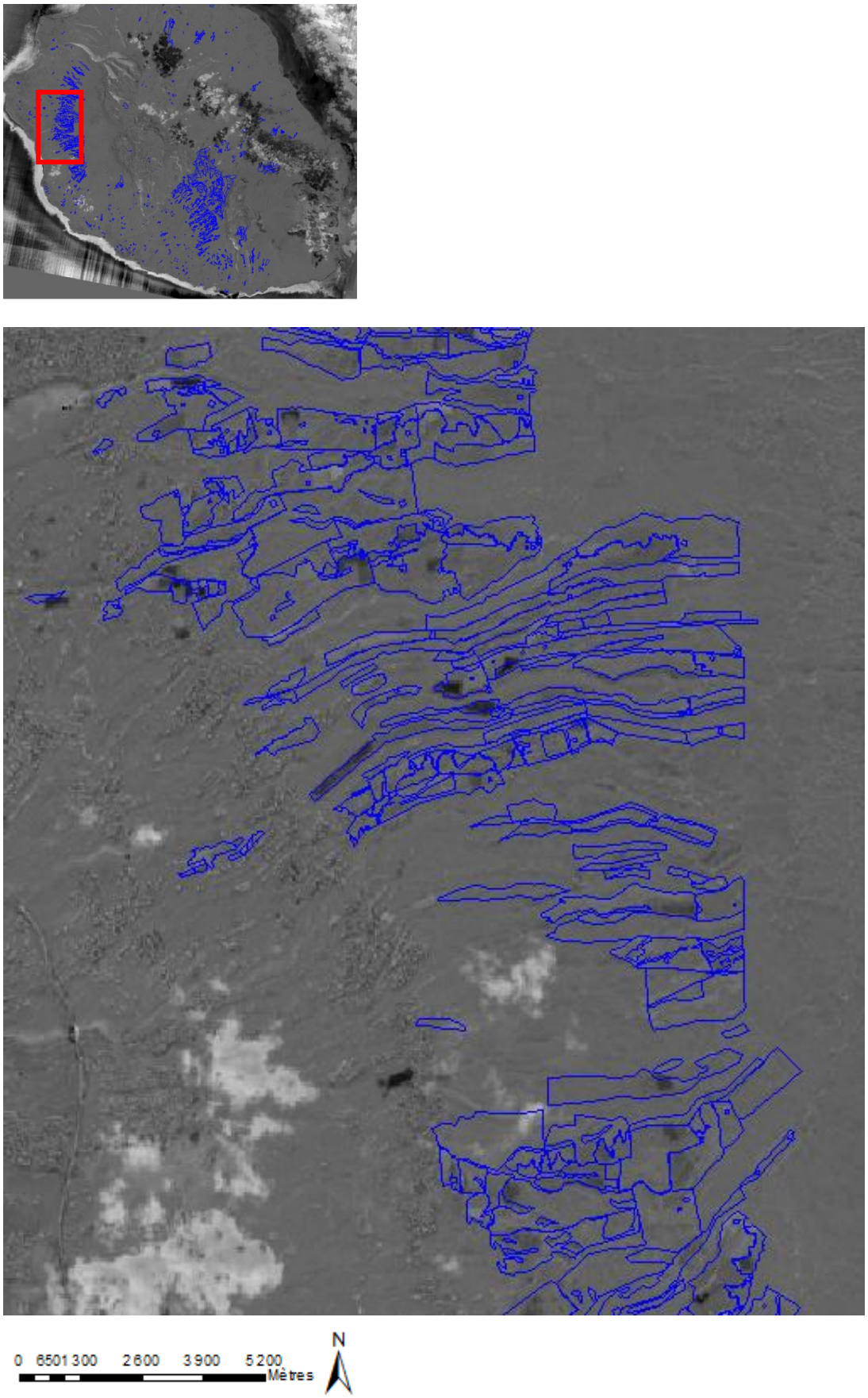


Figure 20b. Seuil de fauche appliqué au parcellaire de la D.A.A.F dans les Bas de l'Ouest.

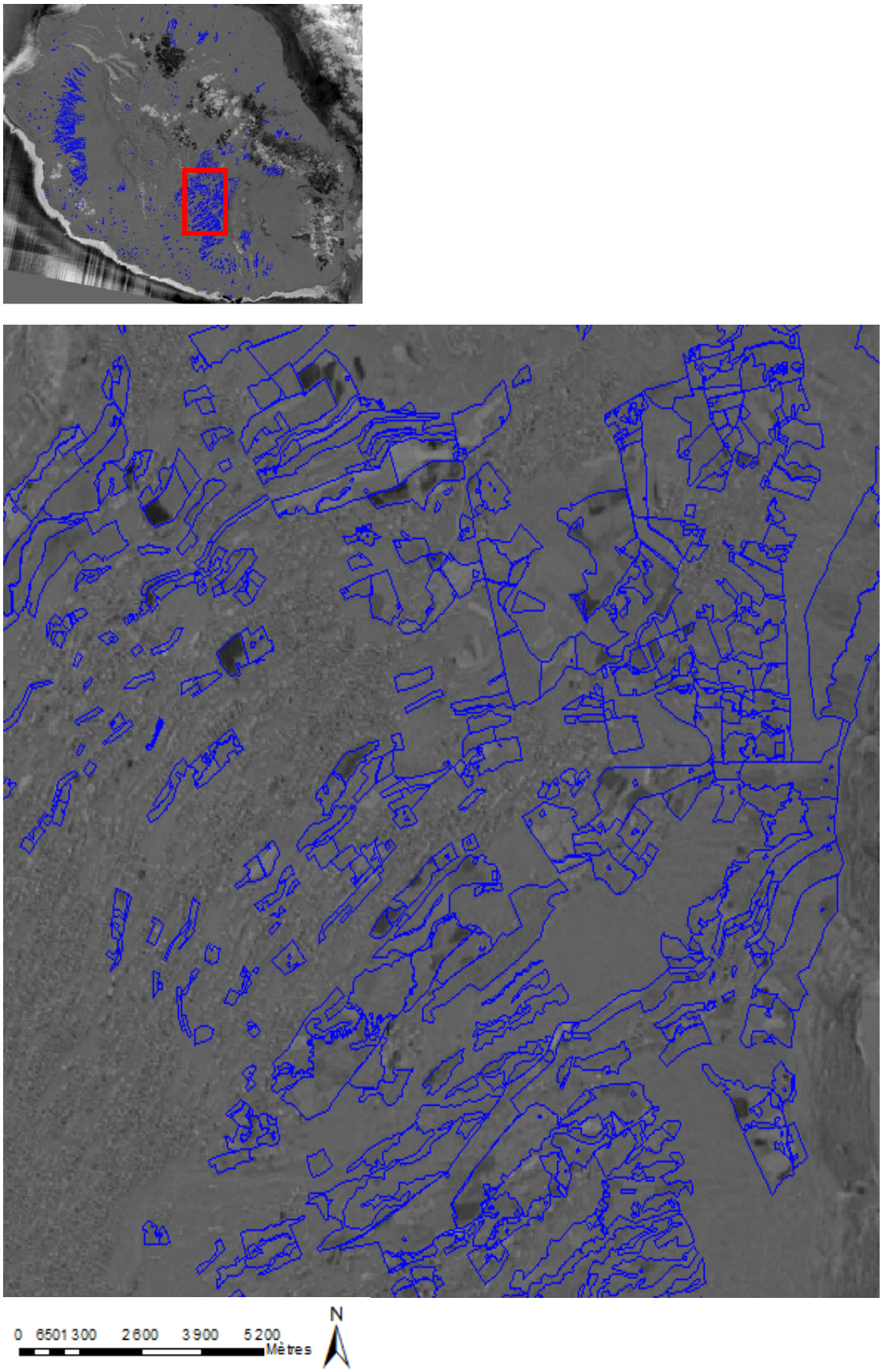


Figure 20c. Seuil de fauche appliqué au parcellaire de la D.A.A.F dans les Hauts de l'Ouest.

Cette méthode permet de localiser les parcelles de fauches ou de mettre à jour le parcellaire fonctionnel de l'élevage bovin en détectant les zones récemment coupées en dehors du parcellaire initial. Elle peut être appliquée à toutes les exploitations de l'île répertoriée sur le parcellaire **fonctionnel** de l'élevage bovin réunionnais. Seulement, dans l'exemple ci-dessus, elle ne concerne **que** les parcelles de fauches coupées entre le 30 mai et le 9 juin 2011. Le facteur limitant reste la nébulosité. Il faudra bien sûr valider le produit carte par des vérifications au champ. Afin de s'assurer sur le terrain que la parcelle est bien fauchée aux dates indiquées.

4.2. Prévision du rendement fourrager potentiel

Une première étape consistera à remplacer les valeurs de rendements fourragers simulés par un modèle de croissance par les valeurs de rendement fourrager estimées par l'intermédiaire des valeurs de NDVI médiane (c'est le forçage du modèle). Puis, finir par évaluer si les résultats du forçage apportent une amélioration au modèle en les comparants avec les valeurs réelles de rendements fourragers donnés par les éleveurs. S'il y a bien une amélioration significative apportée en forçant le modèle de croissance alors un rendu cartographique de prévision du rendement fourrager potentiel pourra être mis à disposition des différents acteurs. En attendant, les valeurs de NDVI médianes brutes permettent de comparer à une même date des parcelles entre elles, ou de faire un suivi temporel de la même parcelle :

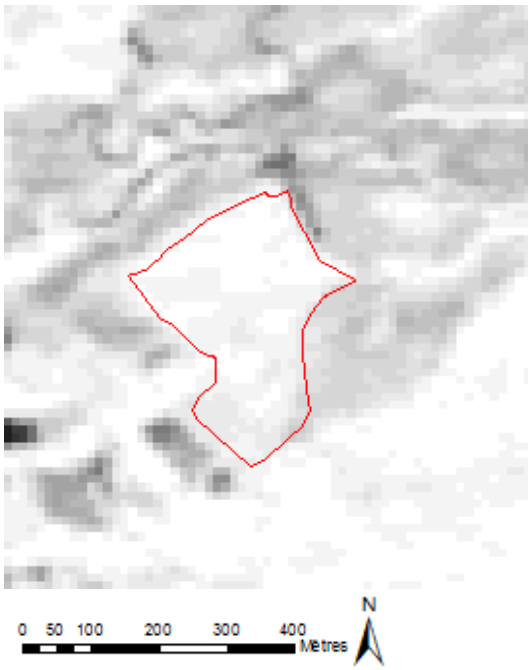
4.3. Suivi de l'état du couvert

4.3.1. Suivi intraparcellaire des fauches

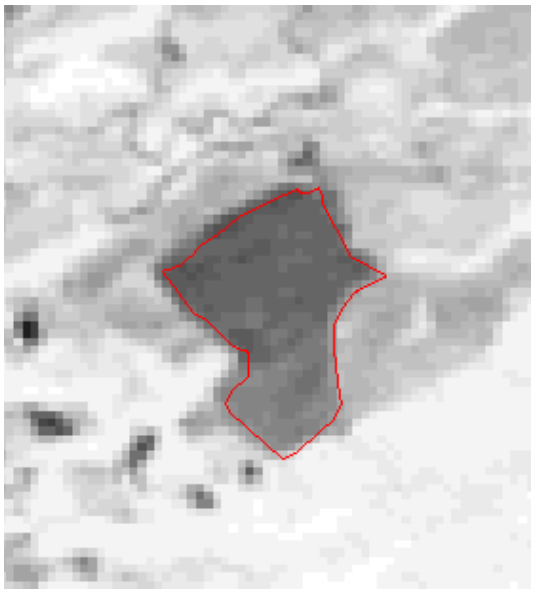
Cette information est utile à l'éleveur, qui pourra rectifier les effets d'un défaut ou excès de fertilisation ou de semi lors de sa prochaine campagne culturale. Elle peut permettre également de considérer les effets de la topographie d'une parcelle sur le développement du couvert végétal.

Remarque : Pour ce suivi, l'analyse d'image SPOT 5 à 2,5 m de résolution s'avère indispensable puisqu'elle permet une analyse plus fine à l'échelle de la parcelle (Projet « SUCRETTE », 2005 pour la canne à sucre).

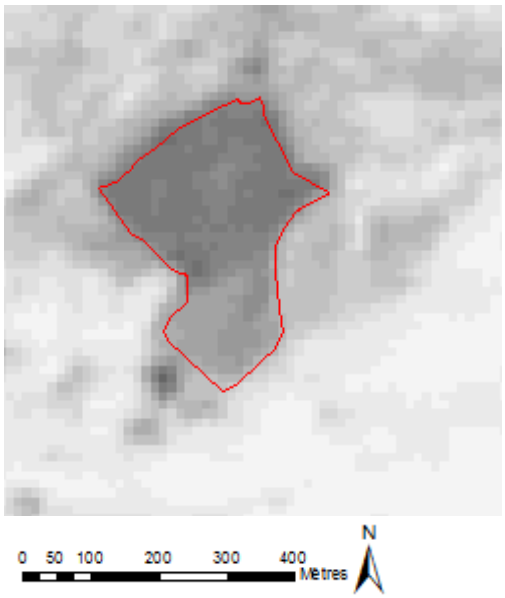
21 mai 2011



30 mai 2011



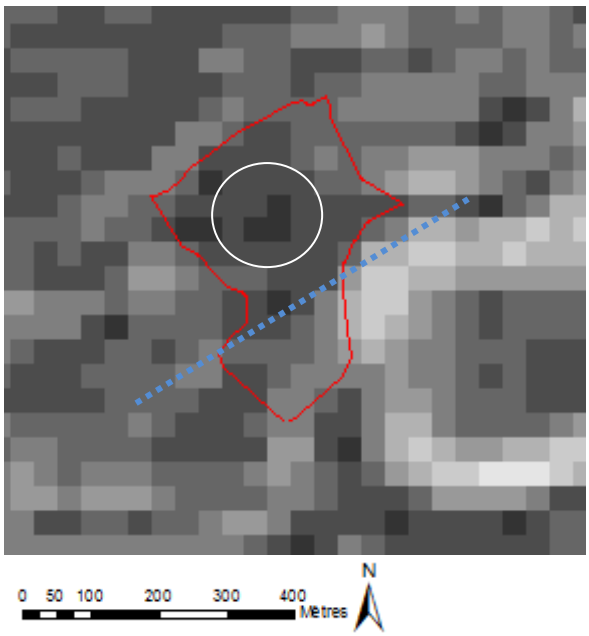
9 juin 2011



24 juin 2011

Figure 21. Suivi intraparcellaire par le NDVI de la fauche de Corré.

Le suivi multitemporel de la parcelle de fauche de Corré illustre les potentialités de ce mode de représentation. La classification du NDVI intraparcellaire permet de détecter les variations dans le développement du couvert végétal. Ces changements sont accentués sur les images qui suivent la fauche (la fauche de Corré à eu lieu le 27 mai 2011). Les valeurs de NDVI sont faibles et les écarts entre les valeurs minimum et maximum sont plus importants. Plus la date de l'image SPOT s'éloigne de la date de la fauche, plus les écarts de NDVI intraparcellaires deviennent minimes (palier de saturation du NDVI). Dans ce cas l'organisation spatiale des valeurs de NDVI intraparcellaire est liée directement à la topographie de la parcelle comme présentée ci-dessous pour la fauche de Corré :



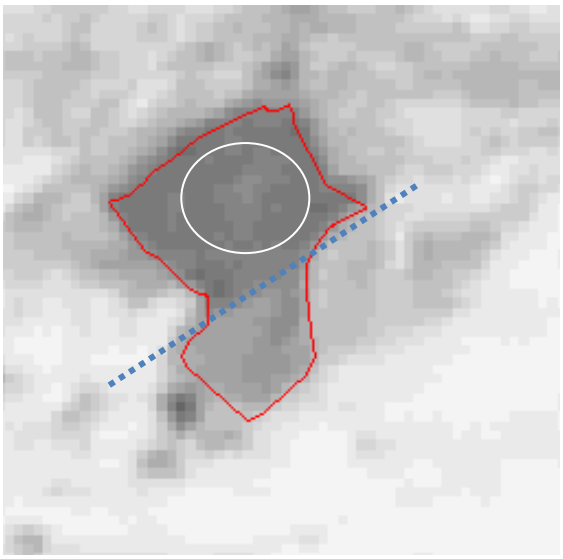


Figure 22a. Pentes calculées par le MNT 25 m. ***Figure 22b. Organisation spatiale du NDVI.***

Ces deux images de résolutions spatiales différentes (MNT 25 m, contre 10 m pour l'image SPOT 5 « indice NDVI ») permettent d'établir une corrélation entre les valeurs de NDVI et la pente. D'après la ***Figure 21a***, la moitié basse de la parcelle est relativement plane en opposition avec la moitié haute. Les valeurs de NDVI sont plus élevées dans la partie plane que sur la zone haute de la fauche. ***Figure 21b*** : Au sein de la partie haute de la parcelle, l'auréole plus claire (valeurs de NDVI plus élevées) est directement corrélée à l'existence de pentes fortes formant une « cuvette »sur la ***Figure 21a***. Les eaux de pluie ruissellent en partie haute et s'accumulent soit dans la cuvette soit en partie basse. Elles stagnent dans ces zones et permet au sol une meilleure absorption. Il en va de même pour la fertilisation qui sera lessivée par les premières pluies des zones pentues vers les zones planes, ou vers les «cuvettes

4.3.2. Variabilité interparcellaires

Une représentation cartographique de l'indice de végétation (NDVI) médian brut des parcelles indique un **niveau de rendement potentiel brut à un temps donné.** Cette information telle quelle ne peut servir que d'élément comparatif entre deux parcelles. Ainsi suivant les résultats, on peut comparer le **rendement potentiel brut** du couvert végétal entre deux parcelles de fauches ou de pâtures au sein d'une même exploitation, ou entre deux exploitations à condition qu'elles aient la même date de fauche. Cette information permet ainsi de comparer des conduites culturales. Et permets aussi de discriminer les fauches des pâtures :

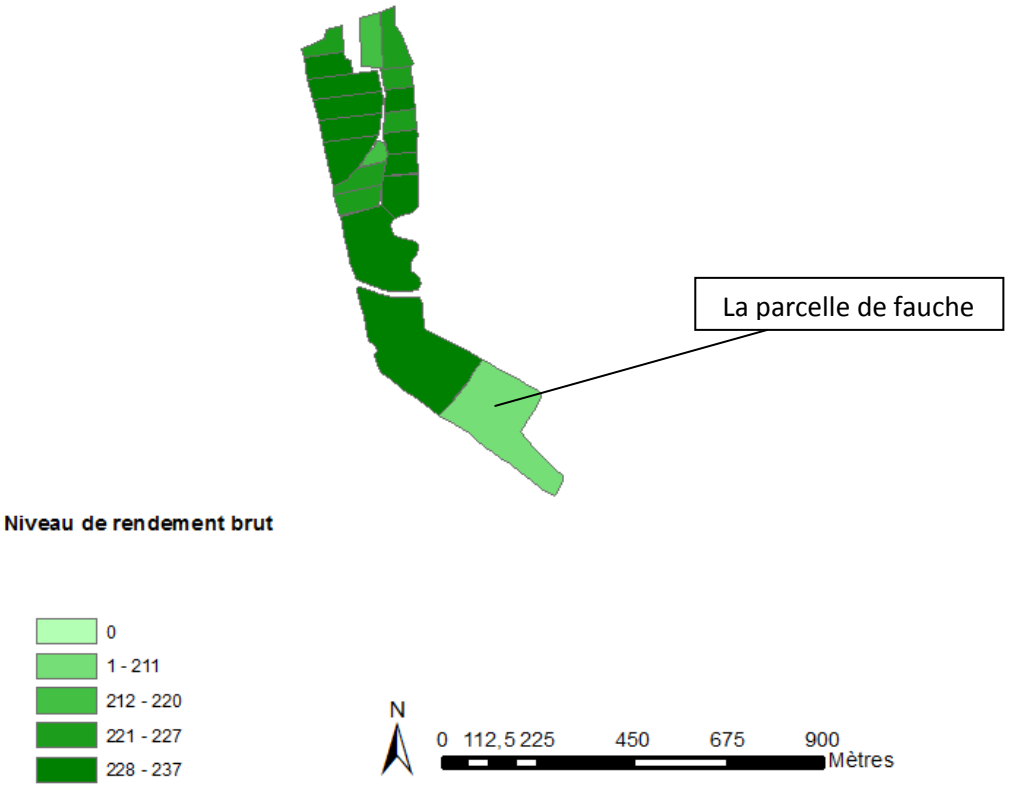


***Figure 23**. Variabilité du niveau de rendement potentiel brut calculé grâce au NDVI médian sur l'exploitation de Picard le 23 avril (fauchée le 21 avril).*

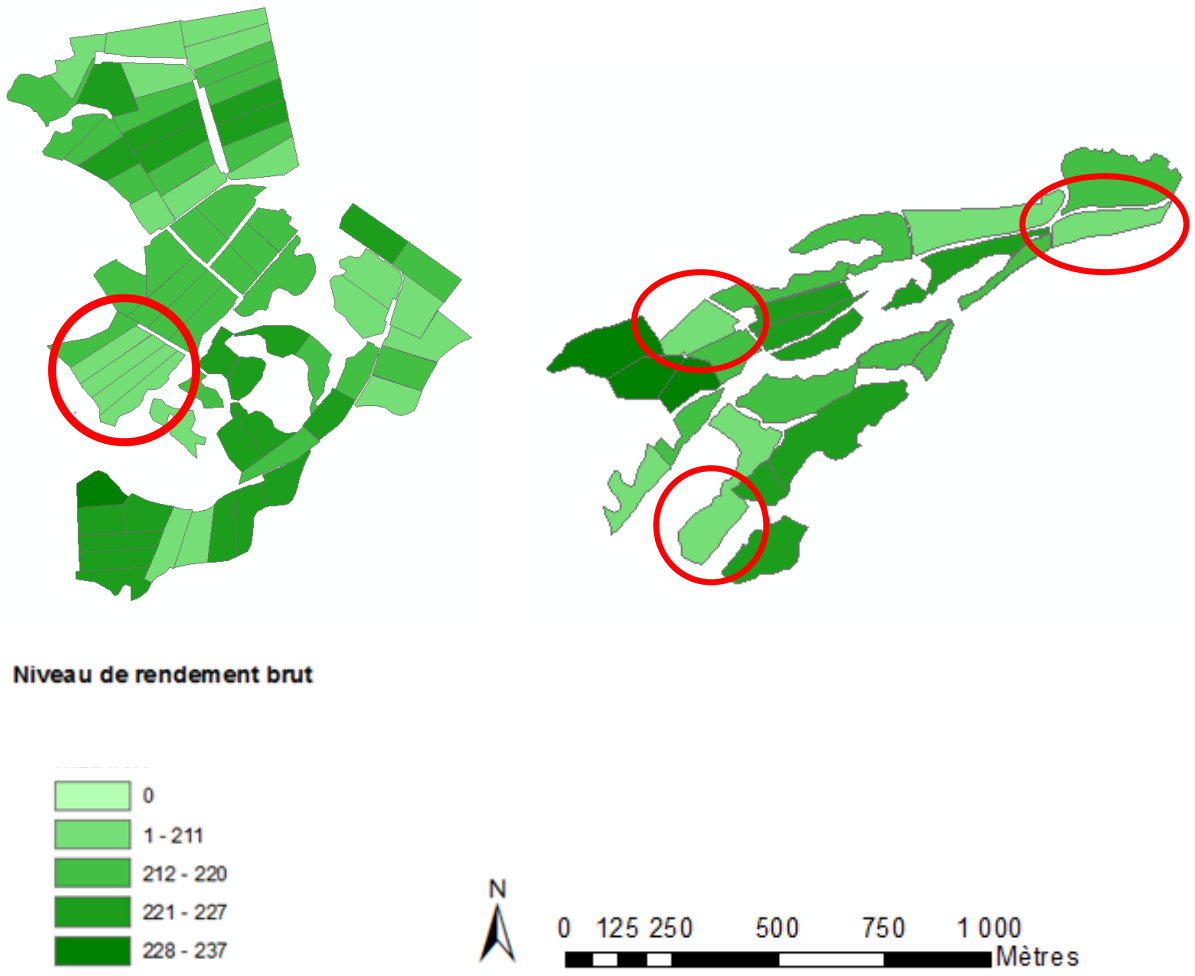


Figure 24a. Comparaison de la variabilité du niveau de niveau de rendement potentiel brut calculé grâce au NDVI médian entre les deux exploitations de la SICALAIT (gauche) et de la SEDAEL (droite) le 9 juin (fauchée le 6 juin).

