



HAL
open science

APPORT DE LA TELEDETECTION AEROSPATIALE POUR L'AIDE A LA GESTION DE LA SOLE CANNIERE REUNIONNAISE

Eric Albert Bappel

► **To cite this version:**

Eric Albert Bappel. APPORT DE LA TELEDETECTION AEROSPATIALE POUR L'AIDE A LA GESTION DE LA SOLE CANNIERE REUNIONNAISE. Biophysique [physics.bio-ph]. Université de la Réunion, 2005. Français. NNT : . tel-00009403

HAL Id: tel-00009403

<https://theses.hal.science/tel-00009403>

Submitted on 7 Jun 2005

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

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

**UNIVERSITE DE LA REUNION
U.F.R. DE PHYSIQUE**

T H E S E

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de La Réunion

Discipline : **Traitement du signal et de l'image**

Présentée et soutenue publiquement

par

Eric BAPPEL

le mardi 1^{er} mars 2005

**APPORT DE LA TELEDETECTION AEROSPATIALE
POUR L'AIDE A LA GESTION
DE LA SOLE CANNIERE REUNIONNAISE**

Directeur de thèse : Jean-Michel STRETTA

JURY

M. S. BALDY	Professeur, Université La Réunion	Président
M. J.C. AUTREY	D Sc, Directeur MSIRI, Ile Maurice	Rapporteur
M. C. PUECH	Directeur de recherche, Cemagref Montpellier	Rapporteur
M. J.M. STRETTA	Chargé de recherche, IRD Montpellier	Directeur de thèse
Mme A. BEGUE	Chargée de recherche, CIRAD Montpellier	Examineur

A ma cousine Myriam, décédée le mercredi 26 avril 2005.

*A tout band réyoné la akey a moin i fé lontan aster,
a in il lé deveni mon rasin e mon kiltir
ke la don a moin anvi travay pou ed ban planteur la kan.*

Remerciements

Je tenais à adresser mes remerciements au CIRAD et à la Région Réunion pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse.



Merci à Robert Domaingue (CIRAD-CA programme Canne), Bernard Siegmund (CIRAD-CA programme Canne), mon directeur de thèse Jean-Michel Sretta (IRD) et ma co-directrice de thèse Agnès Bégué (CIRAD Amis) pour leur soutien technique et méthodologique et leur encadrement scientifique.

Je remercie également les autres membres du jury : Serge Baldy, mon président de jury et mes rapporteurs J.C. Autrey (MSIRI) et Christian Puech (Cemagref).

J'associe à ces remerciements J.F. Martiné (CIRAD-CA programme Canne) et son modèle Mosaicas, Marc Despinoy (IRD) pour son aide lors de la campagne d'acquisition d'images CASI, Yann Buchon (stagiaire ESAP-PURPAN) et Julien Pragout pour leur collaboration lors des mesures de terrain.

Je tiens à remercier tout particulièrement les exploitants qui m'ont accueilli pour me permettre d'acquérir mes données terrain, M. Barau, M. Caruel, M. Cuvelier et M. Kalimoutou. Mes remerciements vont également au CTICS et à la DAF de La Réunion pour les données auxquelles ils m'ont donné accès.



Enfin, je suis très reconnaissant à ma femme Gaëlle et à mes parents pour leur aide et leurs encouragements, quels que soient mes humeurs ou mon découragement.

Résumé

L'objectif de cette thèse est d'étudier les potentialités de la télédétection aérospatiale pour l'aide à la gestion de sole cannière Réunionnaise. Nous avons utilisé une base de données d'images multitemporelles SPOT 4&5 (années 2002 et 2003) et organisé une campagne d'acquisition d'images hyperspectrales CASI en septembre 2002. Simultanément, nous avons assuré le déroulement et la mise en place d'un protocole de mesures au champ pour suivre l'évolution des paramètres biophysiques descriptifs de l'état du couvert de la canne (surface foliaire, taux d'azote, biomasse de la culture) et des paramètres agronomiques (suivi des coupes et des replantations).