Les parcelles de la SICALAIT et de la SEDAEL trois jours après la fauche ont sensiblement le même niveau de rendement potentiel brut.

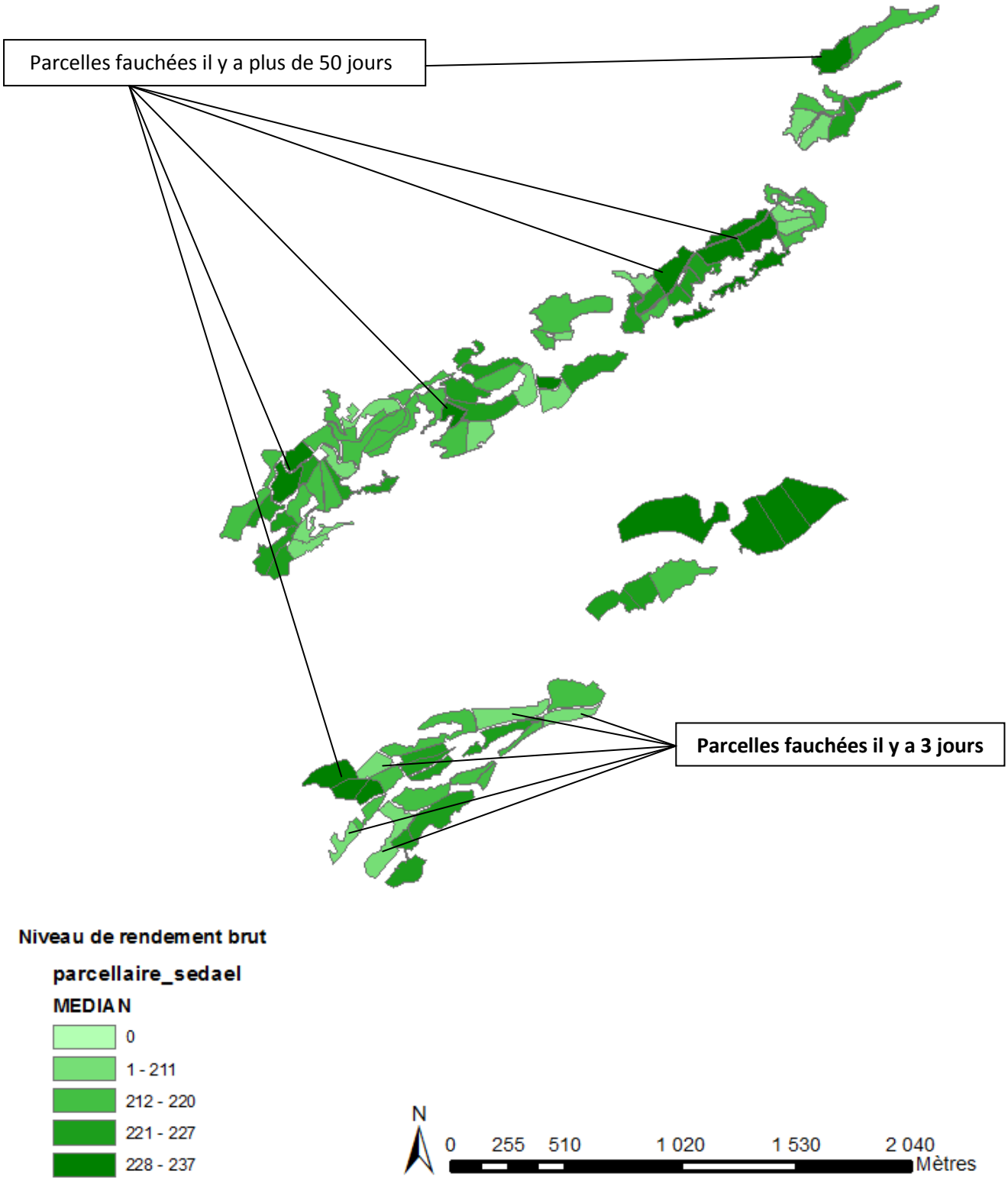


Figure 24b. Variabilité du niveau de rendement potentiel brut calculé grâce au NDVI médian sur l'exploitation de la SEDAEL le 9 juin (fauchée le 6 juin).

La grande difficulté dans le suivi des rendements fourragers des prairies d'élevage bovin réunionnais réside dans le fait que d'une exploitation à l'autre les événements de fauche n'interviennent pas au même moment. On ne peut pas parler de véritable « campagne » de fauche comme c'est le cas pour

la canne à sucre par exemple. Souvent il ya même plusieurs campagnes de fauches au sein d'une même exploitation (c'est le cas de l'exploitation de la SEDAEL). Ainsi à une date donnée à l'échelle de l'île, il est impossible de comparer le rendement potentiel entre exploitations.

4.4. Préconisations pour l'amélioration des résultats

Concernant l'estimation des paramètres biophysiques, il a été possible d'établir une relation entre le NDVI calculé à partir d'images SPOT 4 et 5 et le rendement fourrager au cours du cycle cultural. Il a pu être également établi une relation linéaire entre la hauteur d'herbe et la biomasse fraîche en mode multi temporel.

Afin d'affiner les résultats obtenus dans cette étude, il faut chercher à améliorer l'acquisition des données issues à la fois du terrain et celle issue l'imagerie satellite. Plusieurs préconisations peuvent être appliquées :

- Pour mettre en place une carte thématique prévisionnelle du rendement fourrager potentiel il faut avoir accès au parcellaire FONCTIONNEL de l'élevage bovin sur tout le territoire réunionnais. Cette information est en cours de réalisation par l'ARP.

- Les pâtures sont des parcelles de trop faibles surfaces pour être suivies avec des images de résolution spatiale de 10m. Il faut envisager d'organiser une campagne d'acquisition d'images 2,5 m SPOT 5. Ce changement de résolution permettra un suivi multi temporel de ces parcelles qui ont en moyenne une surface de moins d'un hectare. Le suivi multi-temporel intraparcellaire des pâtures est impossible avec du 10 m de résolution, mais deviendra envisageable avec du SPOT 5 à 2,5 m. De la même manière le MNT 25m de la Réunion donne des informations (pentes, orientation de la pente) trop grossières pour l'échelle d'une parcelle..

- L'utilisation du fourrage par ce mode d'exploitation (pâturé) est complexe et très variable d'une exploitation à l'autre, ce qui nécessite une excellente connaissance de l'organisation interne de l'exploitation (temps de retour du cheptel, nombre de bêtes…), du type de fourrage, et du mode de fertilisation pour espérer avoir des résultats significatifs. En ce qui concerne les mesures au champ, un suivi **HEBDOMADAIRE** des pâtures est plus judicieux étant donné que le temps de retour moyen du cheptel sur la même parcelle est de l'ordre de 30 jours. Il permettra trois passages sur la parcelle entre le départ et le retour des bêtes. Cette préconisation est possible seulement si initialement un dialogue s'établit avec l'éleveur.

- Les événements de fauches et la libération des parcelles de pâtures doivent être impérativement encadrés de près par des mesures terrains (une mesure avant/une mesure après) pour avoir accès aux données biophysiques minimums et maximums.

- L'herbomètre utilisé pour mesurer la hauteur de l'herbe arrive à saturation à une valeur égale à 53 cm. La croissance des graminées dans les prairies réunionnaises dépasse très souvent cette valeur (et atteints périodiquement plus d'un mètre de hauteur). Cet instrument est donc inadapté aux mesures réalisées.

- Il serait intéressant d'envisager l'organisation d'une campagne de mesures d'azote foliaire qui est l'indicateur de la richesse nutritive du fourrage frais (avec par exemple l'appareil SPAD-502 qui fournit une mesure du contenu en chlorophylle des feuilles qui a été utilisé dans des campagnes concernant la canne à sucre (cf. Projet « SUCRETTE »). Afin d'estimer s'il existe une corrélation entre les valeurs d'azote mesuré et celle calculée par un indice de végétation issue de l'imagerie satellite.

- La nébulosité reste le paramètre limitant de l'application. Cependant des solutions existent pour contourner ce problème : la construction de mosaïque qui rassemblent en une seule image les « dalles » des zones dégagées de plusieurs images SPOT acquises dans un laps de temps court (la revisite de trois jours des satellites SPOT le permet) ou bien, penser à l'acquisition d'images RADAR qui sont insensibles à la couverture nuageuse et qui apporterait une alternative intéressante.

CONCLUSION

Cette étude s'est appliquée à identifier les limites et les potentialités de la télédétection pour le suivi agronomique du parcellaire prairial pour l'élevage bovin réunionnais. Pour ce faire, l'efficacité des données multispectrales et multi temporelles SPOT 4 et 5 ont été testé au travers de l'utilisation de l'indice de végétation normalisé NDVI dans le but de caractériser la dynamique de l'état du couvert graminée, et afin d'estimer leur rendement fourrager.

La télédétection peut fournir des informations détaillées pour discriminer des cultures et caractériser l'état physiologique du couvert végétal. Le rendement fourrager doit être estimé en fonction de deux paramètres : la biomasse fraîche en termes de quantité brute (rendement) et sa qualité nutritive (matière sèche). Le suivi par télédétection des paramètres caractérisant la richesse nutritive du fourrage sec est relativement complexe à mettre en place. Ainsi, l'axe de l'étude s'est centré principalement sur la mise en place d'un modèle d'estimation du rendement fourrager frais.

Les résultats du suivi temporel multispectral SPOT 4 et 5 ont montré qu'il est possible d'estimer le rendement frais à partir de l'indice de végétation NDVI. La relation établie entre le NDVI calculé à partir des réflectances SPOT et les mesures de biomasses fraîches in situ, a été obtenue avec un coefficient de corrélation égale à 0.80 et une erreur inférieure au millième ($p = 6.04^{e}$ -13). Une corrélation tout aussi significative a été établie entre la hauteur d'herbe et la biomasse fraîche indiquant une augmentation couplée des deux paramètres. La matière sèche (caractérisant la richesse nutritive du fourrage) est également lié aux valeurs de rendement frais, mais avec un coefficient de corrélation moins élevé (-0.5 avec $p<0.0006$) permettant toutefois d'affirmer que plus le rendement est important plus le fourrage perd en qualité nutritive.

À long terme le but étant de mettre en place un modèle de croissance qui pourra intégrer les données issues du calcul de NDVI, afin de mettre en place des cartes prévisionnelles de rendements fourragers de la sole prairiale réunionnaise. Cette information pourra ainsi être accompagnée de conseils aux éleveurs sur les pratiques culturales :

- conseils de fertilisation et d'entretien du parcellaire
- d'optimisation du rendement en gérant les dates de fauches et les rotations du cheptel dans leurs pâtures.
- D'amélioration de la gestion des stocks fourragers estivaux afin de mieux gérer le déficit hivernal.

Le facteur limitant de cette application reste indéniablement la nébulosité, non négligeable à la Réunion. Néanmoins, la capacité de revisite des satellites SPOT étant de trois jours, le suivi des prairies d'élevage bovin peut devenir une application opérationnelle rapidement (une solution est de construire des mosaïques des zones dégagées de nuages à partir de plusieurs images SPOT, ou initier l'utilisation d'images RADAR non affectée par la couverture nuageuse).

Ces premiers résultats confirment le bien-fondé de l'utilisation de la télédétection multispectrale pour la mise au point d'outil d'aide à la gestion des prairies à la Réunion, et l'utilisation du suivi multi temporel est indéniable au vu de la complexité de l'organisation des systèmes prairiaux. Cette étude doit être approfondie notamment sur l'aspect qualitatif des fourrages (suivi de l'azote in situ et de la biomasse sèche). Les résultats de cette étude sont donc prometteurs.

GLOSSAIRE

ARP	Association Réunionnaise de Pastoralisme
CIRAD	Centre Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CRAAQ	Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec
D.A.A.F	Direction de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt
DOM	Département D'Outre-Mer
EARL	Exploitation Agricole à Responsabilité Limitée
FEOGA	Fonds Européen d'Orientation et de Garantie Agricole
GPS	Global Positioning System
HRVIR	Haute Résolution Visible et Infra Rouge
IGN	Institut Géographique National
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
ISLE_Réunion	Information Satellitaire pour L'Environnement de la Réunion
LACIE	Large Area Crop Inventory Experiment
LANDSAT MSS	LANDSAT Multi Spectral Scanner
LANDSAT TM	LANDSAT Thematic Mapper
MARS	Monitoring Agriculture with Remote Sensing
MIR	Moyen Infra Rouge
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MS	Matière sèche à la sortie de l'étuve
NDVI	Normalized Difference Végétation Index
PIR	Proche Infra Rouge
PROTEINS	Protéines brutes totale (% MS)
SAU	Surface Agricole Utile
SEDAEL	Société d'Exploitation de Développement et d'Amélioration de l'Elevage
SIG	Système d'Information Géographique

SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
UFL	Unité fourragère lait fourrage vert (l'énergie contenue dans le fourrage en UFL/kg MS)
Union des Afp	Union des Association foncière de Pastoralisme

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Saisonnalité de la production fourragère : l'exemple de la plaine des Cafres.

Figure 2 : Organisation de pâture en rotation : l'exemple d'un pâturage rationné.

Figure 3 : Schéma type de la croissance d'une prairie à dominance de graminées.

Figure 4 : Superposition du parcellaire de la D.A.A.F (en rouge hachuré) et du parcellaire fonctionnel (en vert hachuré)

Figure 5 : Carte de localisation des exploitations sur fond d'orthophoto 2008.

Figure 6 : Parcelle d'étude chez Corré sur fond d'orthophoto 2008 : Une fauche et une pâture.

Figure 7 : Localisation des points de mesures GPS pour la fauche de Corré sur fond d'image SPOT 5 « *indice NDVI* » du 21mai 2011.

Figure 8 : Exemples d'images SPOT 4 et 5

Figure 9 : Évolution temporelle de la biomasse fraîche (rendement) pour les fauches.

Figure 10 : Évolution temporelle de la biomasse fraîche (rendement) pour les pâtures.

Figure 11 : Évolution temporelle de la hauteur d'herbe pour les fauches.

Figure 12 : Évolution temporelle de la hauteur d'herbe pour les pâtures.

Figure 13 : Relation entre la hauteur d'herbe et la biomasse fraîche (rendement).

Figure 14 : Relation entre la matière sèche et la biomasse fraîche (rendement).

Figure 15 : Évolution temporelle du NDVI pour les fauches.

Figure 16 : Évolution temporelle du NDVI pour les pâtures.

Figure 17 : Relation entre la biomasse fraîche (rendement) et le NDVI.

Figure 18 : NDVI médian calculé pour la fauche de Corré avec l'image SPOT 5 du 21 mai 2011.

Figure 19 : NDVI médian calculé pour la fauche de Corré avec l'image SPOT 5 du 30 mai 2011.

Figure 20a : Exemple de seuil de fauche appliqué au parcellaire de Corré

Figure 20b : Seuil de fauche appliqué au parcellaire de la D.A.A.F de l'élevage bovin dans les Bas de l'Ouest de la Réunion.

Figure 20c. Seuil de fauche appliqué au parcellaire de la D.A.A.F de l'élevage bovin dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion.

Figure 21 : Suivi intraparcellaire par le NDVI de la fauche de Corré.

Figure 22a : Distribution spatiale des valeurs de pentes calculées par le MNT 25 m

Figure 22b : Distribution spatiale des valeurs de NDVI intraparcellaire de la fauche de Corré.

Figure 23 : Variabilité du niveau de rendement potentiel brut calculé grâce au NDVI médian, sur l'exploitation de Picard le 23 avril (fauchée le 21 avril).

Figure 24a : Comparaison de la variabilité du niveau de rendement potentiel brut calculé grâce au NDVI médian entre les deux exploitations de la SICALAIT et de la SEDAEL le 9 juin (fauchées le 6 juin).

Figure 24b. Variabilité du niveau de rendement potentiel brut calculé grâce au NDVI médian, sur l'exploitation de la SEDAEL le 9 juin (fauchée le 6 juin).

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Extrait de la table « ***Propriétaires*** » de la base de données « ÉTUDE PRAIRIES RÉUNION ».

Tableau 2 : Extrait de la table « ***Parcelles d'étude*** » de la base de données « ÉTUDE PRAIRIES RÉUNION ».

Tableau 3 : Extrait de la table « ***Points échantillons*** » de la base de données « ÉTUDE PRAIRIES RÉUNION » pour la fauche de Corré au 18mai 2011.

Tableau 4 : Extrait de la table « ***Données-terrain*** » de la base de données « ETUDE PRAIRIES RÉUNION » pour les parcelles de Corré.

Tableau 5 : Caractéristiques des images SPOT 4 et 5 utilisées.

Tableau 6 : Extrait de la table « ***NDVI par parcelle*** » de la base de données « ÉTUDE PRAIRIES RÉUNION » pour Corré.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aase J.K & Siddoway F.H., 1981. Spring Wheat Yield Estimates from Spectral Reflectance Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-19, No. 2, pp. 78-84.

Barbet-Massin V., Grimaud P., Michon A. & Thomas P., 2006. Guide technique pour la création, la gestion et la valorisation des prairies à la Réunion, Union des Associations Foncières Pastorales, CIRAD-Pôle Elevage,

Baret F. & Guyot G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment.*Remote Sensing of Environnement*, 35, pp.161-173.

Baret F., 1999. Potentiels de la télédétection pour l'agriculture de précision, in L'enjeu français de l'agriculture de précision. *Salon International du Machinisme Agricole*, 3 mars 1999, INRA, Paris, pp. 8-11.

Bastiaanssen W.G.M, Molden D. J & Makin I.W, 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research of possible applications. Agricultural Water Mangement, 46 (2) pp.137-155.

Bégué A., Todoroff P., Degenne P., Baillarin F., & Pellegrino A., 2004. Application of remote sensing technology to monitor sugar cane cutting and planting in Guadeloupe (French West Indies), GEOMATICA, Havane (Cuba).

Bégué A., Degenne P., Baillarin F., Lemonnier H. & Gargaros D., 2005. Pré-rapport final du projet SUCRETTE (Suivi de la Canne à suCRe par TélédéTEction). Cirad-Spot Image, Montpellier, p.92

Bowman W.D., 1990. The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves. *Remote Sensing Environment* 31 pp. 249-255.

Calvière L., 1994. Effets de la nutrition minérale et de la composition botanique sur la croissance de prairies permanentes au printemps : conséquences pour la prévision et le diagnostic de la biomasse récoltable et de sa qualité. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique, Toulouse, France, p. 102.

Campbell, J.B., 1987. Introduction to Remote Sensing**.** The Guilford Press, New York.

Chaerle L. & Straten D.V.D, 2000. Imaging techniques and the early detection of plant stress. *Trends in plant science 5* (11) : 495-501.

Chopart J. L ., Mézino M. & Le Mezo L., 2002. Relation entre l'altitude et la température mensuelle de l'air dans l'Ouest de la Réunion. CIRAD-Ca, La Réunion.

Conseil Régional, 1976. Programme d'action prioritaire d'initiative régionale. SAINT Denis, Réunion, Conseil Régional, p. 95.

CRAAQ, 2003. La géomatique appliquée à l'agriculture de précision, Publication Vu 067.

Dugmore T.J., Du Toit P.V. &Morning S.J., 1996. Dietary selection by steers grazing kikuyu. *South African Journal of Animal Science*, 21 pp. 194-196.

Duru M. & Bossuet L., 1992. Gestion du pâturage tournant, I. Bases écophysiologiques. *L'extensification en production fourragère*, N° hors-série *Fourrages*, pp. 122-123.

Everingham Y.L., Inman-Bamber N.G., Thorburn P.J. & McNeil T.J., 2005. A Bayesian modeling approach for long sugarcane yield forecasts for the Australian sugar industry. *Australian Journal of Agricultural Research* 58 pp. 87-94.

Gilibert J., 1981. Productions fourragère en plein champ à la Réunion : qualités et quantités. Saint-Denis, Réunion, Chambre d'agriculture, p 147.

Girard M.C.& Girard C.M., 1989. Télédétection appliquée – Zones tempérées et intertropicales. Masson, Paris, pp. 22-29 ; 139-191.

Goel N.S. & Thompson R.L., 1984. Inversion of vegetation canopy reflectance models for estimating agronomic variables. V. Estimation of leaf area index and average leaf angle using measured canopy reflectances*. Remote Sensing of Environment*, 16, pp. 69-85.

Goel N.S. & Grier T., 1987. Estimation of canopy parameters of row planted vegetation canopies using reflectance data for only four view directions. *RemoteSensing of Environment*, 21, pp. 37-51.

Grimaud P. & Thomas P., 2002. Diversité des rations à base de graminées et gestion des prairies en élevage bovin sur l'île de la Réunion, *Fourrages*, 169, pp. 65-78.

Haboudane D., Miller J.R., Tremblay N., Zarco-Tejada P.J. & Dextraze L., 2002. Integratednarrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *RemoteSensing of Environment*, 81, pp. 416-426.

Ivory P.A., & Whiteman P.C., 1978. *Australian Journal of Plant Physiology* 5 pp. 131-149.

Jackson R.D., Slater P.N. & Pinter P.J., 2003. Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmosphere. *Remote Sensing Environment* 13 pp.187-208.

Jonhson I.R., & Thornley , T.H.M. , 1985. Temperature dependence of plant and crop processes. *Annals of Botany* 55 pp.1-24.

Jensen J.R., 2000. Remote sensing of the Environment and Earth Ressources Perspective. Prentice Hall, Saddle River, N.J, pp.544.

Jauze J.M., 1998. Les centralités emboîtées de l'espace réunionnais. *Mappemonde*, 3 pp 27-30.

Kleman J. & Fagerlund E., 1987. Influence of different nitrogen and irriguation treatments on spectral refelctance of barley. *Remote Sensing Environment* 21 pp. 1-14.

Le Petit J. & Paillat J.M., 1992. Mécanisation des exploitations d'élevage : motorisation adptée aux fortes pentes. In : Rapport annuelCeemat 1989. Saint-Denis, Réunion, Ceemat, p.63-79.

Maas S. J., 1988. Using satellite data to improve model estimates of crop yield.*AgronomyJournal,*80, 665-662.

Mandret G., 1992. Élevage et insularité dans l'océan Indien : notion de capacité de charge. In : Capacité de charge des milieux insulaires. *Insula*, n° spécial : 13-18.

Mandret G., Blanfort V., HassounP., Paillat J.M. & Tillard E., 2000. L'élevage bovin à la Réunion : synthèse de quinze ans de recherche, Collection Repères, Montpellier, CIRAD, INRA., Region-Réunion, CAH, île de la Réunion.

Martiné J.F., 2003. Modélisation de la production potentielle de la canne à sucre en zone tropicale, sous conditions thermiques et hydriques contrastées-Application du modèle. *Thèse pour le grade de Docteur de l'Institut National d'Agronomie de Paris-Grignon*, INAPG.

Michelon R., & Rassaby A., 1985 b. Comportement des différentes graminées fourragères dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion.Saint-Denis, Réunion, Irat , fiche n° 23, p.6.

Michelon R. & Techer P., 1996. Le kikuyu, plante fourragère et de couverture. Saint-Denis, Réunion, CIRAD-CA, p.20.

Moran M. S., Clarke T.R., Inoue Y. & Vidal A., 1994. Estimatingcrop water deficitusing the relation between surface-air temperatureand spectral vegetation index.*Remote sensing of environment* 49 (3) : 246-263.

Moran M.S., Vidal A., Troufleau D., Inoue Y., Qi J., Clarke T.R., Pinter P.J., Mitchell T. & Neale C.M.U., 1997. Comaining multi-frequency microwave and optical data for farm management. *Remote Sensing Environment* 61 pp.96-109.

Noonan M., 1999. Classification of fallow and yields using LANDSAT TM data in the sugarcane lands of the Herbert River catchment. Herbert Ressource Information Centre. 4850.

Pinter P.J., Hatfield J.L., Schepers J.S., Barnes E.M., Moran M.S., Daughtry C.S.T., Upchurch D.R., 203. Remote Sensing for crop management. *Photogram.Engin & Remote Sensing Environement* 69 pp.647-664.

Qi J., Huete A.R., Moran M.S., ChehbouniA. & Jackson R.D., 1993. Interpretation of vegetation indices derived from multi-temporal SPOT images. *Remote Sensing of Environment*, 44, pp. 89-101.

Rasmussen M.S., 1998. Developing simple, operational,consistent NDVI-vegetation modelsby applying environmental and climatic information : Part II : Crop yield assessment. *Int. J. RemoteSensing*, 19(1), pp. 119-139.

Rebischung, J., 1962. Études sur la croissance et le développement du Dactyle. *Ann. Amélior.Plantes*, 12, 3, 175-196.

Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. & Harlan J.C., 1974. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS In: Proceedings of the Third Earth Ressources Technology Satellite-1, Greenbelt : NASA SP-351, pp.301-317.

Theau, J.P., Coléno, F.C., Duru, M. &Rauzy, Y., 1998. L'utilisation de l'herbe pâturée et fauchée en référence au potentiel de production des prairies, *Fourrages*, 156, 589-601.

Theau J.P. & Zerourou A., 2008, Herb' âge, une méthode de calcul des sommes de températures pour la gestion des prairies, *Les cahiers d'Orphée,* pp. 91-102.

Tucker J.P., KimesD., Markham B. & McMrtney III J.E., 1981. Temporal relationshipsbetween spectral response and agronomic variables of a corn canopy.*Remote Sensing of Environment*. Vol 11, pp. 401-411.

Tucker J.P., C.T., Elgin Jr J.H., & McMrtney III J.E., 1979. Monitoring Corn and Soybean Crop Development with Hand-held Radiometer Spectral Data*. Remote Sensing of Environment*, Vol. 8, pp. 237-248.

Tucker, C.T., Elgin Jr J.H., &McMrtney III J.E., 1979a.Temporal spectral measurements of corn and soybean crops.*Photogrammmetric Engineering and Remote Sensing.*Vol 45, pp. 643-653.

Viau A.A., 2000a. Agriculture de précision et géomatique agricole : vers une définition. 1er colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision. St-Hyacinthe, Qc 23 et 24 mars 2000.

Zarco P.J., 1999. Optical indices as bioindicators of forest sustainability. *Graduate ProgrammeIn Earth And Space Science. Research Evaluation Course (REC)*, 10 mai 1999, York University, Toronto, Canada.

ANNEXES

Annexe 1 : La Réunion

Annexe 2 : Aide à la création ou l'entretien des prairies dans les Hauts

Annexe 3 : Phénologie et conduite culturale des prairies dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion.

Annexe 4 : Bases de la télédétection

Annexes 5 : Parcelles d'études

Annexe 6 : Fiches techniques

Annexe 7 : Couche GPS

Annexe 8 : Mesures terrains/Calculs images

Annexe 9 : Caractéristiques des capteurs embarqués sur SPOT 4 et 5

Annexe 10 : Prétraitements des parcelles avant calcul NDVI

Annexe 11 : Somme des degrés/jours accumulés

Annexe 12 : Statistiques

Annexe 13 : Histogrammes de la distribution des pixels entre une image SPOT 4 en mode « *continuous* » (vraies valeurs) et en mode « *thematic* » (valeur ré-échantillonnées).

Annexe 1 : La Réunion

1) Localisation

La Réunion est un département français d'Outre-mer (DOM) situé dans le Sud-ouest de l'Océan Indien. C'est une île d'origine volcanique comprise dans l'archipel des Mascareignes, à 800 km à l'est de Madagascar. À 55°30' de longitude Est et 21°05' de latitude Sud, elle a une forme ovoïde et un relief très accidenté. Avec deux massifs volcaniques dont l'un (le piton des Neiges) culmine à 3069m, la Réunion se présente comme une montagne au milieu de l'océan. (*Images Google Earth*).

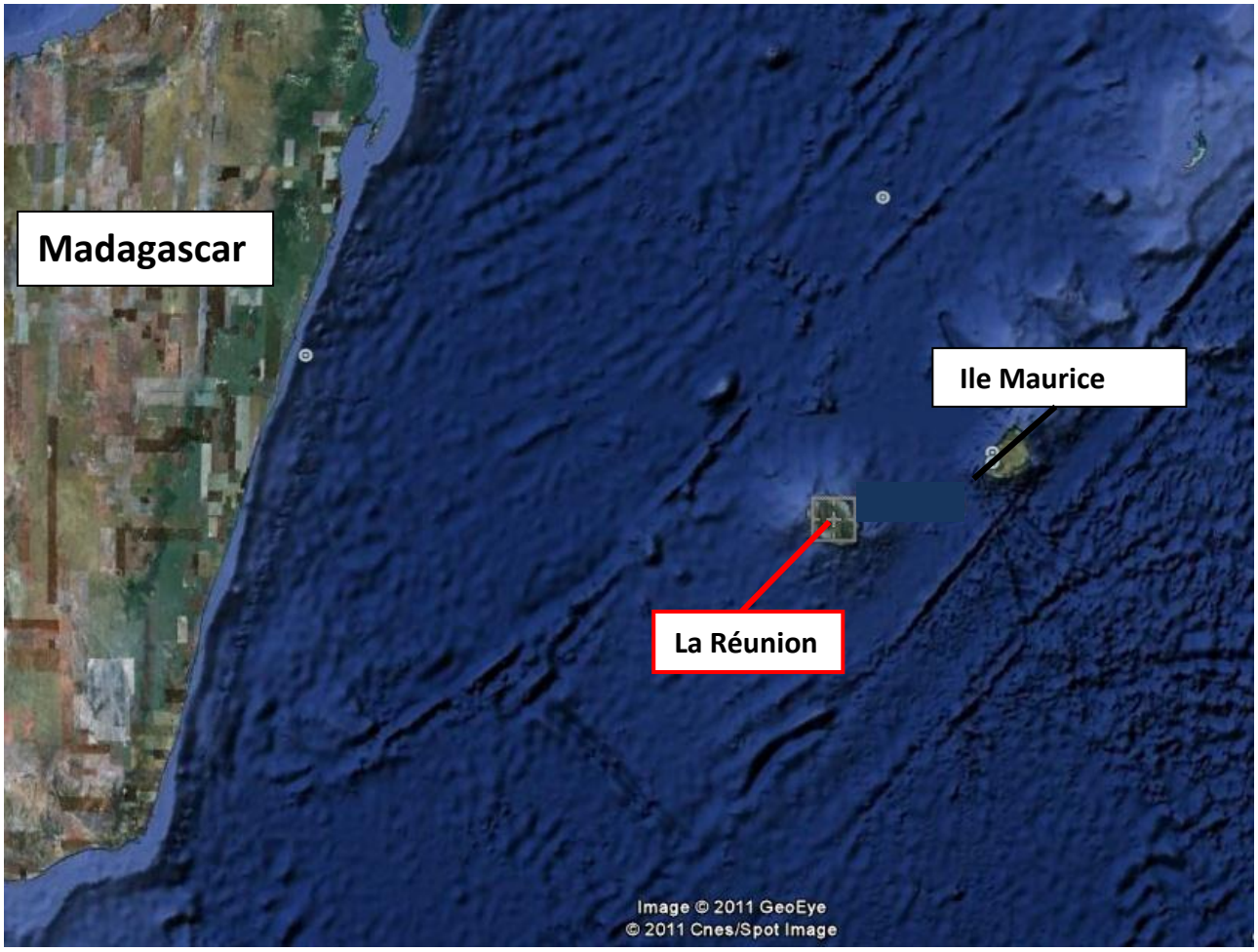


Figure 1. Localisation de la Réunion.

2) Densité de population

De par son relief très marqué et ses caractéristiques insulaires (colonisation par la mer) la majorité de la population s'installe sur la bande littorale, peu à peu l'expansion urbaine gagne sur les terres en altitudes et s'étendent sur les planèzes.

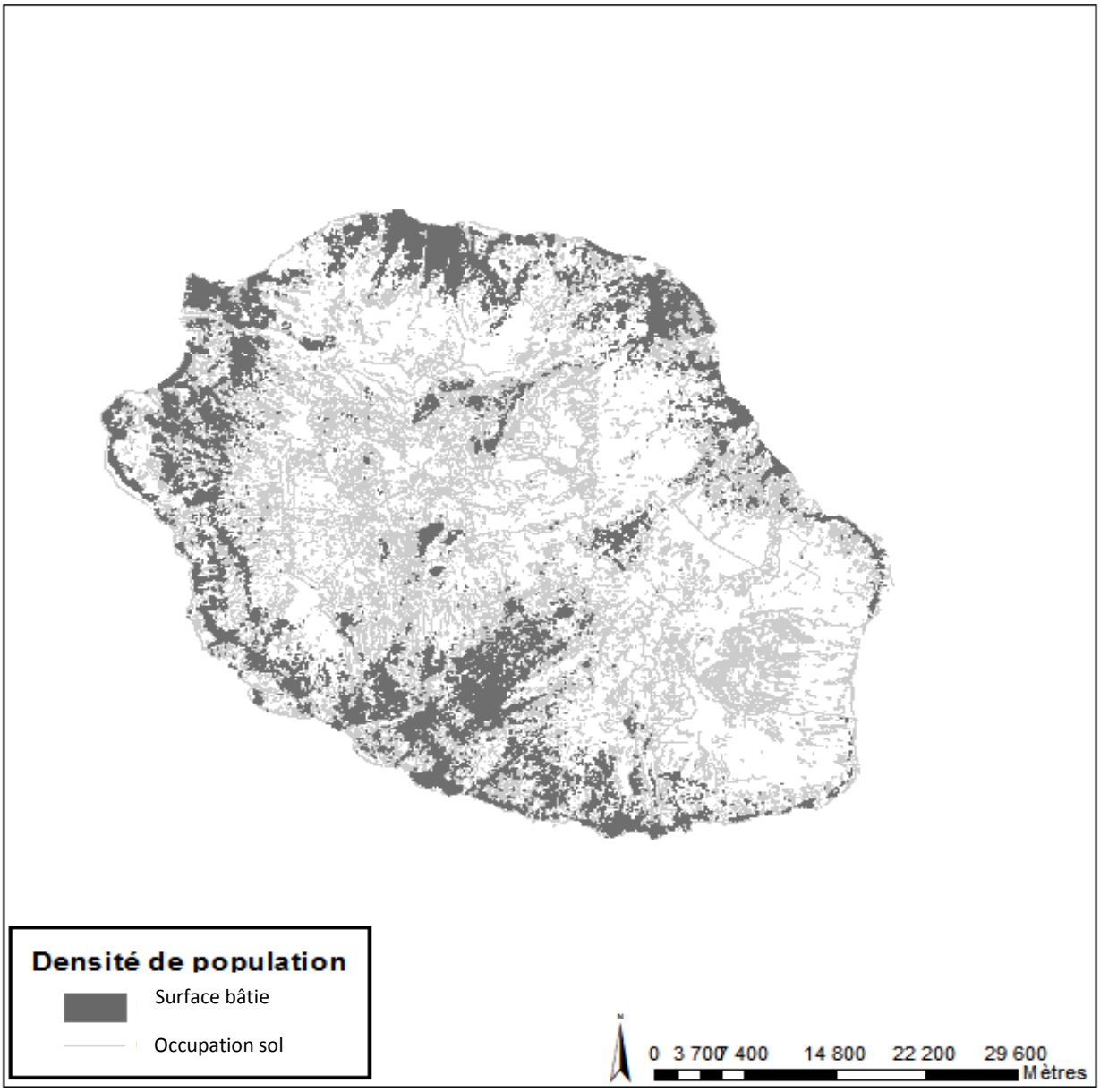


Figure 2. Répartition de la population à la Réunion.

3) Le climat

Il est de type tropical humide. On distingue deux saisons :

- L'été (de novembre à avril) durant lequel les températures sont plus élevées, l'humidité plus forte et les précipitations beaucoup plus importantes, et où peut se former des dépressions tropicales. C'est la « saison chaude ».
- L'hiver (de mai à octobre) c'est la saison dite « fraîche ». Les températures sont plus douces et les précipitations moins abondantes (même si elles restent importantes dans l'est).

Le climat réunionnais se caractérise par une grande disparité en termes de précipitations entre l'est et l'ouest. Ainsi la côte Ouest (ou se déroule notre étude) est appelée « la côte sous le vent » en opposition à l'Est dite « au vent ».

La décroissance des températures avec l'altitude est un phénomène relativement important à la Réunion. Le gradient de température est de -0.75 °C pour 100 m (Chopart *et al.,* 2002) Le relief étant abrupt les lignes isothermes sont souvent confondues avec les lignes de niveau.

Annexe 2 : Aide à la création ou l'entretien des prairies dans les Hauts

Les aides sont versées par la RÉGION-RÉUNION et ne concerne que les parcellaires situés au-dessus de 800 m d'altitude. Un préfinancement de l'intervention FEOGA est fait par la RÉGION ; il représente 60 % du montant del' aide versée aux éleveurs. Les 40 % restants proviennent des fonds propres de la RÉGION. L'engagement des aides AFP est officialisé annuellement par une convention.

- Un dossier de demande de subvention est rempli par l'éleveur adhérent au siège des AFP.

- La réalisation des travaux et/ou des équipements par l'éleveur se fait conformément au cahier des charges AFP.

- Un contrôle des travaux est fait par une commission technique *ad hoc* (Union des AFP, D.A.A.F)qui établit un procès-verbal de réception.

- L'AFP transmet le dossier de demande de subventions de l'éleveur à la D.A.A.F pour visa et contrôle.

- La D.A.A.F transmet à la RÉGION un certificat administratif pour paiement des subventions demandées pour les éleveurs contrôlés.

- La RÉGION verse à l'AFP les subventions accordées.

- L'AFP paie à l'éleveur sa subvention.

Annexe 3 : Phénologie et conduite culturale des prairies dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion

(Photographies et schémas tirés du « Guide technique pour la création, la valorisation et la gestion des prairies à la Réunion » de Barbet Massin *et al*., 2006).

1) **Les espèces fourragères dominantes dans les Hauts de l'Ouest de la Réunion** (Michelon *et al.* 1985)

- **Le Dactyle (*Dactylis glomerata*)**

C'est une graminée vivace de grande taille formant des touffes d'un vert bleuâtre. Se tiges et feuilles sont aplaties. Il résiste bien à la sécheresse grâce à un système racinaire développé. Le dactyle tend à remplacer le kikuyu dans les pâturages des Hauts de l'Ouest, en effet en altitude et en hiver le kikuyu voit sa production chuter de façon importante (Gilibert *et al.*, 1981). Cette graminée résiste bien au pâturage et est bien appétée par les animaux. Son exploitation en fauche est aisée qui répond bien à la fertilisation azotée et s'adapte à différents types de sol. Elle est cultivée à partir de 800 m d'altitude seule ou en association avec d'autres graminées. Dose de semis : 30 kg/ha en pure et 20kg/ha en association.

- **Le Kikuyu (*Pennisetum clandestinum*)**

C'est une graminée pérenne tropicale originaire des hauts plateaux du Kenya. Il a un port rampant avec des stolons qui présentent de nombreux nœuds pouvant s'enraciner formant un gazon épais et très couvrant, ce qui rend la fauche et la récolte difficile. (Lepetit et Paillat, 1992). Le Kikuyu est très largement répandu entre, 600 et 1600 m d'altitude surtout dans les Hauts de l'Ouest. Très agressif, il possède une résistance exceptionnelle au piétinement ainsi qu'au surpâturage ou il constitue l'essentiel des pâturages. Au-delà de 1600m il ne résiste pas aux basses températures hivernales et se caractérise par un arrêt végétatif en « saison fraîche ». C'est une herbe bien appétée par

les animaux, mais c'est un fourrage qui demande à être pâturé jeune (30 jours) quelle que soit la saison. Sa mise en place se fait par bouturage (Michelon *et al.,* 1996).

- **Le Chloris (*Chloris gayana*)**

Le Chloris est une graminée tropicale pérenne (resemis naturel) de grande taille poussant en touffes ces tiges vert clair mesurent environ 60 cm de haut. De chaque touffe parte des stolons qui s'enracinent à leur tour pour former de nouvelles touffes. Le Chloris donne d'excellents résultats de productivité jusqu'à 800mètres d'altitude (Gilibert, 1981). Dans les Hauts il est principalement utilisé et récolté pour la production de foin pour l'alimentation des bovins, mais aussi plus récemment pour la constitution de stocks fourragers (ensilage). Dose de semis : 20kg/ha.