Les résultats ont montré qu'il est possible d'estimer la surface foliaire (LAI) à partir de l'indice de végétation normalisé (NDVI) ainsi que le rendement canne à partir de l'indice de végétation NDVI calculé au moment du développement maximal du couvert. Avec les données SPOT, la meilleure estimation du rendement canne à l'échelle parcellaire résulte du couplage entre le modèle de croissance Mosicas et les profils d'évolution de surface foliaire obtenus à partir des images SPOT 4&5. Les données hyperspectrales CASI permettent une meilleure estimation de la surface foliaire et de la biomasse fraîche que les données SPOT 4&5 ainsi qu'une estimation du taux d'azote foliaire qui est, en phase de maturation, un indicateur de richesse en sucre.

La possibilité de discriminer des parcelles de canne en fonction de leurs états de surface (pleine végétation, coupée ou labourée) nous a permis de développer des applications opérationnelles de cartographie dynamique de la sole cannière en temps quasi réel : le suivi des coupes et des replantations.

Mots clés : Télédétection, canne à sucre, indice foliaire, biomasse, multitemporel SPOT, hyperspectral CASI

Abstract

The objective of this thesis is to study the potentialities of remote sensing for sugarcane crop management in Reunion Island. We used a data base of multi-temporal SPOT 4&5 images (2002-2003) and we set up an hyper-spectral CASI campaign in September 2002. At the same time, we organized ground measurements to follow the evolution of sugarcane biophysical parameters (leaf area, nitrogen rate, fresh biomass) and agronomic parameters (harvests and re-plantings).

The results shows that it is possible to estimate leaf area (LAI) using the normalized difference vegetation index (NDVI). We also has highlighted the possibility of estimating the cane yield starting from the vegetation index NDVI calculated at the time of maximum development of the cover. Using the SPOT data, yield estimates, on a field scale, could be improved by combining the growth model Mosicas and leaf area evolution obtained from the SPOT 4&5 images series. The hyper-spectral CASI data give a better estimate of the leaf area and fresh biomass than SPOT 4&5 data, with an estimate of the leaf nitrogen content which is, in phase of maturation, an indicator of sugar concentration.

The ability to discriminate sugarcane fields according to their surface (full vegetation, cut or bare soil) has allowed to develop dynamic cartography of the sugarcane fields at the regional scale in near real time : the harvest and the replanting follow-ups.

Key words : Remote sensing, sugarcane, leaf area index, biomass, multitemporal SPOT, hyperspectral CASI

Table des matières

INTRODUCTION	10
1 ETAT DE L'ART	15
1.1 La canne à sucre	15
1.1.1 <u>Présentation générale</u>	15
1.1.2 <u>Le système de culture cannier à La Réunion</u>	21
1.1.3 <u>Evolution de l'indice foliaire (LAI) de la canne</u>	24
1.1.4 <u>Evolution du taux d'azote foliaire (T_N) de la canne</u>	25
1.2 La géomatique agricole	26
1.2.1 <u>L'agriculture de précision</u>	27
1.2.1.1 Outils et méthodes	27
1.2.1.2 La télédétection en agriculture	29
1.2.2 <u>Estimation des paramètres biophysiques de surface par télédétection</u>	30
1.2.2.1 Estimation de la surface foliaire	31
1.2.2.2 Estimation de la teneur en azote	33
1.2.2.3 Estimation de la biomasse	34
1.3 Utilisation de la télédétection comme outil d'aide à la gestion de la Canne	35
1.3.1 <u>Cartographie de la sole cannière et des états du couvert</u>	35
1.3.2 <u>Estimation de la production</u>	39
2 MATERIELS ET METHODES	41
2.1 les sites d'études	41
2.1.1 <u>Les exploitations agricoles</u>	42
2.1.2 <u>Caractéristiques bio-climatiques</u>	44
2.2 Acquisition des données biologiques et agronomiques	46
2.2.1 <u>Suivi temporel des variables mesurées, approche diachronique</u>	46
2.2.1.1 Sélection et localisation des parcelles suivies	47
2.2.1.2 Protocole de mesures	49
2.2.2 <u>Mesures ponctuelles des variables biophysiques, approche synchronique</u>	50
2.2.2.1 Sélection et localisation des parcelles suivies	50
2.2.2.2 Protocole des mesures effectuées	52
2.2.3 <u>Mesures complémentaires</u>	53
2.3 Prétraitements des données	55
2.3.1 <u>Comparaison des méthodes d'estimation du LAI</u>	55
2.3.1.1 Mesures du LAI avec le LAI-2000	55
2.3.1.2 Mesure indirecte du LAI à partir de la hauteur « htvd »	55
2.3.1.3 Normalisation des mesures de LAI	56
2.3.2 <u>Calcul du T_N</u>	57
2.3.3 <u>Stade croissance : du mois au degrés/jours</u>	58
2.4 Les données radiométriques	60
2.4.1 <u>Le radiomètre Cimel</u>	60
2.4.2 <u>Le spectroradiomètre CASI</u>	62
2.4.2.1 Choix des bandes spectrales	62