1) Conduite culturale

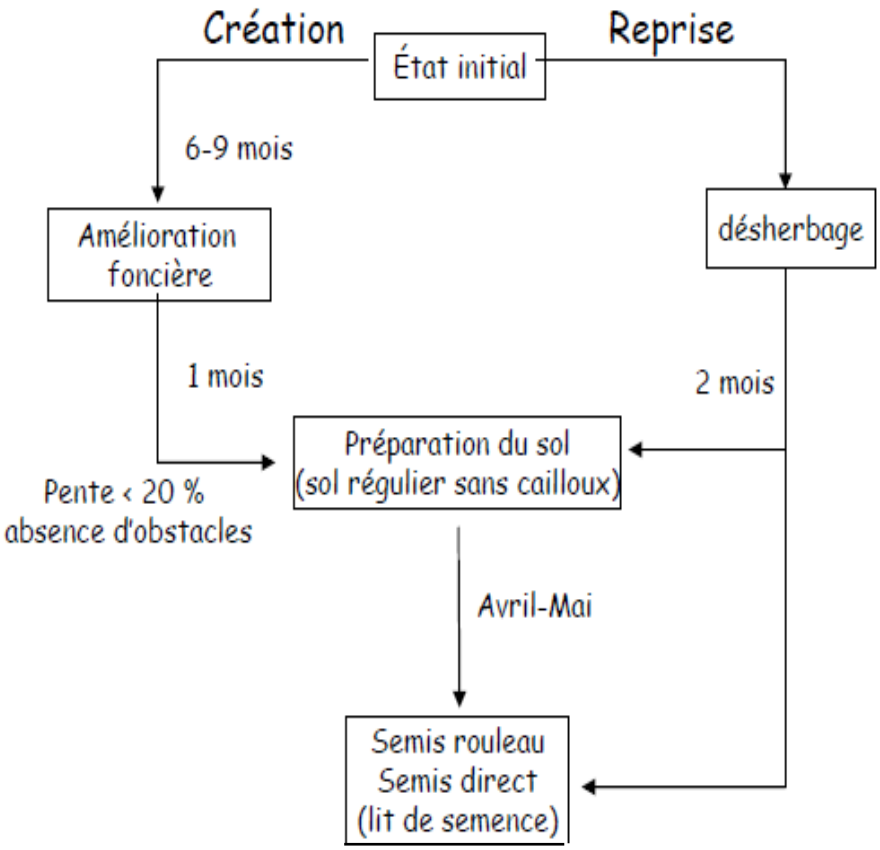
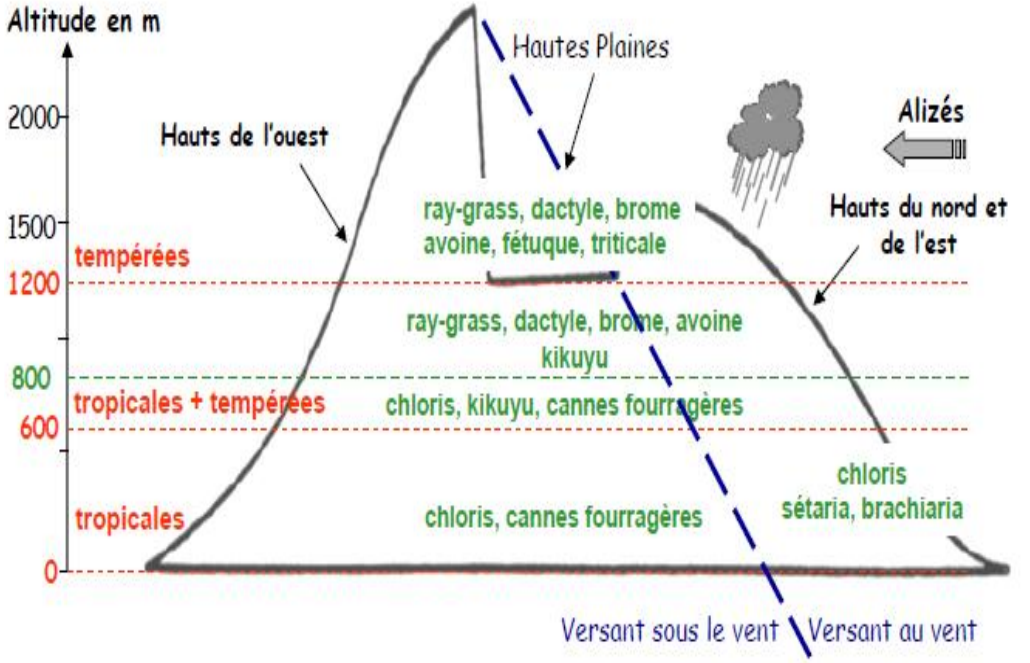


Figure 1. Création d'une prairie.

Pour choisir les plantes fourragères à cultiver, l'éleveur ou le technicien se pose les mêmes questions :

- ✓ Quelles sont les conditions du milieu ?
- ✓ Quel est l'objectif de la culture fourragère ?

Les conditions du milieu sont déterminantes pour la réussite de la mise en place et de la culture de la prairie. On doit ainsi tenir compte du climat (altitude/température/pluviométrie) :



Chloris Kikuyu Dactyle

Figure 2. Répartition des graminées par altitude.

Le choix des différentes formes d'utilisation du parcellaire dépend dons du climat, mais aussi des caractéristiques physiques du foncier, de l'espèce animale et du type de production. Il est possible de combiner sur une même parcelle pâturage et récolte mécanique : exploitation mixte favorisant la régulation des stocks. Ainsi une prairie fauchée l'été peut être pâturée l'hiver.

Pâture Fauche

Figure 3. Les différents modes de culture de l'herbe.

Les caractéristiques physiques du foncier orientent et peuvent même limiter le choix du mode de culture. En effet toutes les parcelles ne sont pas mécanisables :

<table>
<tr><th></th><th>forte pente</th><th>forte pierrosité</th><th>faible portance</th><th>forme irrégulière</th><th>grandes parcelles</th><th>bonne portance</th><th>faible pierrosité</th><th>terrain plat</th></tr>
<tr><td>fauche
mixte (pâture/fauche)</td><td colspan="4">impossible</td><td colspan="4" rowspan="2">au choix</td></tr>
<tr><td>pâture</td><td colspan="4">seule possibilité</td></tr>
</table>

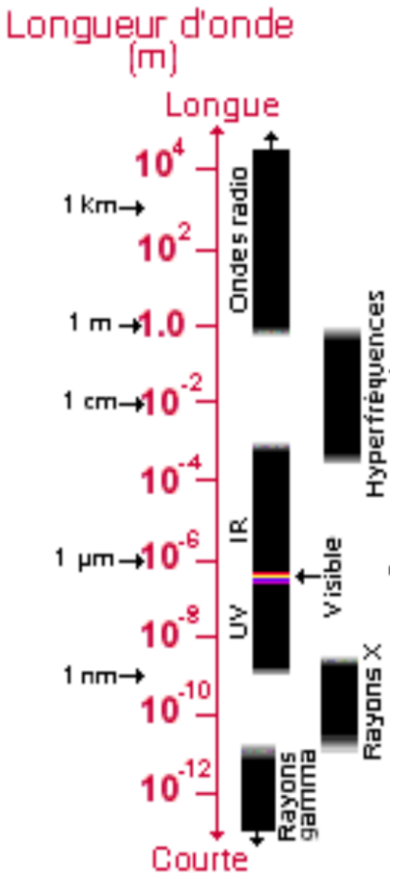
Figure 4. Le foncier oriente le choix du mode de culture de l'herbe.

La récolte mécanique pour le stockage du fourrage permet l'exploitation des parcelles éloignées et inaccessibles aux animaux.

Annexe 4 : Bases de la télédétection

1) Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique s'étend des courtes longueurs d'ondes (rayons X par exemple) aux grandes longueurs d'ondes (micro-ondes et ondes-radio) (Dictionnaire Larousse).



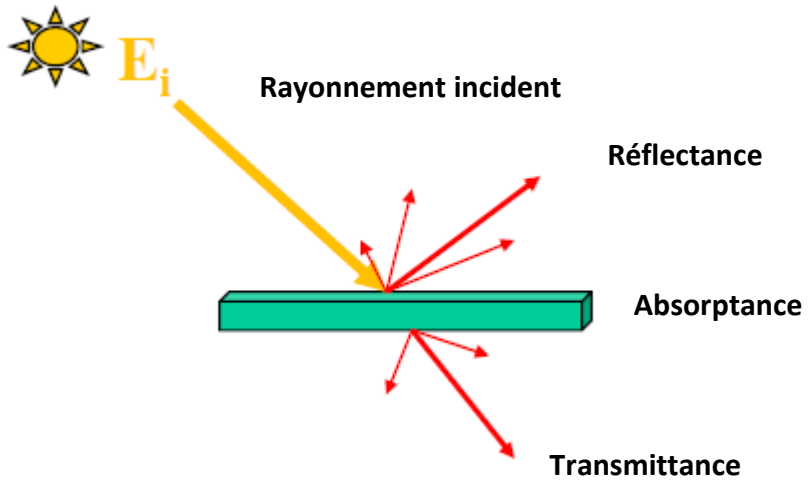
Les grands domaines spectraux qui nous intéressent dans notre étude des systèmes prairiaux sont :

- Le visible (400 – 700 nm)
- Le proche infrarouge (700 – 1300 nm)

Dans ces domaines, le soleil constitue la source de rayonnement électromagnétique et les récepteurs de télédétection (capteurs satellites SPOT 4 & 5) enregistrent l'énergie solaire réfléchie par les objets de la surface terrestre (le système herbager).

2) Principe de réflectance

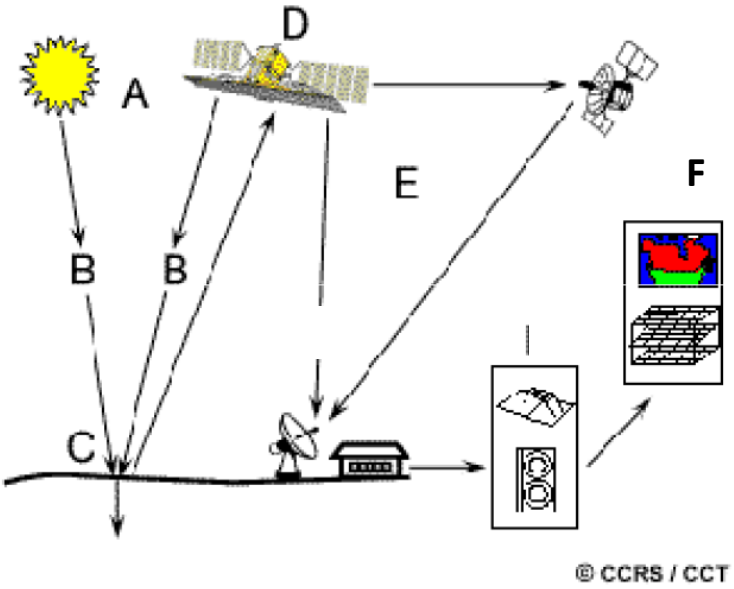
Lorsqu'un rayonnement rencontre une surface, il se décompose en trois résultantes de l'interaction :



- La surface absorbe une partie de l'énergie apportée par le rayonnement incident : c'est l'***absorptance***.
- Une deuxième fraction de l'énergie est transmise au travers de la surface : c'est la ***transmittance***.
- Une dernière partie du rayonnement incident est réfléchi. Le rapport entre l'énergie totale apportée par le rayonnement incident et l'énergie réfléchie est appelé la ***réflectance***. C'est cette résultante qui nous intéresse puisque c'est elle qui sera enregistrée par les capteurs embarqués sur les satellites. Cette énergie réfléchie est caractéristique de la surface cible d'où elle provient : c'est la signature spectrale de la cible (Campbell, 1987).

3) Le processus de télédétection

La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. En utilisant des systèmes imageurs passifs (le soleil comme source d'énergie primaire) tels que ceux employés par notre étude, le processus de la télédétection est composé des sept étapes suivantes :



- **Source d'énergie (A) :** À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible. Dans notre cas, la source d'énergie est le soleil et **la cible est le couvert végétal des prairies**.

- **Rayonnement et atmosphère (B) :** Durant son parcours entre le soleil et les prairies, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre le couvert végétal et le capteur. Ces interactions déforment les données et impliquent des corrections dites atmosphériques.

- **Interactions avec la cible (C) :** Une fois parvenue aux surfaces prairiales, l'énergie interagit avec la surface du couvert végétal. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés biologiques et structurelles du feuillage.

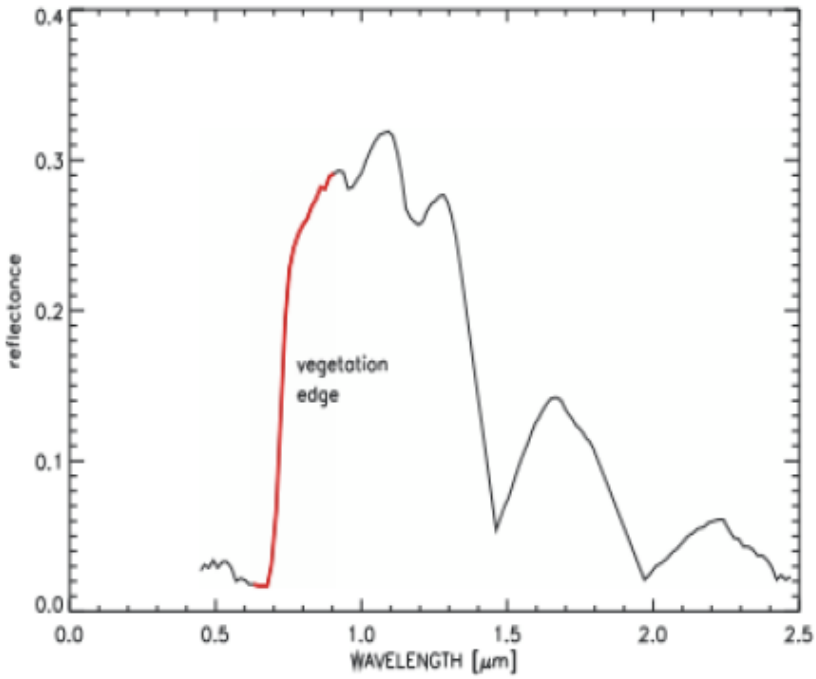
- **Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) :** Une fois le rayonnement réfléchi par le couvert végétal, il doit être capté à distance pour y être enregistré. L'un des capteurs utilisés dans notre étude : **HRVIR** est embarqué sur le satellite **SPOT 4.**

- **Transmission, réception et traitement (E) :** L'énergie enregistrée par le capteur est transmise à une station de réception terrestre ou l'information est transformée en image numérique. Ces images seront par la suite traitées et corrigées (des effets atmosphériques, radiométriques, et géométriques). Dans notre cas c'est le **CNES via la plateforme KALIDEOS** qui se charge de ces traitements.

- **Interprétation et analyse (F) :** Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image finale est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir : ici, le **NDVI** sur les **parcelles de fauches et de pâtures.**

4) <u>La réflectance d'un couvert végétal : comportement spectral</u>

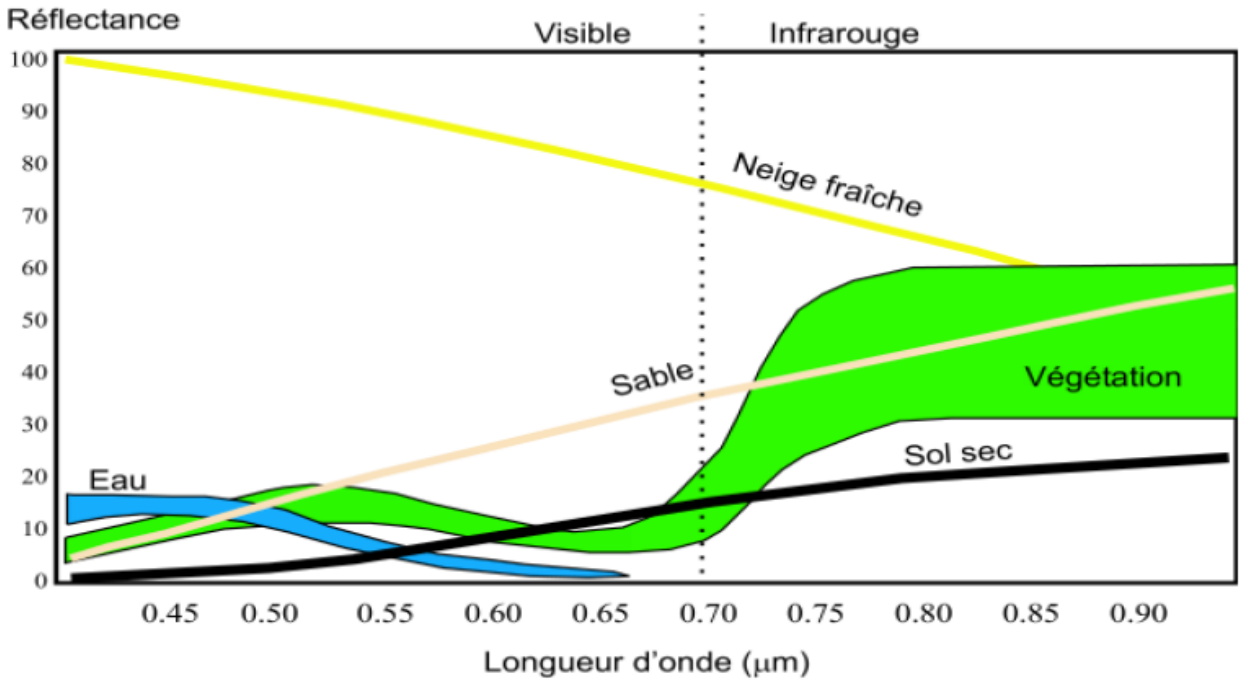
En laboratoire, la signature spectrale d'un couvert végétal permet de distinguer trois types de comportements (Schéma, Guyot *et al.,* 2007) :



- Dans le visible, la végétation présente un comportement spectral particulier dû à la présence de pigments chlorophylliens qui capte l'énergie lumineuse préférentiellement dans les longueurs d'onde du bleu, mais surtout du rouge. La réflectance dans ces longueurs d'onde est faible.
- Dans le proche infrarouge, la structure tissulaire du végétal permet une absorption moindre de l'énergie donc la réflectance augmente considérablement.
- Enfin dans le moyen infrarouge, c'est la teneur en eau du végétal qui provoque les trois pics d'absorptions.

Si globalement la signature spectrale d'un végétal quel qu'il soit obéit à cette tendance, il est très facile de distinguer des différences spectrales entre deux types de végétaux, ou pour un même végétal dans des conditions phénologiques ou hydriques différentes. Ainsi un végétal desséché aura des valeurs de réflectances plus élevées qu'un végétal « sain ».

De la même manière on peut faire la distinction entre un couvert dense qui aura une signature spectrale proche d'un végétal sain alors qu'un couvert fauché ou pâturé aura une signature spectrale similaire à celle d'un sol nu :



5) L'indice de végétation normalisé

Le principe des indices de végétation consiste à réaliser des combinaisons de réflectances dans différentes longueurs d'onde, dans le but d'estimer un paramètre caractéristique de la végétation. Ils s'appuient sur les différences de propriétés optiques de la végétation dans le rouge (600 à 700 nm) et le PIR (700 à 1300 nm).

Les indices de végétation ont été développés pour mesurer la quantité de végétation sur un territoire. Ils mesurent la fraction de sol recouverte de feuilles vertes et peuvent être reliés aux variables du couvert par des lois empiriques calées sur des données expérimentales (Girard *et al.,* 1989).

Ces indices de végétation sont utilisés d'une part pour identifier et suivre l'évolution temporelle de certains couverts végétaux (Qi *et al.,* 1993) et d'autre part pour évaluer certains paramètres biologiques de couvert (Zarco, 1999). Par ailleurs ces combinaisons présentent l'avantage de réduire l'effet de facteurs externes aux couverts comme l'éclairement solaire, l'influence de l'atmosphère, la contribution spectrale du sol…

Dans notre étude c'est l'indice de végétation normalisé ou **NDVI** que nous utilisons pour tenter de trouver une corrélation avec le rendement fourrager.

L'expression du NDVI est la suivante :

NDVI = (Réflectance PIR – Réflectance ROUGE)/(Réflectance PIR + Réflectance ROUGE)

Cet indice développé par Tucker (1979) est le plus connu. Il est très sensible aux changements d'état du couvert végétal et grâce à cette différence normalisée, il minimise un peu mieux les effets du sol.

Annexe 5 : Parcelles d'étude

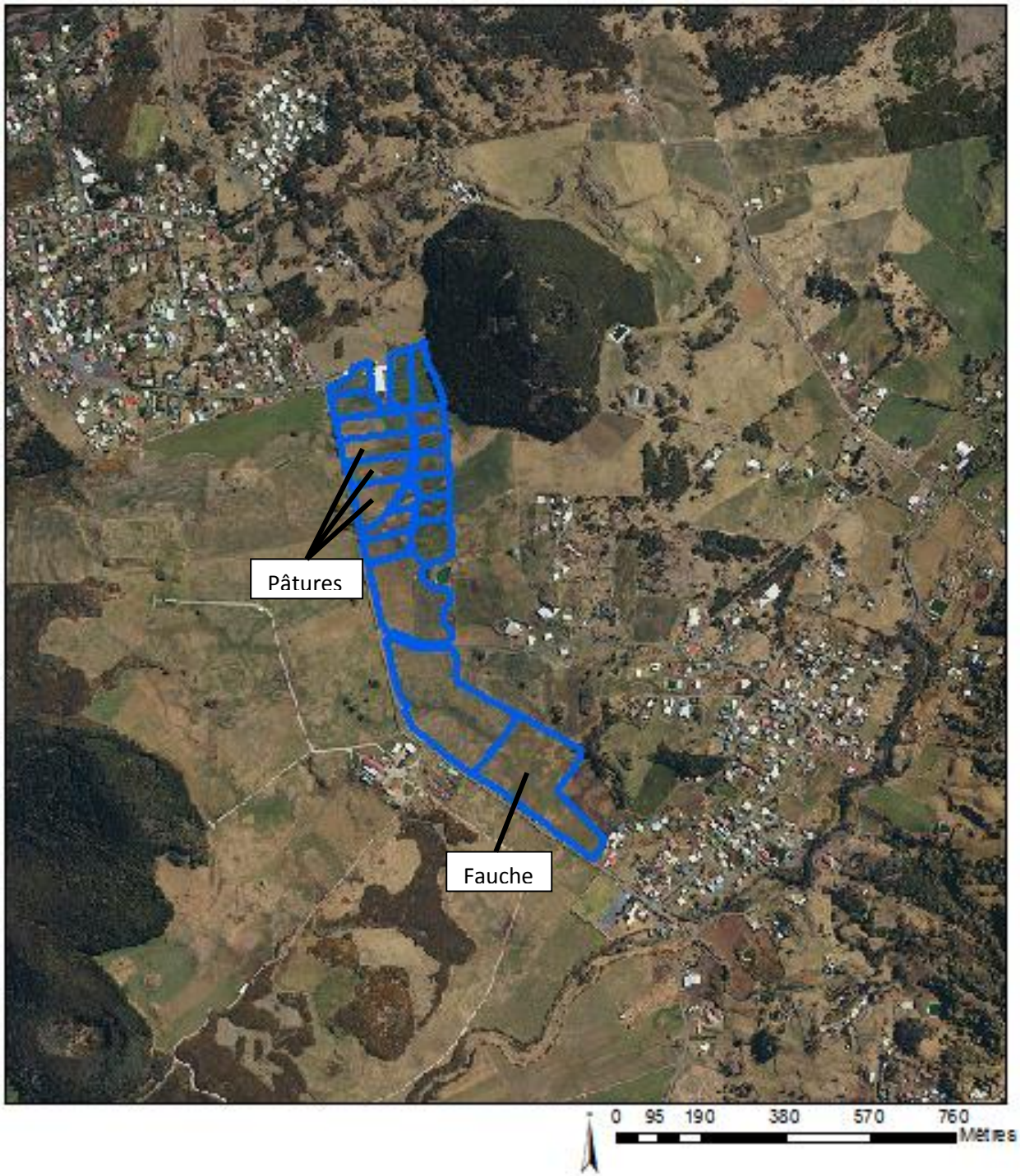


Figure 1. Parcelles d'études chez Didier PICARD : Quatre pâtures et une fauche.

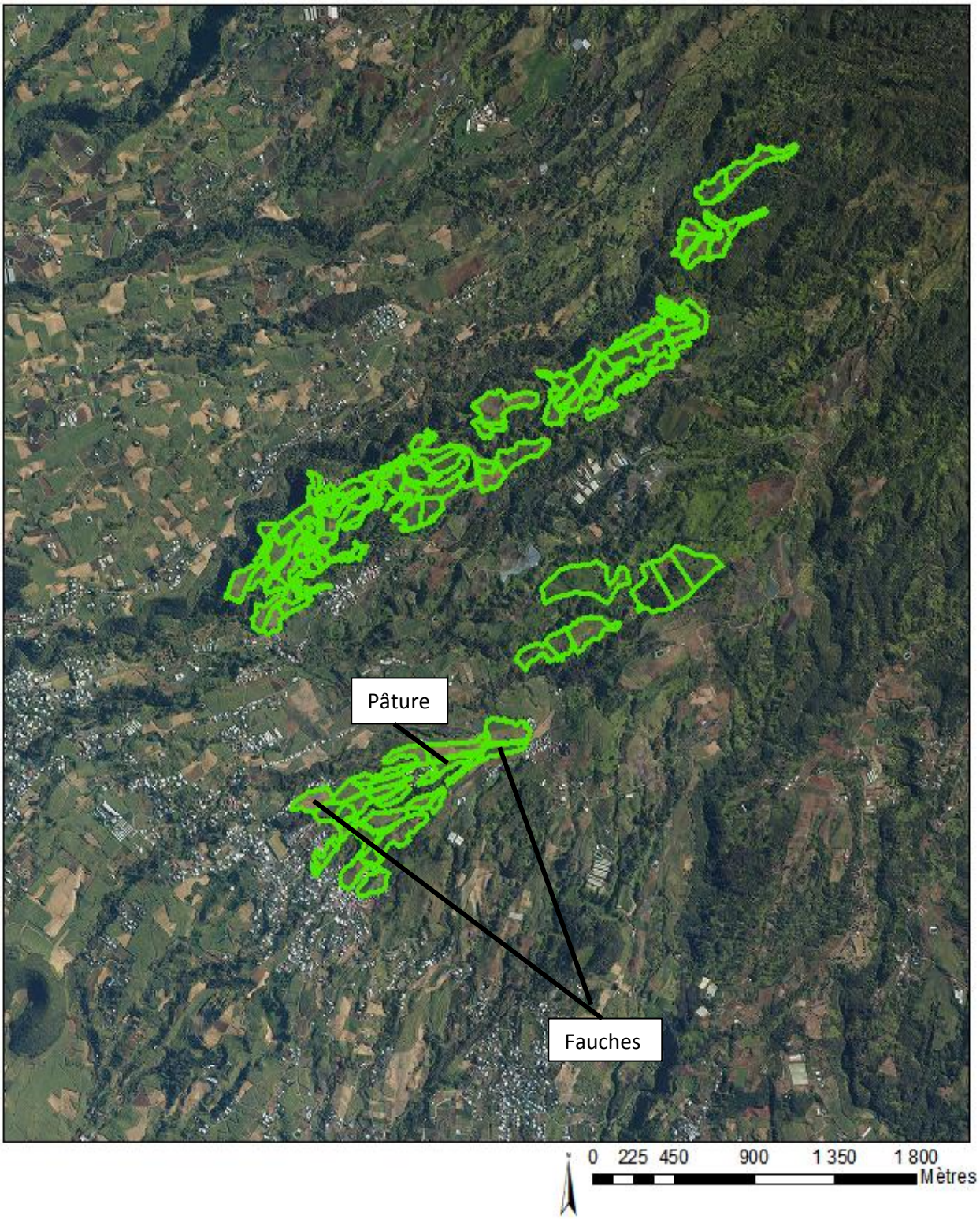


Figure 2. Parcelles d'étude à la SEDAEL : Deux fauches et une pâture.

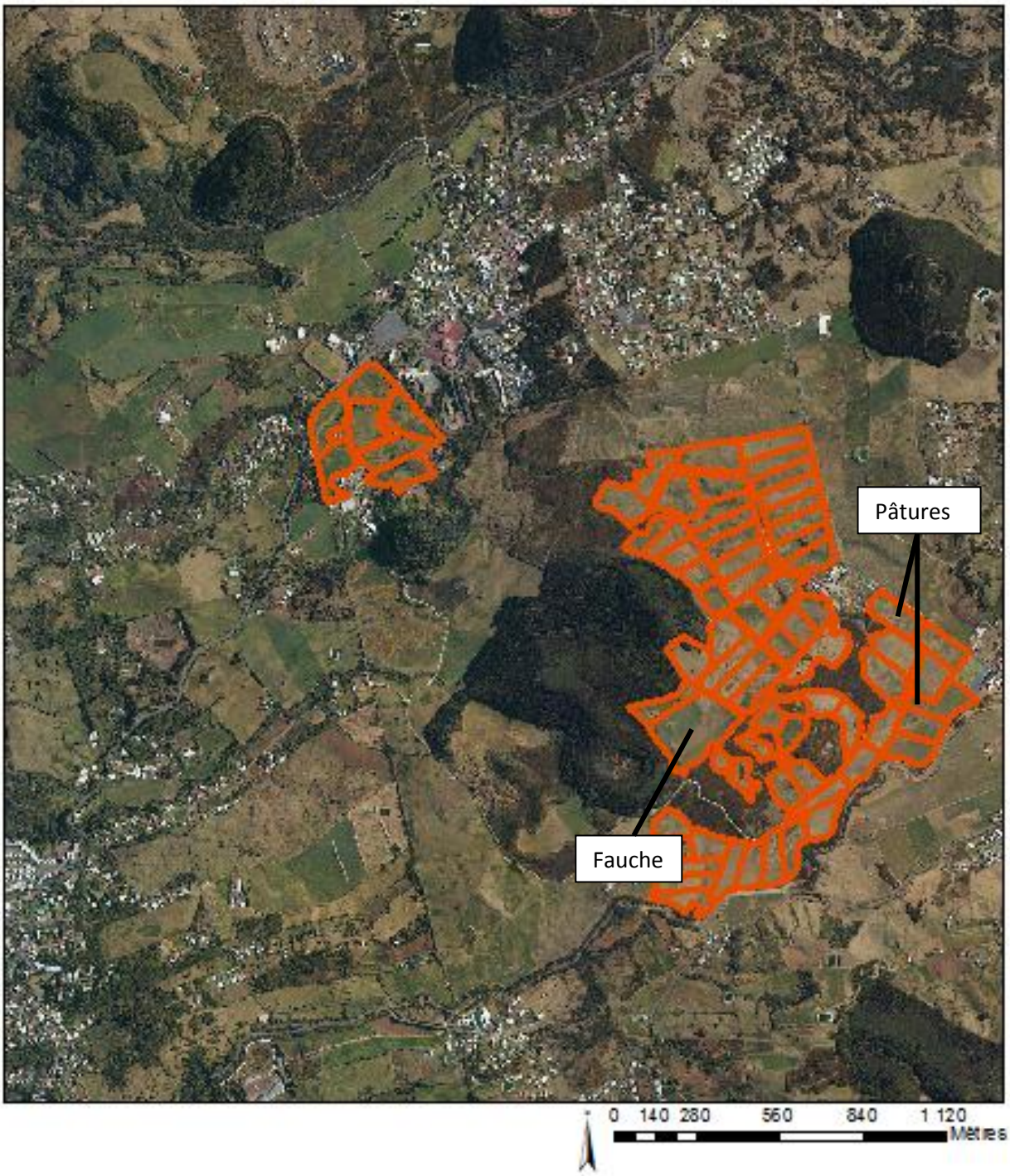


Figure 3. Parcelles d'étude à la SICALAIT : Une fauche et deux pâtures.

/Figure 4. Parcelle d'étude chez Gervais HOARAU : Une fauche.

Annexe 7 : Fiches techniques

1) **L'herbomètre « Folding Plate Pasture Meter JENQUIP ».**

Figure 1. Herbomètre

Principe : L'herbomètre permet d'avoir une représentation de l'hétérogénéité de la hauteur d'herbe une parcelle. Il est constitué d'une plaque, généralement métallique, coulissant sur un axe. Cette plaque, posée ou lâchée d'une hauteur fixe sur le couvert végétal, se stabilise à une hauteur qui dépend de la résistance à l'écrasement de l'herbe ; c'est ce que nous appelons la hauteur d'herbomètre.
À chaque mesure, poser l'appareil à plat sur la surface à mesurer puis relever et presser le bouton « **HEIGHT** » du boîtier de commande : la hauteur d'herbe de l'échantillon s'affiche. Il est possible de faire plusieurs mesures successives sur toute la parcelle d'étude. Pour avoir une idée de la hauteur d'herbe moyenne de la parcelle. L'herbomètre va donc calculer le nombre de mesures prises : « **COUNT** », puis affiche automatiquement la valeur moyenne des mesures.

Remarque : Il s'est avéré que cet instrument ne se prêtait absolument pas à des mesures de hauteurs d'herbe dans les conditions de l'étude. En effet l'herbomètre atteint une saturation maximum de 53 cm. La hauteur des graminées rencontrées dans les prairies réunionnaises atteint périodiquement le mètre de hauteur.

2) Le GPS Geo XT Trimble

Figure 2. GPS

Principe : Cet appareil permet de prendre des mesures précision de 50 cm en post traitements, compatible différentiel temps réel SBAS (WAAS/EGNOS/MSAS) et réseaux VRS. Ce GPS permet de prendre au sein de la parcelle des mesures ponctuelles qui seront par la suite corrigées grâce au logiciel de traitement différentiel : ***Trimble Path finder Office VERSION 4.20.***

La station de référence pour les corrections est celle de la Plaine des Cafres :

21°12’29,61720S et 55°34’18,18650E.

L’exportation des données peut se faire en format *shape* pour être traitée en SIG sous Arcmap.

Remarque : La précision et la capacité de mémoire du GPS permet à chaque campagne d'échantillonnage sur une même parcelle, de revenir avec exactitude aux mêmes points de prélèvements des campagnes de mesures précédentes. Ainsi, avec une revisite tous les quinze jours sur la parcelle soit six revisites entre avril et juillet, il n’y aura qu’une seule et même couche de point GPS par parcelle.

3) <u>Le peson et le carré</u>

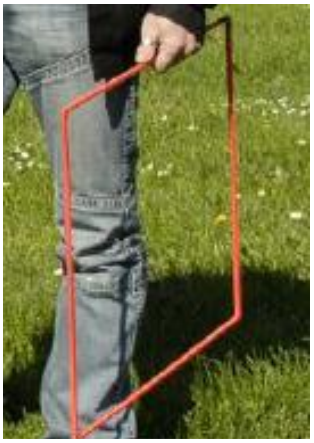


Figure 3. Carré de mesure (2,5 m²) et peson.

Principe : À chaque campagne de mesure, 2.5m² d'herbe sont prélevées et pesées (grâce au peson et au carré de 50cm de côté) à raison de 3 à 4 fois par hectare.

4) Manipulations laboratoire pour la matière sèche

Principe : Un pool de matière fraîche (environ 500 g) représentatif de l'hétérogénéité de la parcelle est ramené en laboratoire pesé, séché à l'étuve durant 48heures, broyé et passé au SPIR afin d'avoir accès aux valeurs nutritives de l'herbe.

Figure 4. Échantillon de matière sèche après 48 h à l'étuve.

Broyeur 1

Broyeur 2

Les échantillons séchés sont broyés deux fois…

Puis seront passés au SPIR qui permet d'avoir accès à leur composition et à leur qualité nutritive.

ARP ASSOCIATION REUNIONNAISE PASTORALISME

REGION REUNION CONSEIL REGIONAL

CIRAD

ANALYSE DE FOURRAGE

Commémoratifs: 01/07/11_sedael_2F

Code demandeur: **F5660_Dobignard** Nature: **01/07/11 sedael 2F**

Date prélèvement: NIRS Number: F5660

Demandeur: Sample Date: 03/08/2011 11:22:56

Objet: Product Code: (6) Herbvert poudre Valimlocale(6)

Paramètres		Unités	Resultats	GH	
MSetuv	Matière sèche mesurée étuve	%MV	19.42		
UFL	Unité fourragère lait fourrage vert	UFL/kg MS	0.82		
UELhv	Unité encombrement lait herbe en vert	sd	1.04		
DEf	Densité énergétique du fourrage	sd	0.81		
MAD	Matières azotées digestibles (old)	g/kg MS	169.09		
PDIA	Proteines digestibles intestin d'origine alimentaire	g/Kg MS	58.73		
PDIN	Proteines digestibles calculées sur l'N	g/kg MS	136.65		
PDIE	Proteines digestibles calculées sur l'énergie (vert)	g/kg MS	112.34		
IngBO250	Ingestibilité Jeune Bovin 250 kg (vert)	kgMS/j	5.87		
IngVL600v	Ingestibilité Vache Laitière 600 kg (vert)	KgMS/j	16.79		
Lait pot vr	Lait potentiel Vache 600 kg (vert)	litr/j	17.17		
CLASS	indice proximité Tempéré Tropical	sd	0.73		
BalPDI	Equilibre PDIN-PDIE	g/kgMS	24.64		
ASH	Matières minérales totales (NIR)	%MS	9.34	2.0	
PROTEIN	Proteines brutes totales (NIR)	%MS	21.61	2.2	
NDF	Neutral Detergent Fiber (NIR)	%MS	60.15	1.8	
ADF	Acid Detergent Fiber (NIR)	%MS	30.94	1.3	
ADL	Acid Detergent Lignin (NIR)	%MS	4.01	0.9	
CELL	Cellulose de Weende (NIR)	%MS	26.92	1.6	
DMSauf	Digestibilité (Auf) de la MS (NIR)	%MS	67.02	1.1	
DMOauf	Digestibilité enzym.(auf) de la MO (NIR)	%MO	66.95	5.3	
DM	Matière sèche analytique (NIR)	%MS	94.56	2.9	
IDtemp	Discrimination tempérée/tropicale (NIR)	indice	1.99	1.6	
				0.90	GH moyen

Figure 5. Fiche d'analyse de fourrage.

Dans cette étude les paramètres pris en compte sont :

- MS : La matière sèche = **% MS**
- PROTEINS : Protéines brutes totales = % MS
- UFL : L'énergie contenue dans le fourrage = kg MS

Échantillons :	Dates	Éleveur	Parcelle	Poids panier vide	Poids vert	Poids sec	Matière sèche %	Valeur alim.
5431	03/05	Hoarau	Fauche 1	1039	1388	1101	17,77	0,77
5458	17/05	Hoarau	Fauche 1	1062	1688	1147	13,58	1,02
5490	27/05	Hoarau	Fauche 1	1030	1739	1142	15,8	0,98
5494	31/05	Hoarau	Fauche 1	910	1225	980	22,22	1,79
5648	22/06	Hoarau	Fauche 1	1028	1489	1114	18,66	2,76
5673	11/06	Hoarau	Fauche 1	1050	1668	1131	13,56	2,05
5432	06/05	Picard	Fauche 1	1030	1658	1145	18,31	0,83
5433	06/05	Picard	Pâture 1	910	1525	991	13,17	2,74
5460	19/05	Picard	Fauche 1	909	1302	1004	24,17	1,85
5461	19/05	Picard	Pâture 1	1053	1518	1116	13,55	1,7
5491	30/05	Picard	Fauche 1	1062	1543	1164	21,21	1,61
5492	30/05	Picard	Pâture 1	1060	1649	1147	14,77	1,74
5493	30/05	Picard	Pâture 2	898	1387	976	15,95	1,25
5496	06/06	Picard	Pâture 1	1062	1518	1143	17,76	1,27
5497	06/06	Picard	Pâture 3	1029	1457	1101	16,82	1,22
5630	15/06	Picard	Fauche 1	1012	1431	1083	16,95	0,94
cycle complet	21/06	Picard	Pâture 1	0	0	0	0	0
5643	21/06	Picard	Pâture 2	903	1610	999	13,58	2,21
5644	21/06	Picard	Pâture 3	1038	1674	1106	10,69	1,44
5645	21/06	Picard	Pâture 4	1046	1641	1119	12,27	1,98
5650	27/06	Picard	Fauche 1	1048	1753	1184	19,57	1,17
5655	29/06	Picard	Pâture 2P	1051	1580	1112	14,56	1,4
5654	29/06	Picard	Pâture 4P	1048	1675	1145	13,88	2,55
cycle complet	29/06	Picard	Pâture 3P	0	0	0	0	0
cycle complet	29/06	Picard	Pâture 1P	0	0	0	0	0
herbe rase	12/07	Picard	Fauche 1	0	0	0	0	0
5675	12/07	Picard	Pâture 4	1060	1851	1181	10,62	1,77
cycle complet	12/07	Picard	Pâture 3	0	0	0	0	0
cycle complet	12/07	Picard	Pâture 2	0	0	0	0	0
cycle complet	12/07	Picard	Pâture 1	0	0	0	0	0
5434	05/05	Corré	Pâture 1	1049	1536	1132	17,04	0,61
5459	18/05	Corré	Fauche 1	1027	1542	1145	22,91	0,47
herbe rase	01/06	Corré	Fauche 1	0	0	0	0	0
inaccessible	22/06	Corré	Fauche 1	0	0	0	0	0
5656	29/06	Corré	Fauche 1	1052	1458	1125	17,98	1,18
inaccessible	13/07	Corré	Pâture 1	0	0	0	0	0
inaccessible	13/07	Corré	Fauche 1	0	0	0	0	0
5435	06/05	Sicalait	Fauche 1	1030	1423	1107	19,59	1,13

5462	20/05	Sicalait	Fauche 1	1029	1395	1107	21,31	0,88
5498	07/06	Sicalait	Pâture 1	1048	1473	1129	19,06	1,05
herbe rase	07/06	Sicalait	Fauche 1	0	0	0	0	0
5631	17/06	Sicalait	Fauche 1	1052	1479	1140	20,61	1,29
5649	17/06	Sicalait	Pâture 1	1001	1375	1073	19,25	3,39
5632	17/06	Sicalait	Pâture 2	1030	1548	1126	18,53	1
5657	30/06	Sicalait	Fauche 1	1035	1441	1127	22,66	1,6
5658	30/06	Sicalait	Pâture 1	1001	1568	1104	18,17	2,85
5659	30/06	Sicalait	Pâture 2	1038	1498	1123	18,48	2,02
5680	12/07	Sicalait	Fauche 1	1048	1830	1197	13,43	1,58
cycle complet	12/07	Sicalait	Pâture 1	0	0	0	0	0
5681	12/07	Sicalait	Pâture 2	1037	1662		16,32	2,18
5448	10/05	Sedael	Fauche 1	1010	1260	1082	28,8	1,4
5449	10/05	Sedael	Fauche 2	1072	1532	1144	15,65	1,38
5463	23/05	Sedael	Fauche2	1052	1421	1125	19,78	1,12
5464	23/05	Sedael	Pâture 1	1039	1502	1134	20,52	1,94
5465	23/0	Sedael	Fauche1	1061	1522	1152	19,74	1,8
5499	07/06	Sedael	Fauche 1	1051	1706	1157	16,18	0,99
5627	07/06	Sedael	Pâture 1	1052	1485	1136	19,4	1,52
herbe rase	07/06	Sedael	Fauche 2	0	0	0	0	0
5646	21/06	Sedael	Fauche 1	1037	1489	1133	21,24	1,13
5647	21/06	Sedael	Fauche 2	1037	1487	1122	18,89	2,48
cycle complet	21 /06	Sedael	Pâture 1	0	0	0	0	0
inaccessible	01/07	Sedael	Fauche 1	0	0	0	0	0
5660	01/07	Sedael	Fauche 2	1029	1513	1123	19,42	0,9
cycle complet	01/07	Sedael	Pâture 1	0	0	0	0	0
Deviens pâtu.	11/07	Sedael	Fauche 1	0	0	0	0	0
5674	11/07	Sedael	Fauche 2	1052	1738	1125	14,08	1,43
cycle complet	11/07	Sedael	Pâture 1	0	0	0	0	0

Figure 6. Mesures de la matière sèche.