2.4.2.2	Pré-traitements des images CASI	64
2.4.3	<u>Les images SPOT</u>	66
2.4.3.1	Choix des images de la série temporelle.....	66
2.4.3.2	Les pré-traitements des images SPOT	67
3	RESULTATS ET DISCUSSION	81
3.1	Analyses des données.....	81
3.1.1	<u>Analyses des paramètres biophysiques de surface</u>	81
3.1.1.1	Evolution du LAI au cours du cycle	81
3.1.1.2	Evolution du taux d'azote au cours du cycle	82
3.1.1.3	Analyse de variance	83
3.1.1.4	Relation entre les paramètres physiologiques.....	87
3.1.2	<u>Analyse des facteurs de production</u>	91
3.1.2.1	Elaboration du rendement canne.....	91
3.1.2.2	Elaboration du rendement Sucre.....	94
3.1.3	<u>Analyse de l'évolution temporelle du signal radiométrique</u>	96
3.1.3.1	Réponse spectrale en fonction de l'état du couvert	97
3.1.3.2	Le radiomètre CIMEL.....	101
3.1.3.3	Les capteurs HRV et HRG de SPOT4&5	106
3.2	Téledétection et paramètres biochimiques.....	115
3.2.1	<u>Analyse des relations entre réflectances Cimel et paramètres biochimiques</u>	115
3.2.1.1	Fonctions de transfert pour le LAI.....	115
3.2.1.2	Fonction de transfert pour le SPAD.....	117
3.2.2	<u>Analyse multitemporelle</u>	118
3.2.2.1	Estimation de la surface foliaire	119
3.2.2.2	Suivi de la biomasse fraîche	120
3.2.2.3	Estimation de la valeur de SPAD.....	124
3.2.3	<u>Analyse hyperspectrale</u>	125
3.2.3.1	Les indices de végétation.....	126
3.2.3.2	Les régressions linéaires multiples	129
3.3	Téledétection et utilisation d'un modèle de production.....	134
3.3.1	<u>Application/test du modèle Mosaic sur nos sites d'études</u>	134
3.3.2	<u>Intégration des données de téledétection dans le modèle</u>	136
3.3.3	<u>Comparaison des simulations avec et sans forçage</u>	137
3.4	Discussion sur les principaux résultats.....	139
3.4.1	<u>Apport de l'information multitemporelle SPOT 4&5</u>	139
3.4.2	<u>Apport de l'information hyperspectrale CASI</u>	140
4	APPLICATIONS POUR LA FILIERE	143
4.1	Le suivi des coupes et des replantations	143
4.1.1	<u>Développement méthodologique du suivi des coupes</u>	144
4.1.1.1	Caractérisation spectrale de la coupe de la canne.....	144
4.1.1.2	Suivi des coupes par détection des changements dans le MIR.....	146
4.1.1.3	Suivi des coupes par classification multispectrale.....	148
4.1.2	<u>Application au suivi de la campagne de coupe 2003, île de La Réunion</u>	150
4.1.2.1	Estimation du taux d'avancement de la coupe à partir de la différence des couches MIR	150

4.1.2.2	Estimation du taux d'avancement de la coupe par classification multispectrale.....	153
4.1.3	<u>Validation des produits cartographiques et statistiques</u>	155
4.1.3.1	Validation du produit cartographique à partir d'observations de terrain...	156
4.1.3.2	Comparaison des produits statistiques	157
4.1.4	<u>Estimation des surfaces replantées</u>	160
4.2	Cartes thématiques descriptifs de l'état du couvert.....	162
4.2.1	<u>Suivi multitemporel et cartographie multispectrale des paramètres</u>	162
4.2.1.1	Cartographie de la surface foliaire	162
4.2.1.2	Cartographie des rendements potentiels	165
4.2.2	<u>Cartographie hyperspectrale du couvert</u>	169
4.2.3	<u>Carte de variabilité inter-parcellaire</u>	171
4.3	Discussion sur les applications pour la filière	173
4.3.1	<u>Suivi des coupes et des replantations</u>	173
4.3.2	<u>Cartographie des paramètres descriptifs de l'état du couvert</u>	174
	CONCLUSION.....	177
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	181
	GLOSSAIRE.....	196
	Liste des figures.....	198
	Liste des tableaux.....	204
	ANNEXES	206