5) **Questionnaire destiné aux éleveurs**

QUESTIONNAIRE : L'EXPLOITATION

1) L'éleveur :

Nom : **CORRE**

Prénom : **RICHARD**

2) L'exploitation enquêtée

Date d'installation : **2003**

Système de production (plusieurs réponses possibles) :

- ✓ Laitier
- Naisseur
- Engraisseur

Nombre de parcelle : **1 Fauche, 11 pâtures et 1 parcelle mixte.**

3) Le cheptel

70 génisses

4) ORGANISATION DE LA ROTATION DES BÊTES SUR LES PARCELLES :

Temps de retour sur une parcelle : Entre 7 et 10 jours

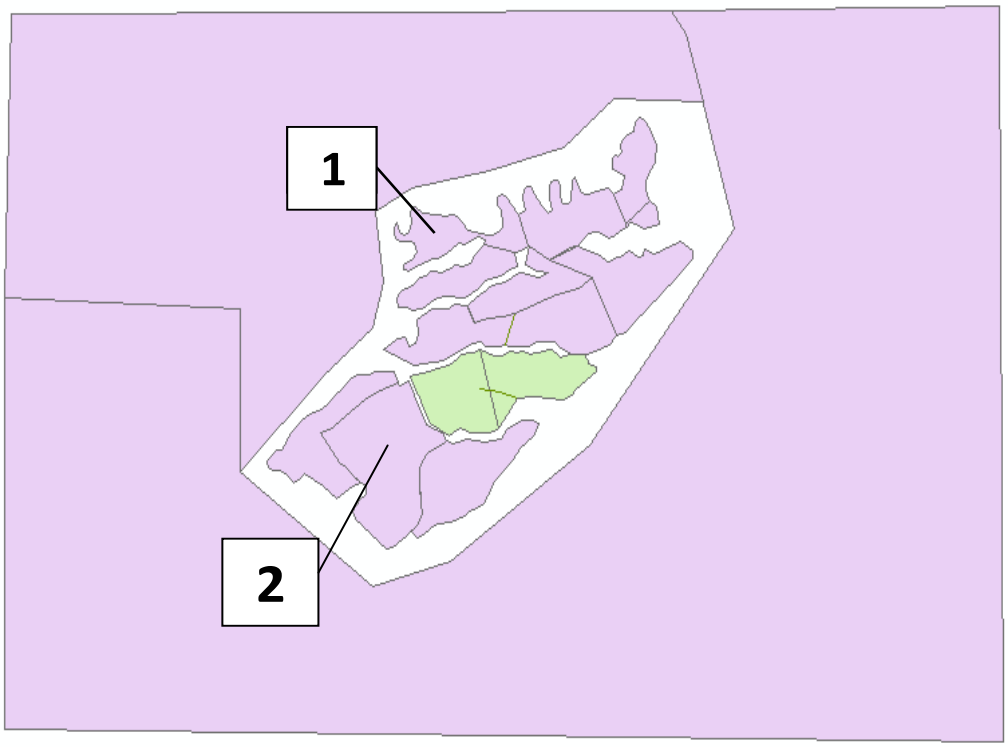
5) SAU et Assolement :

- SAU totale de l'exploitation : **34 ha**

6) Les parcelles

Informations à remplir dans le tableau page 3, sur chaque parcelle de l'exploitation numérotée,

- S'il s'agit de FAUCHE ou de PATURAGE ou les deux
- La variété de graminée prédominante (Kikuyu, Dactyle ou Chloris)
- Fertilisation (date et dose et répartition)
- Rendement fourrager 2010
- Surface de chaque parcelle



1

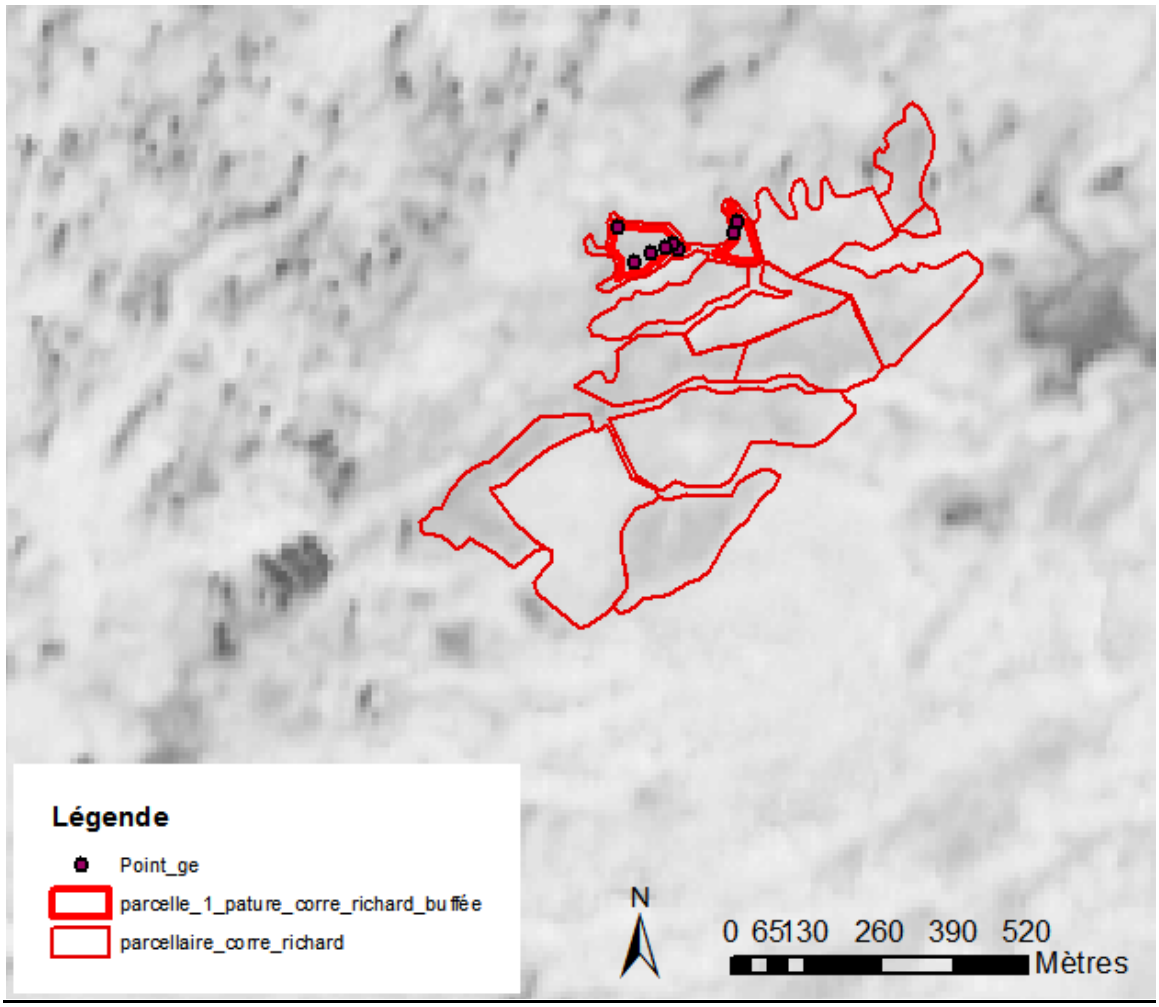
- **Parcelle de Pâture de 2 ha.**
- **Variété dominante : Kikuyu.**
- **Fertilisation : épandage annuel en décembre, minérale (331106) 250kg/ha**

2

- **Parcelle de Fauche de 5.5ha.**
- **Variété dominante : Kikuyu.**
- **Fertilisation : Deux fois par an novembre et avril, minérale (331106) 300kg/ha**
- **Nombre de balles d'ensilage après la fauche : 80 en moyenne**
- **Date dernière fauche : 26 février 2011**

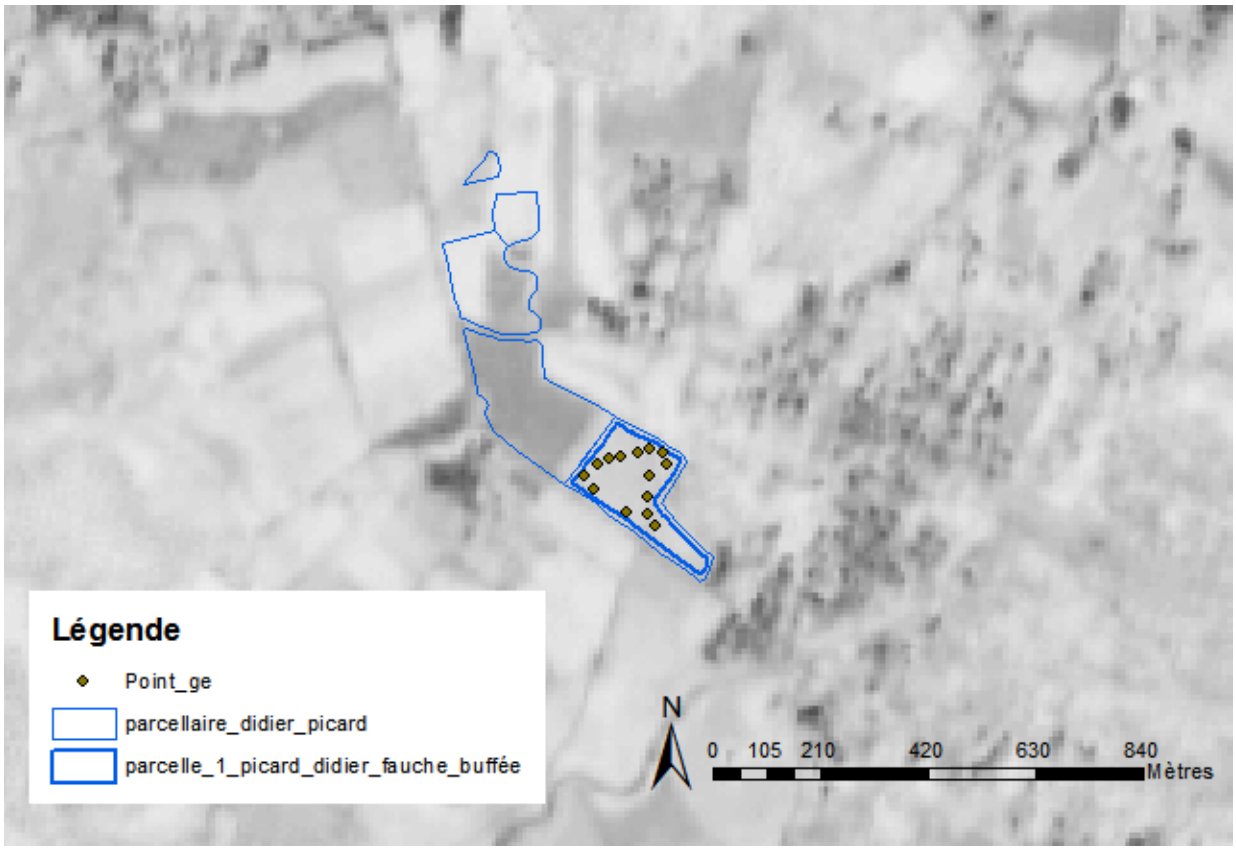
Figure 7. Questionnaire éleveur Corré.

Annexe 7 : Relevés GPS



Pâture de Corré sur fond de SPOT 4 indice NDVI du 8 mai 2011.

Échantillon terrain	Date terrain	Couche GPS	Biomasse fraiche ponctuelle g/2, 5m²	Hauteur herbe ponctuelle cm/2,5 m²
carré échantillon n° 1	04-mai	12	540	14,6
carré échantillon n° 2	04-mai	12	330	17,4
carré échantillon n° 3	04-mai	12	330	13,5
carré échantillon n° 4	04-mai	12	170	10,5
carré échantillon n° 5	04-mai	12	80	5,7
carré échantillon n° 6	04-mai	12	220	11,5
carré échantillon n° 7	04-mai	12	150	12
carré échantillon n° 8	04-mai	12	130	10,8

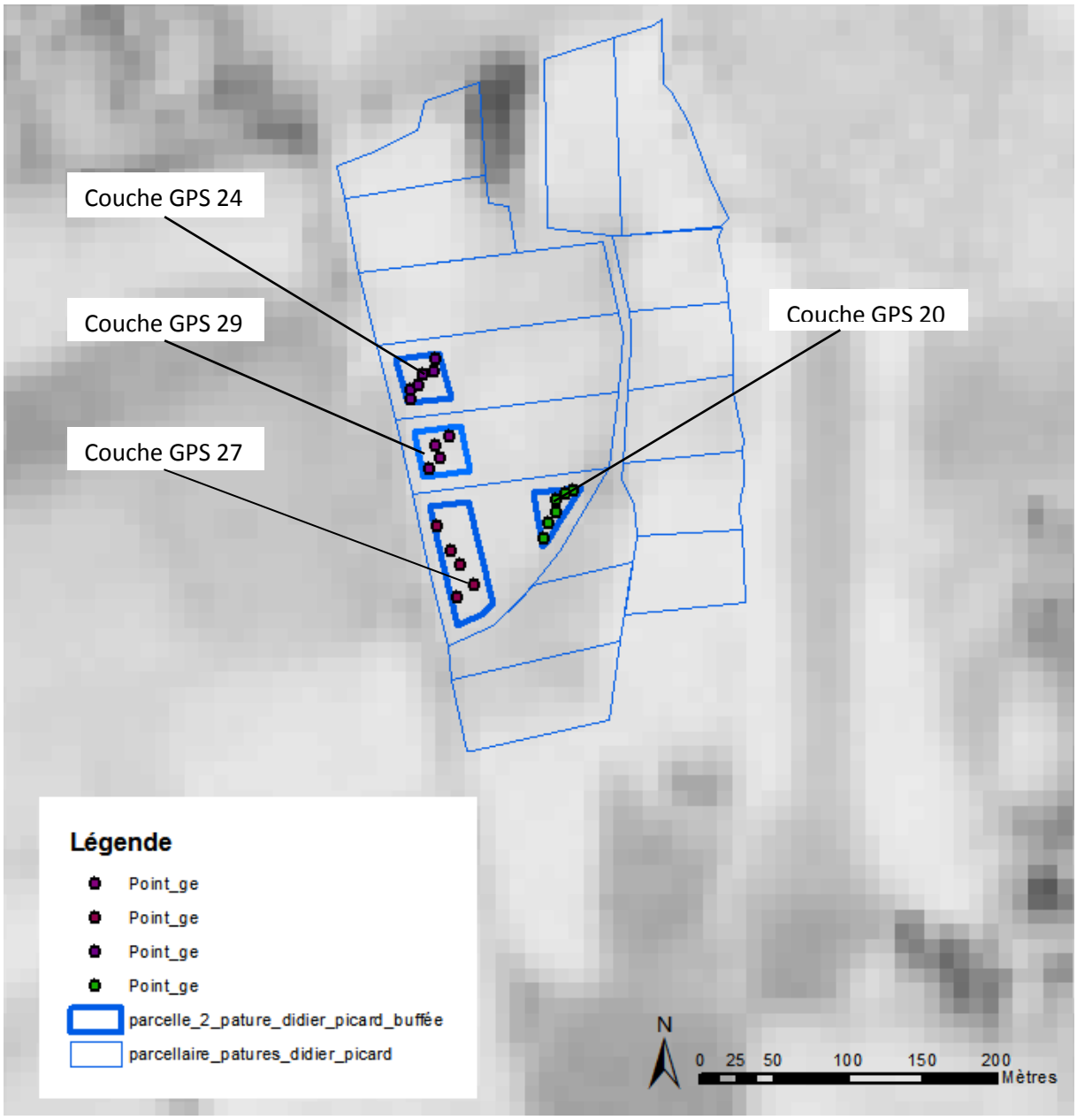


Fauche de Picard sur fond SPOT 4 indice NDVI du 8 mai 2011.

Échantillon terrain	Date terrain	Couche GPS	Biomasse fraiche ponctuelle g/2,5m²	Hauteur herbe ponctuelle cm/2,5 m²
carré échantillon n° 1	06-mai	14	250	30,1
carré échantillon n° 2	06-mai	14	35	13,1
carré échantillon n° 3	06-mai	14	105	20,3
carré échantillon n° 4	06-mai	14	175	24,4
carré échantillon n° 5	06-mai	14	70	11,9
carré échantillon n° 6	06-mai	14	130	20,2
carré échantillon n° 7	06-mai	14	70	13
carré échantillon n° 8	06-mai	14	110	19,1
carré échantillon n° 9	06-mai	14	180	23,6
carré échantillon n° 10	06-mai	14	110	21,3
carré échantillon n° 11	06-mai	14	60	16,2
carré échantillon n° 12	06-mai	14	290	30
carré échantillon n° 13	06-mai	14	70	24,4
carré échantillon n° 14	06-mai	14	160	24,9

Fauche Sicalait sur fond SPOT 5 indice NDVI du 21 mai 2011.

Échantillon terrain	Date terrain	Couche GPS	Biomasse fraiche ponctuelle g/2,5m²	Hauteur herbe ponctuelle cm/2,5 m²
carré échantillon n° 1	20-mai	47	220	33,7
carré échantillon n° 2	20-mai	47	350	44,5
carré échantillon n° 3	20-mai	47	250	47,4
carré échantillon n° 4	20-mai	47	240	38,3
carré échantillon n° 5	20-mai	47	300	33,1
carré échantillon n° 6	20-mai	47	280	36,4
carré échantillon n° 7	20-mai	47	260	34,6
carré échantillon n° 8	20-mai	47	220	27,2
carré échantillon n° 9	20-mai	47	460	47,6
carré échantillon n° 10	20-mai	47	270	34,6
carré échantillon n° 11	20-mai	47	560	51,9
carré échantillon n° 12	20-mai	47	410	50,2
carré échantillon n° 13	20-mai	47	320	36,2
carré échantillon n° 14	20-mai	47	300	38,7



Pâtures Picard sur fond SPOT 4 indice NDVI du 8 mai 2011.

Échantillon terrain	Date terrain	Couche GPS	Biomasse fraiche ponctuelle g/2,5m²	Hauteur herbe ponctuelle cm/2,5 m²
carré échantillon n° 1	06-mai	20	170	12,4
carré échantillon n° 2	06-mai	20	340	8,7
carré échantillon n° 3	06-mai	20	390	22,3
carré échantillon n° 4	06-mai	20	510	18,6
carré échantillon n° 5	06-mai	20	350	11,3
carré échantillon n° 6	06-mai	20	330	27,5

Échantillon terrain	Date terrain	Couche GPS	Biomasse fraiche ponctuelle g/2,5m²	Hauteur herbe ponctuelle cm/2,5 m²
carré échantillon n° 1	30-mai	24	70	18,1
carré échantillon n° 2	30-mai	24	270	22,8
carré échantillon n° 3	30-mai	24	460	36,9
carré échantillon n° 4	30-mai	24	60	14
carré échantillon n° 5	30-mai	24	50	14
carré échantillon n° 6	30-mai	24	80	15,9

Échantillon terrain	Date terrain	Couche GPS	Biomasse fraiche ponctuelle g/2,5m²	Hauteur herbe ponctuelle cm/2,5 m²
carré échantillon n° 1	06-juin	27	100	21,3
carré échantillon n° 2	06-juin	27	600	25,8
carré échantillon n° 3	06-juin	27	580	22,1
carré échantillon n° 4	06-juin	27	80	10,4
carré échantillon n° 5	06-juin	27	430	44,4

Échantillon terrain	Date terrain	Couche GPS	Biomasse fraiche ponctuelle g/2,5m²	Hauteur herbe ponctuelle cm/2,5 m²
carré échantillon n° 1	21-juin	29	760	43,9
carré échantillon n° 2	21-juin	29	620	28,3
carré échantillon n° 3	21-juin	29	710	40
carré échantillon n° 4	21-juin	29	710	39,4

Annexe 8 : Mesures terrains/Calculs images

- Données agronomiques :

Parcelle	Date terrain	Biomasse fraiche moyenne g/2,5m²	Hauteur herbe moyenne cm/2,5 m²	Couche GPS	Rendement tonnes
Fauche Hoarau	03-mai	63,529	21,5	1	11,51
Fauche Hoarau	17-mai	446,7	39,1	2	77,71
Fauche Hoarau	27-mai	760	49,3	3	132,21
Fauche Hoarau	31-mai	35,29	14,85	4	6,14
Fauche Hoarau	22-juin	131,76	22,14	5	22,92
Fauche Hoarau	11-juillet	522,35	31,22	6	90,87
Fauche Picard	06-mai	115,36	18,2	14	18,24
Fauche Picard	19-mai	164,28	25,41	15	25,98
Fauche Picard	30-mai	269,28	31,5	16	42,58
Fauche Picard	14-juin	421,43	37,98	17	66,65
Fauche Picard	27-juin	425	37,08	18	67,21
Fauche Picard	12-juillet	12,86	13,5	19	2,03
Pâture 1 Picard	06-mai	348,33	12,5	20	0,85
Pâture 1 Picard	19-mai	423,33	39,2	21	1,03
Pâture 1 Picard	30-mai	720	42,58	22	1,76
Pâture 1 Picard	06-juin	310	23,05	23	0,76
Pâture 2 Picard	30-mai	165	20,28	24	0,64
Pâture 2 Picard	21-juin	580	39,44	25	2,25
Pâture 2 Picard	29-juin	961,66	41,23	26	3,73
Pâture 3 Picard	06-juin	358	24,8	27	2,95
Pâture 3 Picard	21-juin	836	41,8	28	6,89
Pâture 4 Picard	21-juin	700	37,9	29	6,29
Pâture 4 Picard	29-juin	257,5	21,35	30	2,7
Pâture 4 Picard	12-juillet	697,5	31,2	31	7,32
Fauche 1 Sedael	10-mai	115	15,5	32	5,48
Fauche 1 Sedael	23-mai	312,5	24,77	33	14,88
Fauche 1 Sedael	07-juin	867,5	41,675	34	41,32
Fauche 1 Sedael	21-juin	922,5	47,9	35	43,94
Fauche 2 Sedael	10-mai	267,5	27,2	38	6,35
Fauche 2 Sedael	23-mai	470	44,5	39	11,16
Fauche 2 Sedael	07-juin	10	11,925	40	0,24
Fauche 2 Sedael	21-juin	77,5	20,3	41	1,84
Fauche 2 Sedael	01-juillet	142,5	22,5	42	3,38
Fauche 2 Sedael	11-juillet	325	29,82	43	7,71
Pâture 1 Sedael	23-mai	117,5	10,8	44	2,02
Pâture 1 Sedael	07-juin	217,5	15,375	45	3,73
Fauche Sicalait	06-mai	245	26,9	46	36,18
Fauche Sicalait	20-mai	317,14	39,6	47	46,83
Fauche Sicalait	07-juin	10	11,18	48	1,48
Fauche Sicalait	17-juin	70	16,293	49	413,51
Fauche Sicalait	30-juin	116,43	18,21	50	17,19
Fauche Sicalait	13-juillet	255	19,51	51	30,27
Pâture 1 Sicalait	07-juin	127,5	10,75	52	1,17
Pâture 1 Sicalait	17-juin	198	15,475	53	1,82