INTRODUCTION

En 2001, sur l'ensemble de l'île de La Réunion, on observe 49 114 ha de surface agricole utilisée (SAU) comprenant 26 944 ha de surface en canne (soit 55 % de la SAU, Agreste). Les diversifications principales sont la prairie, l'arboriculture fruitière et les cultures légumières. La structure des exploitations agricoles est en mutation rapide puisque, entre 1981 et 1997, le nombre total d'exploitations a chuté de 50%. Aujourd'hui, 27 000 hectares produisent environ 1,8 millions de tonnes de cannes « usinables » par an. La récolte est acheminée vers deux usines qui produisent annuellement environ 200 000 tonnes de sucre et plus de 70 000 hectolitres de rhum.

Les agriculteurs cultivant la canne à sucre sont près de 4 200 sur l'île, mais la production est très inégalement répartie entre les exploitations. D'une manière générale, les exploitations de l'ouest sont dix fois plus petites que celles de l'est de l'île (Martignac et Pariente, 2002). Les exploitations sont réparties en deux catégories : d'une part, les industriels sucriers et certains propriétaires terriens qui possèdent de grandes plantations à proximité des usines, d'autre part, les exploitations de petites surfaces représentées par la plupart des producteurs de l'île. La filière canne est encadrée par la Direction de l'Agriculture et de la forêt (DAF), chargée de l'application de la politique agricole départementale émanant des politiques agricoles nationales et européennes. Le soutien technique aux agriculteurs est, quant à lui, assuré par la Chambre d'Agriculture et le Centre Technique Interprofessionnel de la Canne à Sucre (CTICS).

Dans un premier temps, l'objectif retenu par les pouvoirs publics pour la filière est d'atteindre une production de 250 000 tonnes de sucre à l'horizon 2010. A terme, cela permettrait à La Réunion de réaliser son quota de production garanti par l'Union européenne, soit 295 000 tonnes de sucre (Martignac et Pariente, 2002). Le développement de la filière est donc orienté vers une augmentation de sa compétitivité grâce à une augmentation de la production associée à une réduction des coûts de production. Cette augmentation de la production passe par une meilleure gestion à tous les niveaux de la filière, et donc par des prises de décisions reposant sur des informations à jour, rapidement mobilisables, exhaustives et objectives.

Les besoins en information sont différents suivant les acteurs de la filière.

Les industriels désirent affiner les prévisions de rendement et suivre l'évolution des campagnes de récolte en temps réel à différents moments de la campagne. Pendant la récolte, pour des raisons de conservation de la canne, les usines fonctionnent en permanence et à flux tendus. La gestion des approvisionnements nécessite des informations précises sur la quantité de cannes à traiter. Les estimations actuelles sont essentiellement basées sur les déclarations des agriculteurs.

Les grands planteurs possèdent des systèmes d'information plus ou moins élaborés concernant leurs parcelles. Ils sont cependant demandeurs d'informations spatialisées pour améliorer le système de gestion de leurs plantations et optimiser les interventions culturales (traitements azotés et phytosanitaires, replantation). Leurs besoins en information sont plutôt d'ordre agronomique à l'échelle intra et inter parcellaire.

Les collectivités locales ont également leurs impératifs. La Direction de l'Agriculture et de la Forêt est tenue d'établir pour 2005 un système de déclaration de surface graphique, en réponse à la nouvelle réglementation européenne. La DAF souhaite intégrer dans son système d'information des images satellites à très haute résolution spatiale en complément des photographies aériennes déjà utilisées. Cette innovation permettra de faciliter les déclarations graphiques des agriculteurs grâce à un fond de carte récent acquis dans l'année. D'autre part, la Chambre d'agriculture est intéressée par la cartographie des systèmes de culture et des anomalies de croissance sur l'ensemble du territoire et par la prévision précoce des rendements. Ces données serviraient à apporter une aide technique plus précise et à évaluer le plus tôt possible les subventions et compensations éventuelles à verser.

La filière canne, dans son ensemble, est donc tout d'abord demandeuse d'outils permettant de suivre l'évolution de la culture au cours de son cycle. Les différentes phases du cycle de la canne peuvent être caractérisées par des variables biologiques couramment utilisées en télédétection : la surface foliaire (ou LAI pour Leaf Area Index) et la teneur en azote des feuilles (T_N) comme indicateurs du développement du couvert végétal. Ces caractéristiques permettraient de répondre aux besoins des acteurs de la filière canne en terme d'estimation de rendement, nécessaire avant le début de la campagne pour répartir les quotas de récolte aux exploitants.

Une deuxième demande s'est exprimée pour le développement d'outils d'aide au suivi de la récolte, principalement de la part des usiniers (gestion du transport des balances vers les usines, modulation de la capacité des usines en fonction des volumes restant à traiter,

estimation des dates de fin de campagne). La sole cannière réunionnaise étant répartie en plus de 4200 exploitations agricoles, il est difficile de faire remonter une information sur l'état d'avancement de la coupe de chaque exploitation vers les usines. La télédétection permettrait d'extraire ce type d'information à grande échelle en temps réel. Un système d'information géographique pourrait calculer les statistiques d'avancement de la coupe à différents niveaux géographiques (bassins cannier, centres de livraison, communes...).

C'est dans ce contexte très porteur d'innovation que le CIRAD a développé des actions de recherches en télédétection. En effet, le CIRAD et Spot Image se sont associés pour développer des outils d'aide à la gestion de la filière à partir de données multi-spectrales et multi-temporelles des satellites SPOT¹. La Réunion est un site pilote sur lequel le système d'information dédié à la filière canne (de l'acquisition de l'image à la diffusion des informations chez les utilisateurs) est mis au point et testé.

Plusieurs actions sont donc menées dans ce sens, parmi lesquelles le projet SUCRETTE (SUIvi de la Canne à sucRE par TélédéTEction). Ce projet de 2 ans (2002-2004), financé par le Ministère de la Recherche (Réseau Terre et Espace), vise à proposer un système de suivi de la canne à sucre par télédétection satellitaire. Il a pour but de cartographier des indicateurs représentatifs de l'état des cultures et l'estimation des rendements. Ce projet est essentiellement à caractère opérationnel, ayant comme finalité de proposer aux acteurs de la filière canne des produits concrets améliorant leurs capacités de gestion de la sole cannière.

Parallèlement au projet SUCRETTE, la base de données [ISLE Reunion](http://medias.obs-mip.fr/isle_reunion/) (Information Satellitaire pour L'Environnement de la Réunion) accessible par internet (http://medias.obs-mip.fr/isle_reunion/) a été mise en place sur l'initiative du CNES en 2002. Son objectif est de donner aux scientifiques de divers domaines (n'utilisant pas obligatoirement la télédétection) la possibilité d'utiliser de façon aisée des données satellitaires adaptées à une problématique, et d'interfacer leurs modèles avec des données spatiales pour développer de nouvelles applications.

Dans ce contexte, la Région Réunion, en partenariat avec le CIRAD, a proposé la réalisation d'une thèse doctorale sur le thème « Apport de la télédétection aérospatiale pour l'aide à la gestion de la sole cannière réunionnaise ». Ce projet de recherche se doit d'associer très étroitement les composantes de la télédétection et celles des systèmes d'informations

¹ Satellite Pour l'Observation de la Terre

géographiques pour créer des systèmes complets de gestion d'une zone agricole bien spécifique. Il est probable que, dans les années à venir, nous verrons ce genre d'applications concerner directement les exploitants agricoles ou tout au moins, les services et sociétés chargés de les aider dans la gestion technique de leurs exploitations.

Ainsi, l'objectif de cette thèse est :

Analyse expérimentale de la dimension spectrale et temporelle de la radiométrie d'un couvert de canne à sucre pour la caractérisation de ses états de surface en terme de paramètres biologiques et d'indicateurs agronomiques.