Pâture 1 Sicalait	30-juin	385	31,75	54	3,53
Pâture 2 Sicalait	17-juin	154,7	17,775	55	4,05
Pâture 2 Sicalait	30-juin	262,5	21,75	56	6,88
Pâture 2 Sicalait	13-juillet	282,5	17,9	57	5,31

- Données radiométriques :

Parcelle	Dates SPOT	NDVI Médian
Fauche Hoarau	23-avr-11	214
Fauche Hoarau	08-mai-11	238
Fauche Hoarau	21-mai-11	240
Fauche Hoarau	30-mai-11	214
Fauche Hoarau	09-juin-11	206
Fauche Hoarau	24-juin-11	219
Fauche Hoarau	04-juil-11	233
Fauche Hoarau	14-juil-11	238
Fauche Picard	23-avr-11	194
Fauche Picard	08-mai-11	223
Fauche Picard	21-mai-11	232
Fauche Picard	30-mai-11	236
Fauche Picard	09-juin-11	232
Fauche Picard	24-juin-11	228
Fauche Picard	04-juil-11	223
Fauche Picard	14-juil-11	207
Pâture 1 Picard	23-avr-11	233
Pâture 1 Picard	08-mai-11	226
Pâture 1 Picard	21-mai-11	236
Pâture 1 Picard	30-mai-11	236
Pâture 1 Picard	09-juin-11	225
Pâture 1 Picard	24-juin-11	225
Pâture 1 Picard	04-juil-11	234
Pâture 1 Picard	14-juil-11	238
Pâture 2 Picard	23-avr-11	230
Pâture 2 Picard	08-mai-11	232
Pâture 2 Picard	21-mai-11	236
Pâture 2 Picard	30-mai-11	229
Pâture 2 Picard	09-juin-11	228
Pâture 2 Picard	24-juin-11	236
Pâture 2 Picard	04-juil-11	232

Pâture 2 Picard	14-juil-11	235
Pâture 3 Picard	23-avr-11	234
Pâture 3 Picard	08-mai-11	232
Pâture 3 Picard	21-mai-11	238
Pâture 3 Picard	30-mai-11	238
Pâture 3 Picard	09-juin-11	226
Pâture 3 Picard	24-juin-11	233
Pâture 3 Picard	04-juil-11	234
Pâture 3 Picard	14-juil-11	239
Pâture 4 Picard	23-avr-11	234
Pâture 4 Picard	08-mai-11	232
Pâture 4 Picard	21-mai-11	238
Pâture 4 Picard	30-mai-11	239
Pâture 4 Picard	09-juin-11	229
Pâture 4 Picard	24-juin-11	237
Pâture 4 Picard	04-juil-11	233
Pâture 4 Picard	14-juil-11	239
Fauche 1 Sedael	23-avr-11	207
Fauche 1 Sedael	08-mai-11	214
Fauche 1 Sedael	21-mai-11	232
Fauche 1 Sedael	30-mai-11	237
Fauche 1 Sedael	09-juin-11	233
Fauche 1 Sedael	24-juin-11	232
Fauche 1 Sedael	04-juil-11	230
Fauche 1 Sedael	14-juil-11	221
Fauche 2 Sedael	23-avr-11	210
Fauche 2 Sedael	08-mai-11	234
Fauche 2 Sedael	21-mai-11	238
Fauche 2 Sedael	30-mai-11	240
Fauche 2 Sedael	09-juin-11	206
Fauche 2 Sedael	24-juin-11	223
Fauche 2 Sedael	04-juil-11	228
Fauche 2 Sedael	14-juil-11	233
Pâture Sedael	23-avr-11	224
Pâture Sedael	08-mai-11	227
Pâture Sedael	21-mai-11	211
Pâture Sedael	30-mai-11	225
Pâture Sedael	09-juin-11	226

Pâture Sedael	24-juin-11	213
Pâture Sedael	04-juil-11	222
Pâture Sedael	14-juil-11	232
Fauche Sicalait	23-avr-11	229
Fauche Sicalait	08-mai-11	233
Fauche Sicalait	21-mai-11	233
Fauche Sicalait	30-mai-11	233
Fauche Sicalait	09-juin-11	201
Fauche Sicalait	24-juin-11	217
Fauche Sicalait	04-juil-11	224
Fauche Sicalait	14-juil-11	227
Pâture 1 Sicalait	23-avr-11	203
Pâture 1 Sicalait	08-mai-11	232
Pâture 1 Sicalait	21-mai-11	228
Pâture 1 Sicalait	30-mai-11	220
Pâture 1 Sicalait	09-juin-11	219
Pâture 1 Sicalait	24-juin-11	224
Pâture 1 Sicalait	04-juil-11	232
Pâture 1 Sicalait	14-juil-11	231
Pâture 2 Sicalait	23-avr-11	231
Pâture 2 Sicalait	08-mai-11	232
Pâture 2 Sicalait	21-mai-11	225
Pâture 2 Sicalait	30-mai-11	229
Pâture 2 Sicalait	09-juin-11	224
Pâture 2 Sicalait	24-juin-11	216
Pâture 2 Sicalait	04-juil-11	232
Pâture 2 Sicalait	14-juil-11	225

Annexe 9 : Caractéristiques des capteurs embarqués sur SPOT 4 et 5

1) Les capteurs HRVIR

Cinq satellites SPOT ont été lancés jusqu'à présent dont SPOT 4 le 20 mars 1998, muni de capteurs HRVIR pour Haute Résolution Visible et Infra-Rouge et d'un radiomètre grand champ appelé VÉGÉTATION. Et SPOT 5 lancé en 2002 qui diffère par ses caméras permettant une vue stéréoscopique.

2) Caractéristiques

- **L'orbite** des satellites SPOT est héliosynchrone et quasi polaire (nœud descendant à 10h30 heure locale). Ils se trouvent à une altitude de 822 km et ont un cycle de 26 jours.
- **La résolution temporelle** est d'environ trois jours. Avec des possibilités de revisite plus court par dépointage.
- **La fauchée** des satellites est de l'ordre de 60 km.
- SPOT 4 et 5 disposent de deux capteurs HRVIR qui utilisent **quatre bandes spectrales** : **B1** (510 à 610 nm), **B2** (610 à 680 nm), **B3** (790 à 890 nm) et **B4** (dans le moyen infrarouge). Ainsi qu'un **mode panchromatique** à une bande unique (510 à 730 nm).
- **La résolution spatiale** :

  - ✓ SPOT 4 en mode panchromatique = 10 m/en mode multispectrale = 20 m
  - ✓ SPOT 5 en mode panchromatique = 5 m/en mode multispectrale = 10 m

Ainsi après fusion entre l'image panchromatique et multispectrale on peut obtenir des images multispectrales respectivement de 10 m de résolution pour SPOT 4 et 2.5 m pour SPOT 5.

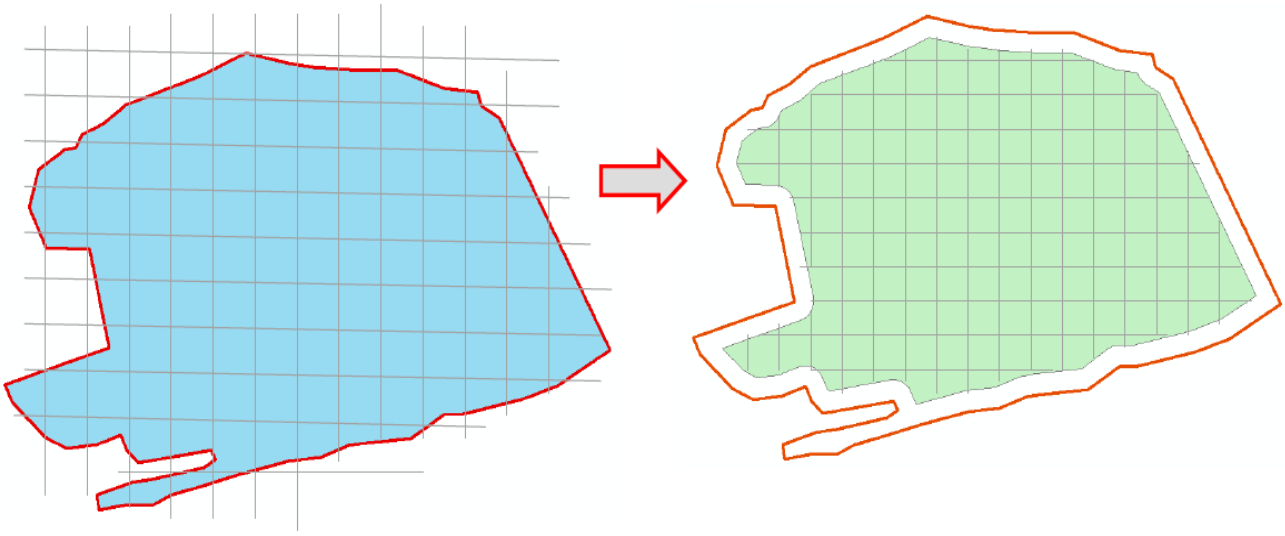
Annexe 10 : Prétraitements des parcelles avant calcul NDVI

Pour calculer le NDVI médian parcellaire de nos exploitations sur une image SPOT 4 ou 5, il faut préparer les parcelles d'études. Et minimiser au maximum les facteurs pouvant induire de l'erreur dans le calcul.

Ces prétraitements se déroulent en plusieurs étapes.

1) Zone tampon

La première consiste en l'application d'une zone tampon de la taille d'un pixel (10m) à l'intérieur de chaque parcelle sous SIG. Ce buffer va permettre d'éliminer les pixels « chevauchants » c'est-à-dire qui se trouve en partie à l'intérieur et à l'extérieur des limites de la parcelle. Le calcul du NDVI médian ne doit s'effectuer en effet **QUE** sur des pixels compris à l'intérieur de la parcelle. La surface de la parcelle une fois « ***BUFFEE*** » doit être donc recalculée. Une fois buffée, tous les pixels de la parcelle finale sont contenus dans la surface fonctionnelle de base.



Parcelle avant buffer 10m = 4.35ha *Parcelle après buffer 10m Surface = 3.42ha* *Surface*

2) Erreur sur le calcul du NDVI

Quelques images SPOT 4& 5 sont acquises juste après les fauches de certaines parcelles (c'est le cas pour l'image du 30 mai pour la parcelle de Hoarau G. qui a été fauchée le 27 mai). À cette date SPOT, les balles d'ensilages sont encore présentes et éparpillées sur la parcelle. Plus tard, elles seront ramassées et rassemblées en bordure de parcelle et ainsi, contenues dans la zone tampon de l'image (donc exclues de la surface sur laquelle s'applique le calcul du NDVI médian). Mais pour ces images, le problème de la présence de ces balles est bien réelle et va induire une erreur dans le calcul du NDVI. Or, une balle d'ensilage occupe une surface au sol de 1.2265m² (soit 1.25 m de diamètre en moyenne).

Si on prend l'exemple de la parcelle de fauche de Hoarau G. La fauche du 27 mai a produit 60 balles d'ensilage : soit (60* 1.2265m²) 73.59m² au total.

La surface de la parcelle est de 4.3489ha : soit 43489m².
La surface occupée par les balles est donc de l'ordre de **0.16 %.**
De plus, la taille d'un pixel représente 100m² ainsi, l'erreur sera de l'ordre du **2/3 d'un pixel** sur une surface qui en compte 435 au total.
On peut donc juger que l'erreur est minime. Si la résolution spatiale de l'image SPOT était de 2.5 m (SPOT 5), il aurait fallu envisager d'appliquer un masque sur Erdas sur les balles d'ensilage.

Annexe 11 : Somme des degrés/jours accumulés

L'évolution temporelle de la hauteur d'herbe, de la biomasse ou du NDVI peut être représentée en fonction du stade de croissance exprimé en jours après la fauche **OU** en somme des degrés jours accumulés par l'herbe. La différence de variété des graminées rencontrées et l'altitude de nos différents sites de mesure influencent les paramètres descriptifs de l'état du couvert (hauteur d'herbe, biomasse fraîche). C'est pour cela que la somme des degrés/jours accumulés entre la date de la fauche et les jours de mesures terrain ou d'acquisition d'images SPOT4&5 pour le calcul du NDVI, renseigne de manière plus pertinente et est donc utilisée pour représenter nos résultats.

Formule : Σ (degrés/jours) = Σ jours accumulés (T° M – T°S)

Avec T ° M = Température moyenne journalière
T°S= Température seuil de la variété de graminée représentative

Ainsi donc plusieurs paramètres sont pris en compte :

- Pour chaque parcelle d'étude (fauches et pâtures confondues) il faut déterminer le nombre de jours qui sépare la précédente fauche **ou** la libération de la parcelle par la rotation du cheptel (qui sera notre « 0 »), et les différentes dates de mesures terrains et d'acquisition d'images SPOT 4& 5. Ainsi sur une seule et même courbe toutes les parcelles seront représentées au même stade de développement.

- La somme des degrés/jours accumulés prend en compte la température, donc l'altitude des parcelles. Pour cela il faut avoir accès, sur la période de notre étude (entre le 10 mars et le 15 juillet) aux températures moyennes journalières. Cette information est archivée sur le site de ***« Margouill@ »*** pour la filière canne à sucre, ou chaque station météorologique est répertoriée. Étant donné la répartition de nos parcelles sur la zone du Tampon et de la Plaine des Cafres, nous choisirons deux stations météorologiques :

  - ✓ LE TAMPON CIRAD : 860 m d'altitude

Numéro de la station	Nom de la Station	Jour	Température moyenne
97422466	Le Tampon Pk14	10/03/2011	21,3
97422466	Le Tampon Pk14	11/03/2011	21,4
97422466	Le Tampon Pk14	12/03/2011	20,9
97422466	Le Tampon Pk14	13/03/2011	21,9
97422466	Le Tampon Pk14	14/03/2011	21,3
97422466	Le Tampon Pk14	15/03/2011	21,9
97422466	Le Tampon Pk14	16/03/2011	22,2
97422466	Le Tampon Pk14	17/03/2011	21,6
97422466	Le Tampon Pk14	18/03/2011	21,3
97422466	Le Tampon Pk14	19/03/2011	21,7
97422466	Le Tampon Pk14	20/03/2011	21,6
97422466	Le Tampon Pk14	22/03/2011	20,2

  - ✓ LA PLAINE DES CAFRES : 1550 m d'altitude

Numéro de la station	Nom de la Station	Jour	Température moyenne
97422440	Plaine des Cafres	10/03/2011	17,7
97422440	Plaine des Cafres	11/03/2011	17,3
97422440	Plaine des Cafres	12/03/2011	16,3
97422440	Plaine des Cafres	13/03/2011	17,3
97422440	Plaine des Cafres	14/03/2011	16,4
97422440	Plaine des Cafres	15/03/2011	16
97422440	Plaine des Cafres	16/03/2011	15,9
97422440	Plaine des Cafres	17/03/2011	15,5
97422440	Plaine des Cafres	18/03/2011	15,2
97422440	Plaine des Cafres	19/03/2011	16,7
97422440	Plaine des Cafres	20/03/2011	17,7
97422440	Plaine des Cafres	21/03/2011	17,5
97422440	Plaine des Cafres	22/03/2011	17,4

Extrait des températures moyennes journalières des stations du Tampon et de la Plaine des Cafres.

- Un gradient de température doit être appliqué également pour prendre en compte l'écart de mesures qui sépare la station météo (ou est prise la température) et celle de la parcelle. Ce gradient est de l'ordre **-0.75 °C tous les 100 m**. (Chopart *et al.,* 2002). C'est grâce à la BD ALTI 10m que nous connaitrons avec précision l'altitude des parcelles d'étude.

- Enfin, tous les sites de notre étude sont des parcelles ou l'on retrouve un mélange complètement hétérogène de graminées à la fois tropicale comme le « Kikuyu » et tempéré comme le « Dactyle » ou le « Chloris ». Après conseil auprès d'agronomes de l'INRA (Jean Pierre Theau, Pablo Cruz et Michel Duru qui travaillent sur des outils de modélisation de la pousse de l'herbe « HERB'AGE ») et (Vincent Blanfort du CIRAD de Guyane) nous avons choisis de prendre la graminée la plus représentative de chaque parcelle et d'appliquer sa température seuil (T°S) à savoir (Ivory et Whiteman, 1978), (Johnson et Thornley, 1985) :

  - ✓ 8 °C pour le Kikuyu
  - ✓ 5 °C pour le Dactyle
  - ✓ 8 °C pour le Chloris

Tous les paramètres concernant nos parcelles sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Exploitation	Parcelle	Altitude (m)	Altitude de la station météo (m)	Gradient (°)	Variété graminée
SICALAIT	1 F	1585	La Plaine des Cafres = 1550	-0,262	Dactyle
SICALAIT	1P	1595	La Plaine des Cafres = 1550	-0,337	Kikuyu
SICALAIT	2P	1595	La Plaine des Cafres = 1550	-0,337	Kikuyu
SEDAEL	1 F	730	Le Tampon = 850	0,9	Kikuyu

SEDAEL	2 F	830	Le Tampon = 850	0,15	Kikuyu
SEDAEL	1P	770	Le Tampon = 850	0,6	Kikuyu
HOARAU	1 F	1440	La Plaine des Cafres = 1550	0,825	Kikuyu
CORRE	1 F	1000	Le Tampon = 850	-1,125	Kikuyu
CORRE	1P	1050	Le Tampon = 850	-1,5	Kikuyu
PICARD	1 F	1595	La Plaine des Cafres = 1550	-0,337	Dactyle
PICARD	1P	1600	La Plaine des Cafres = 1550	-0,375	Dactyle
PICARD	2P	1600	La Plaine des Cafres = 1550	-0,375	Dactyle
PICARD	3P	1600	La Plaine des Cafres = 1550	-0,375	Dactyle
PICARD	4P	1600	La Plaine des Cafres = 1550	-0,375	Dactyle

Les sommes degrés/jours accumulés pour chaque parcelle d'études sont répertoriées ci-dessous :

- Pour les pâtures :

Pâtures	Dates rotation D= Départ/R=Retour	Dates terrain	Nombre jours	Somme des degrés/jours	Biomasse g/2,5 m²	Hauteur herbe m/2.5m²
SICALAIT						
1P	D = 03/06 ; R = 08/07	07/06/11	4	41,5	127,5	10,75
1P	D= 03/06 ; R = 08/07	17/06/11	14	168,5	198	15,475
1P	D = 03/06 ; R = 08/07	30/06/11	27	326,8	385	31,75
2P	D = 17/06 ; R = 20/07	17/06/11	1	6,1	154,7	17,775
2P	D = 17/06 ; R = 20/07	30/06/11	13	150,6	262,5	21,75
2P	D = 17/06 ; R = 20/07	13/07/11	26	286,4	282,5	17,9
SEDAEL						
1P	D = 20/05 ; R = 17/06	23/05/11	3	44,9	117,5	10,8
1P	D = 20/05 ; R = 17/06	07/06/11	18	306,2	217,5	15,375
CORRE						
1P	D = 03/05 ; R= 16/05	05/05/11	2	43,7	243,75	14,8
1P	D = 03/05 ; R= 16/05	13/05/11	10	191,3	297,75	15,31
PICARD						
1P	D = 06/05 ; R = 31/05	19/05/11	13	175,925	423,33	39,2
1P	D = 06/05 ; R = 31/05	30/05/11	24	317,225	720	42,58
2P	D = 28/05 ; R = 30/06	30/05/11	2	29,625	165	20,28
2P	D = 28/05 ; R = 30/06	21/06/11	24	300,825	580	39,44
2P	D = 28/05 ; R = 30/06	29/06/11	32	398,025	961,66	41,23
3P	D = 03/06 ; R = 24/06	06/06/11	3	40,825	358	24,8
3P	D = 03/06 ; R = 24/06	21/06/11	18	229,325	836	41,8
4P	D = 06/06 ; R = 27/06	21/06/11	15	193,125	700	37,9
4P	D = 28/06 ; R= 19/07	29/06/11	1	17,425	257,5	21,35
4P	D = 28/06 ; R= 19/07	12/07/11	14	157,525	697,5	31,2

Pâtures	Dates rotations D= Départ/R=Retour	Dates SPOT	Nombre jours	Somme des degrés/jours	NDVI
SICALAIT					
1P	D = 03/06 ; R = 08/07	09/06/11	6	66,1	219
1P	D= 03/06 ; R = 08/07	24/06/11	21	250,2	224
1P	D = 03/06 ; R = 08/07	04/07/11	31	373,3	232
2P	D = 17/06 ; R = 20/07	24/06/11	7	74	216
2P	D = 17/06 ; R = 20/07	04/07/11	17	197,1	232
2P	D = 17/06 ; R = 20/07	14/07/11	27	294,5	225
SEDAEL					
1P	D = 20/05 ; R = 17/06	21/05/11	1	8,9	211
1P	D = 20/05 ; R = 17/06	30/05/11	10	169,4	225
1P	D = 20/05 ; R = 17/06	09/06/11	20	341,7	226
CORRE					
1P	D = 03/05 ; R= 16/05	08/05/11	5	99,8	221
PICARD					
1P	D = 06/05 ; R = 31/05	08/05/11	2	34,625	226
1P	D = 06/05 ; R = 31/05	21/05/11	15	200,725	236
1P	D = 06/05 ; R = 31/05	30/05/11	24	317,225	236
2P	D = 28/05 ; R = 30/06	30/05/11	2	29,625	229
2P	D = 28/05 ; R = 30/06	09/06/11	12	149,925	228
2P	D = 28/05 ; R = 30/06	24/06/11	27	334,025	236
3P	D = 06/05 ; R = 02/06	08/05/11	2	34,625	232
3P	D = 06/05 ; R = 02/06	21/05/11	15	200,725	238
3P	D = 06/05 ; R = 02/06	30/05/11	24	317,225	238
3P	D = 03/06 ; R = 24/06	09/06/11	6	78,425	226
3P	D = 03/06 ; R = 24/06	24/06/11	21	262,525	233
4P	D = 06/06 ; R = 27/06	09/06/11	3	42,225	229
4P	D = 06/06 ; R = 27/06	24/06/11	18	226,325	237
4P	D = 28/06 ; R= 19/07	04/07/11	6	76,525	233
4P	D = 28/06 ; R= 19/07	14/07/11	16	173,925	239

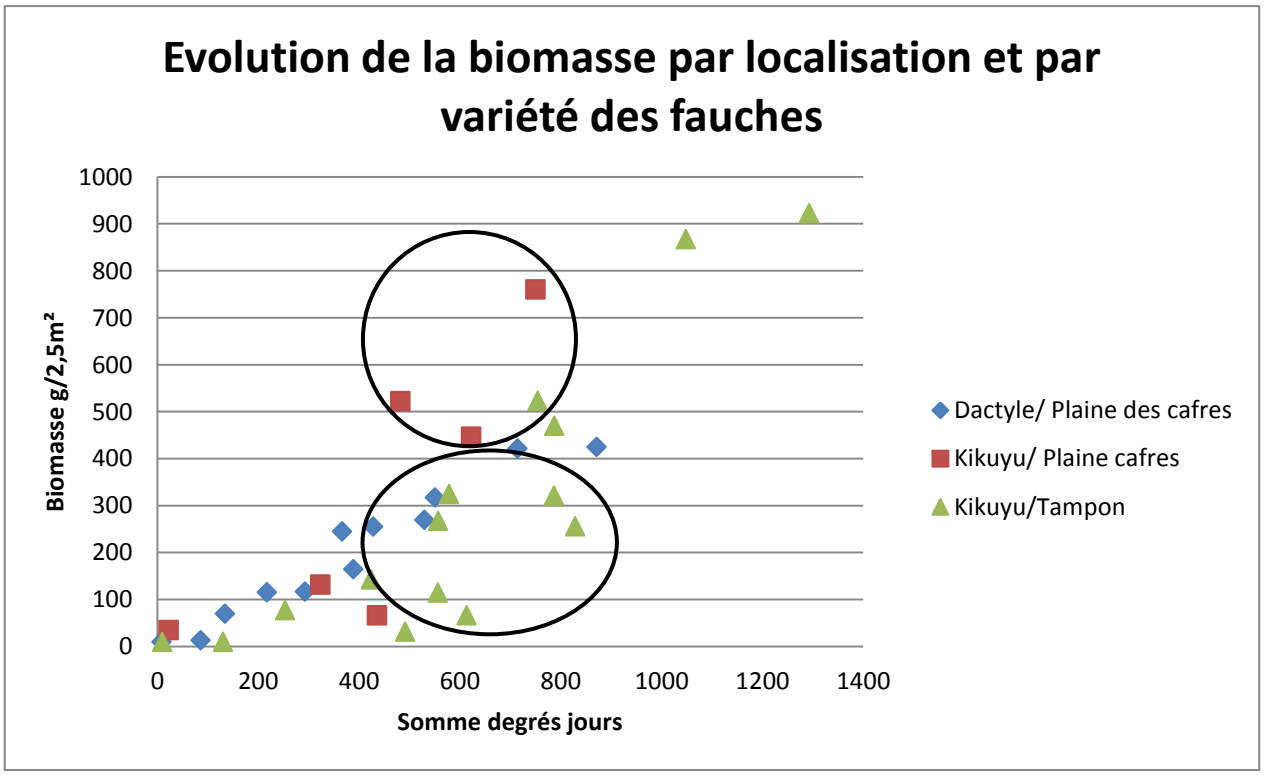
- Pour les fauches :

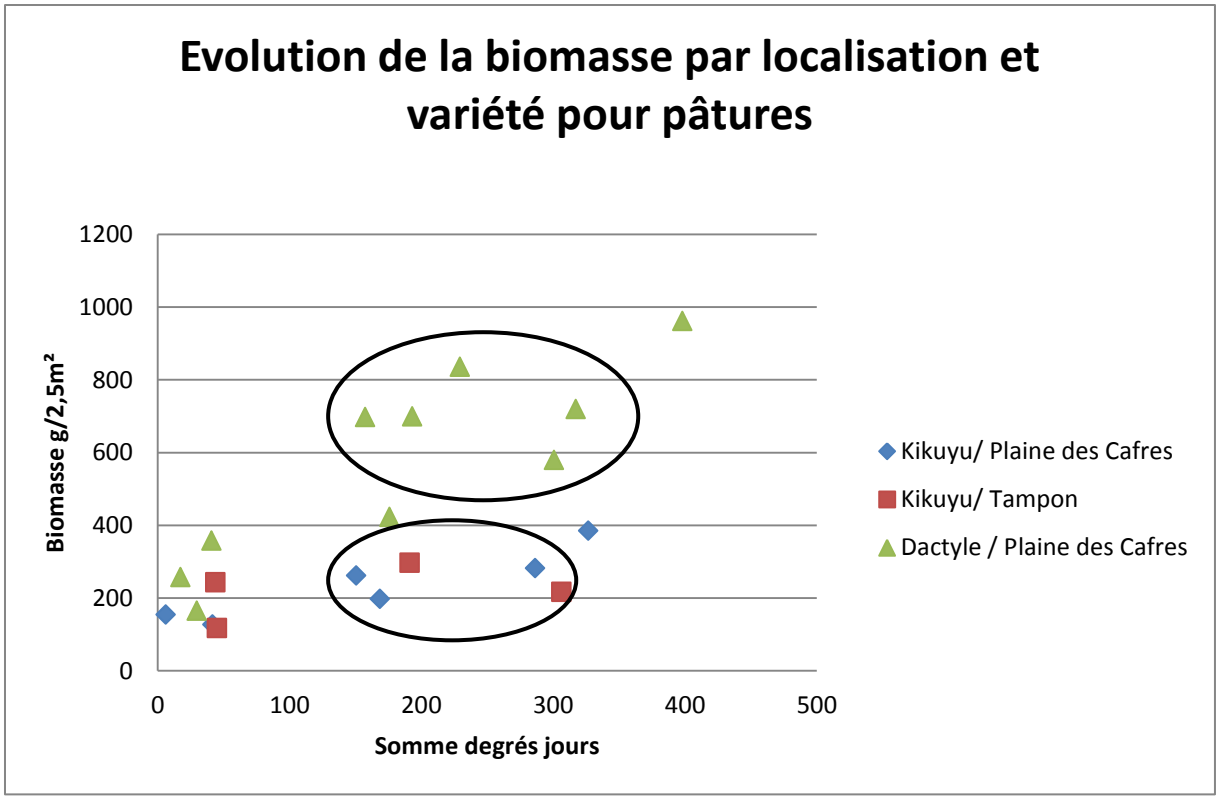
Fauches	Dates fauches	Dates terrains	Nombre jours	Somme des degrés/jours	Biomasse g/2.5m²	Hauteur d'herbe cm/2.5m²
SICALAIT						
1 F	11/04/11	20/05/11	25	366,4	317,1	39,6
1 F	11/04/11	06/05/11	39	550,5	245	29,9
1 F	06/06/11	07/06/11	1	8,26	10	11,8
1 F	06/06/11	17/06/11	11	134,3	70	16,293
1 F	06/06/11	30/06/11	24	292,6	116,5	18,21
1 F	06/06/11	13/07/11	37	428,4	255	19,51
SEDAEL						
1 F	11/04/11	10/05/11	29	556,3	115	15,5
1 F	11/04/11	23/05/11	42	787	321,5	24,77
1 F	11/04/11	07/06/11	56	1048,3	867,5	41,675
1 F	11/04/11	21/06/11	70	1292,7	922,5	47,9
2 F	11/04/11	10/05/11	29	557,1	267,5	27,2
2 F	11/04/11	23/05/11	42	787,7	470	44,5
2 F	06/06/11	07/06/11	1	9,5	10	11,9
2 F	06/06/11	21/06/11	15	253,8	77,5	20,3
2 F	06/06/11	01/07/11	25	423,5	142,5	22,5
2 F	06/06/11	11/07/11	35	578,9	325	29,82
HOARAU						
1 F	04/04/11	03/05/11	29	435,825	66,1	21,5
1 F	04/04/11	17/05/11	43	622,625	446,7	39,1
1 F	04/04/11	27/05/11	53	749,825	760	49,3
1 F	27/05/11	31/05/11	4	22,2	35,29	14,85
1 F	27/05/11	22/06/11	26	323,325	131,76	22,14
1 F	27/05/11	11/07/11	45	481,925	522,35	31,22
CORRE						
1 F	09/04/11	18/05/11	39	754,775	523,3	50
1 F	25/05/11	01/06/11	7	130,675	10	11,25
1 F	25/05/11	22/06/11	28	491,875	31,33	16,9
1 F	25/05/11	29/06/11	35	613,275	66	20,8
1 F	25/05/11	13/07/11	49	829,075	256	19,23
PICARD						
1 F	21/04/11	06/05/11	15	217,163	115,36	18,2
1 F	21/04/11	19/05/11	28	388,463	164,28	25,41
1 F	21/04/11	30/05/11	39	529,763	269,28	31,5
1 F	21/04/11	14/06/11	54	714,663	421,43	37,98
1 F	21/04/11	27/06/11	67	871,463	425	37,08
1 F	04/07/11	12/07/11	8	85,663	12,86	13,5

Fauches	Dates fauches	Dates SPOT	Nombre jours	Somme degrés/jours	NDVI
SICALAIT					
1 F	11/04/11	23/04/11	12	184,7	229
1 F	11/04/11	08/05/11	27	396,4	233
1 F	11/04/11	21/05/11	40	565,5	233
1 F	11/04/11	30/05/11	49	678,7	233
1 F	06/06/11	09/06/11	3	32,86	201
1 F	06/06/11	24/06/11	18	215,9	217
1 F	06/06/11	04/07/11	28	339,1	224
1 F	06/06/11	14/07/11	38	436,5	227
SEDAEL					
1 F	11/04/11	23/04/11	12	237,1	207
1 F	11/04/11	08/05/11	27	521,2	214
1 F	11/04/11	21/05/11	40	751	232
1 F	11/04/11	30/05/11	49	911,1	237
1 F	11/04/11	09/06/11	58	1083,8	233
1 F	11/04/11	24/06/11	73	1342,4	232
2 F	11/04/11	23/04/11	12	237,8	210
2 F	11/04/11	08/05/11	27	521,9	234
2 F	11/04/11	21/05/11	40	751,7	238
2 F	11/04/11	30/05/11	49	912,3	240
2 F	06/06/11	09/06/11	3	44,9	206
2 F	06/06/11	24/06/11	18	303,6	223
2 F	06/06/11	04/07/11	28	475,9	228
2 F	06/06/11	14/07/11	38	619,9	233
HOARAU					
1 F	04/04/11	23/04/11	19	293,925	214
1 F	04/04/11	08/05/11	34	505,625	238
1 F	04/04/11	21/05/11	47	671,725	240
1 F	27/05/11	30/05/11	3	31,225	214
1 F	27/05/11	09/06/11	13	151,525	206
1 F	27/05/11	24/06/11	28	347,125	219
1 F	27/05/11	04/07/11	38	409,725	233
1 F	27/05/11	14/07/11	48	507,125	238
CORRE					
1 F	09/04/11	23/04/11	14	293,275	233
1 F	09/04/11	08/05/11	29	577,375	235
1 F	09/04/11	21/05/11	42	807,175	232
1 F	25/05/11	30/05/11	5	95,375	184
1 F	25/05/11	09/06/11	15	267,675	186
1 F	25/05/11	24/06/11	30	526,275	215
1 F	25/05/11	04/07/11	40	698,675	213
1 F	25/05/11	14/07/11	50	712,275	207

PICARD					
1 F	21/04/11	23/04/11	2	35,463	194
1 F	21/04/11	08/05/11	17	247,163	223
1 F	21/04/11	21/05/11	30	413,263	232
1 F	21/04/11	30/05/11	39	529,763	236
1 F	21/04/11	09/06/11	48	650,063	232
1 F	21/04/11	24/06/11	64	834,163	228
1 F	04/07/11	04/07/11	73	947,263	223
1 F	04/07/11	14/07/11	10	102,063	207

- Analyse de la variance :





Au vu du manque de données à notre disposition, aucun facteur « lieu » ou « variété » ne sera retenu pour la suite de l'étude. A première vue, la Figure A, montre que le Kikuyu à un rendement plus faible en haute altitude. La Figure B montre que le Dactyle (graminée tempéré) à un meilleur rendement en haute altitude que le Kikuyu (graminée tropicale) cette tendance est surement accentuée par le fait que les mesures au champ ont été effectuées en saison fraîche.

Annexe 12 : Statistiques

Valeur 1	Valeur 2	Coefficient de corrélation	Intervalle de confiance	Test significatif	Résultats exploitables
NDVI	Biomasse fraîche	0.7919114	0.6666778 0.8736598	**p-value = 6.04e-13**	**oui**
NDVI	Hauteur d'herbe	0.5397285	0.3441363 0.6904253	**p-value = 2.438e-06**	**oui**
NDVI	Matière sèche	-0.4419534	-0.6256642 -0.2117972	**p-value = 0.0004074**	**oui**
NDVI	Protéins	0.1079598	-0.1396155 0.3428317	p-value = 0.392	non
NDVI	UFL	0.3954974	0.1595688 0.5886881	**p-value = 0.001606**	**oui**
Biomasse fraîche	Hauteur d'herbe	0.8453817	0.7454167 0.9081597	**p-value = 1.776e-15**	**oui**
Biomasse fraîche	matière sèche	-0.4886149	-0.6840403 -0.2277454	**p-value = 0.0006605**	**oui**

Test effectués sous « **R** » afin de juger de la pertinence des corrélations entre paramètres biophysiques et radiométriques.

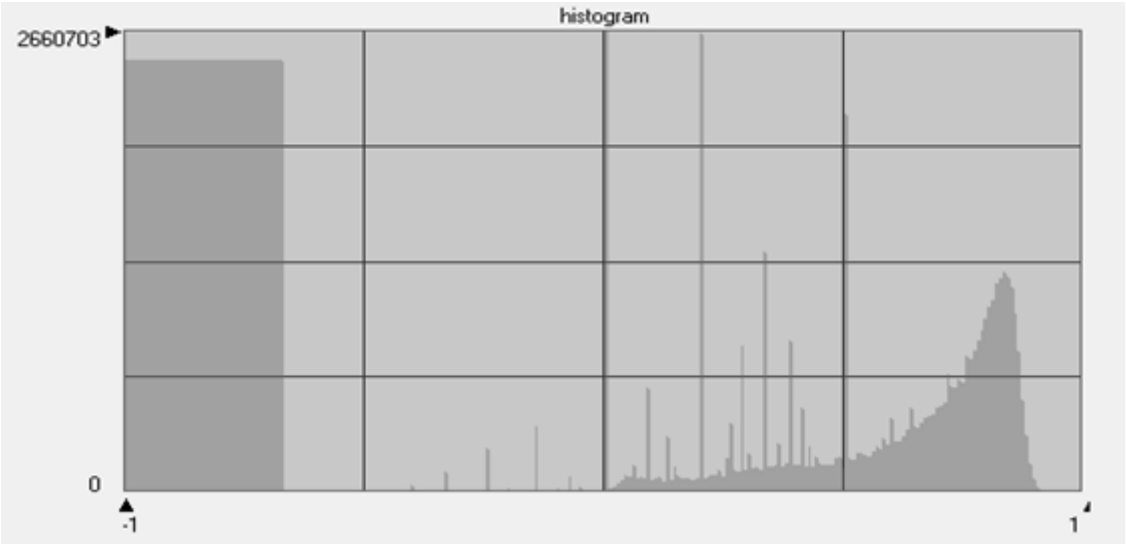
exploitations	parcelles	utilisation	degrés-jours	NDVI	D min2	D min	D max	D max2
PICARD	10	FAUCHE	529,8	236			529,8	
PICARD	10	FAUCHE	650,1	232		529,8	714,7	
PICARD	10	FAUCHE	834,2	228		714,7	871,5	
PICARD	10	FAUCHE	947,3	223	714,7	871,5		
PICARD	11	PÂTURE	34,625	226			175,925	317,225
PICARD	11	PÂTURE	200,725	236		175,925	317,225	
PICARD	11	PÂTURE	317,225	236			317,225	
PICARD	12	PÂTURE	29,625	229			29,625	
PICARD	12	PÂTURE	149,925	228		29,625	300,825	
PICARD	12	PÂTURE	334,025	236		300,825	398,025	
PICARD	13	PÂTURE	34,625	232			40,825	229,325
PICARD	13	PÂTURE	78,425	226		40,825	229,325	
PICARD	13	PÂTURE	200,725	238		40,825	229,325	
PICARD	13	PÂTURE	262,525	233	40,825	229,325		
PICARD	14	PÂTURE	42,225	229		17,425	157,525	

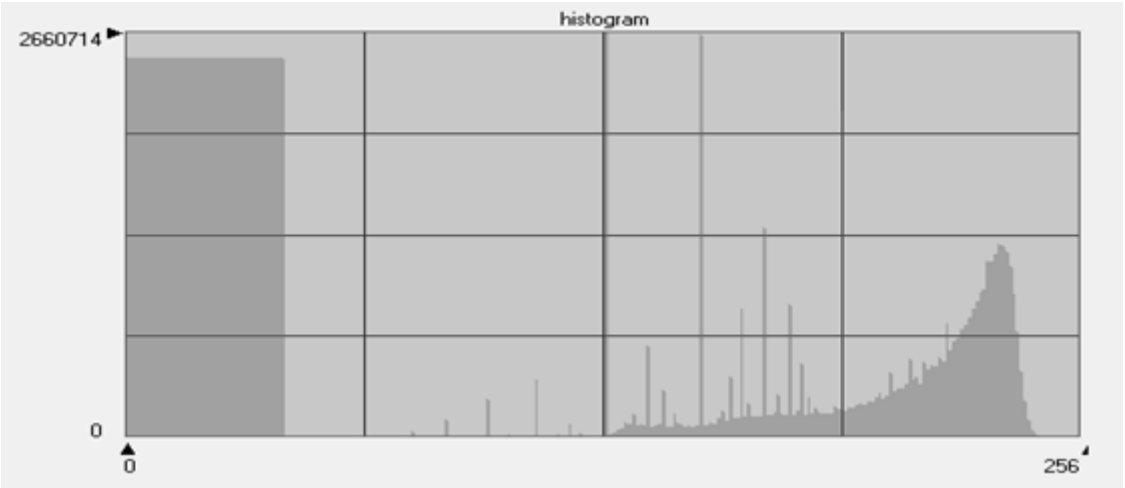
R min2	R min	R max	R max2	Rdt 1	Rdt 2	Rdt 3	Rendement
		269,28		269,28			269,28
	269,28	421,43		368,2721309			368,2721309
	421,43	425		424,1507589			424,1507589
421,43	425				426,7258036		426,7258036
		423,33	720			126,66	126,66
	423,33	720		475,3994692			475,3994692

		720		720			720
		165		165			165
	165	580		349,0873894			349,0873894
	580	961,66		**710,3612346**			**710,3612346**
		358	836			342,2779841	342,2779841
	358	836		453,3464191			453,3464191
	358	836		**763,4758621**			**763,4758621**
358	836				**920,1888594**		**920,1888594**
	257,5	697,5		335,3872234			335,3872234

Exemple de calculs statistiques effectués afin de déterminer les valeurs de biomasses fraîches (rendements) manquantes. En effet, les dates de mesures au champ ne correspondent pas avec celle d'acquisition des images SPOT. Il faut donc extrapoler les valeurs manquantes par régressions linéaires.

Annexe 13 : Histogramme de la distribution des pixels d'une image SPOT 4 en mode « *continuous* » (vraies valeurs) et en mode « *thematic* » (valeurs ré-échantillonnées)





La distribution des pixels (NDVI médian) sur les deux images est considérée comme identique. En effet la différence est de l'ordre de 11 pixels sur 2660714, soit une variation de l'ordre de 0,0004 %. Ainsi, les pixels de l'image « *continuous* » (16bits) donnant les vraies valeurs de NDVI médian comprises entre -1 et +1 et ceux de l'image de type « *thematic* » (8bits) ou les valeurs de NDVI médianes sont ré-échantillonnées entre 0 et 256 ont la même distribution sur l'image.

Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'étudier les potentialités de la télédétection en jugeant de la pertinence de l'utilisation de l'indice de végétation NDVI, dans le calcul du rendement fourrager des systèmes prairiaux réunionnais. Nous avons utilisé une base de données d'images multi temporelles SPOT 4 et 5 (entre avril et juillet 2011) et organisé le déroulement et la mise en place d'un protocole de mesures au champ pour suivre l'évolution de certains paramètres biophysiques descriptif de l'état du couvert des prairies (biomasse fraiche et sèche, hauteur d'herbe).

Les résultats ont montré qu'il est possible d'estimer le rendement fourrager (biomasse fraiche) à partir de l'indice de végétation normalisé NDVI. Les paramètres tels que la hauteur d'herbe et la matière sèche sont également corrélés au NDVI de façon significative ce qui permet, entre autres, de juger de la qualité du fourrage.

La possibilité de suivre les événements de fauches ainsi que le suivi de la variabilité intra et interparcellaire des parcelles peut permettre d'ores et déjà de développer des applications opérationnelles de cartographie dynamique et ainsi apporter un panel de conseils de gestion aux éleveurs. Par la suite, le forçage d'un modèle de croissance des graminées par les valeurs de rendements issues de l'imagerie satellite pourra permettre la mise en place d'une cartographie de prévision de rendement des prairies réunionnaises.

Mots clés : télédétection, NDVI, prairie, rendement fourrager, SPOT, cartographie.

Abstract

The aim of this report is to study the potentialities of remote sensing to calculate the forage yields of the meadows in Reunion Island, by using the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). The use of a data base of multi-temporal remote sensing images SPOT 4 and 5 (between april and july 2011) and field measurements enabled us to follow the evolution of some biophysical parameters describing the state of the field cover (fresh and dry biomass, grass height).

The results showed it is possible to estimate the forage yield (fresh biomass) from the NDVI. The parameters as the grass height and the dry matter are significantly correlated to the NDVI which allow assessing the quality of the forage.

The monitoring of the mowing stages and of the intra and inter-field variability already enable to develop operational applications of dynamic mapping, thereby giving management advices to cattle farmers. Afterwards, forcing a model on the grass growth by the yields values obtained from remote sensing will help to build a forecast mapping of meadow yields at Reunion Island.

Key words: remote sensing, NDVI, meadow, forage yield, SPOT, mapping