Les deux principaux axes de recherche de cette thèse sont les suivant :

- **Apport des données hyperspectrales pour l'estimation des paramètres biologiques descriptifs de l'état du couvert de la canne à sucre (surface foliaire, taux d'azote dans les feuilles et biomasse).**
- **Apport des données multispectrales et multitemporelles SPOT 4&5 pour la caractérisation de la dynamique spatio-temporelle de l'état du couvert et du suivi de la production de la canne à sucre.**

Pour répondre à l'axe 1, nous avons organisé une campagne d'acquisition d'images hyperspectrales CASI². Simultanément à cette campagne, les paramètres descriptifs de l'état du couvert ont été mesurés in situ pour évaluer la pertinence de l'outil pour estimer et cartographier ces paramètres.

Dans l'axe 2, nous avons traité une base de données d'images multitemporelles SPOT 4&5 et assuré le déroulement et la mise en place d'un protocole de mesures au champ pour suivre l'évolution des paramètres descriptifs de l'état du couvert de la canne (surface foliaire, taux d'azote, biomasse de la culture) et des paramètres agronomiques (suivi des coupes et des replantations). Le traitement des données est issu d'un couplage entre les données terrain et les images satellites (réflectances enregistrées au sommet de l'atmosphère) afin d'établir des

² Compact Airborne Spectrographic Imager

relations permettant d'estimer et de suivre l'évolution des paramètres descriptifs de l'état du couvert à partir des données satellites.

Pour répondre aux questions soulevées, la première partie du document sera consacrée à la recherche bibliographique sur les caractéristiques du cycle de la canne à sucre et plus particulièrement sur l'évolution de la surface foliaire, du taux d'azote dans les feuilles et de la biomasse. Nous ferons également une revue de l'utilisation de la télédétection pour l'estimation de ces paramètres biophysiques et comme outils de gestion au sens plus large.

La deuxième partie traitera des différents matériels et méthodes utilisés. Les protocoles du suivi temporel multispectral et hyperspectral y sont décrits en détail (sites d'études, implantation des placettes de mesure, méthodes d'acquisition et matériels utilisés ainsi que les différents traitements d'images).

Le traitement et l'analyse des données sont présentés dans une troisième partie.

Enfin, la quatrième partie abordera les applications pour la filière canne découlant des résultats précédents.

1 ETAT DE L'ART

Afin de percevoir l'avancée des recherches sur l'utilisation de la télédétection pour l'aide à la gestion de la canne à sucre, nous avons procédé à une revue des publications existantes traitant des caractéristiques du cycle de la canne à sucre d'une part et de la télédétection appliquée à la gestion d'une culture d'autre part.

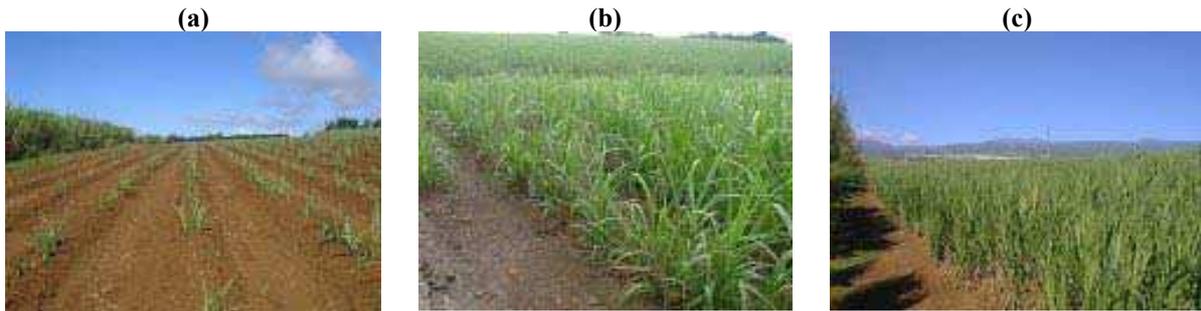
La canne à sucre

La canne à sucre, *Saccharum officinarum*, est une graminée tropicale originaire d'Asie. C'est aujourd'hui l'une des plantes les plus cultivées au monde (19 millions ha) en raison de la demande croissante en sucre.

Après une présentation générale des caractéristiques de la canne à sucre et de sa culture, nous nous intéressons aux paramètres clés de son développement : l'indice foliaire (indicateur de la phase végétative) et le taux d'azote (indicateur de la phase de maturation).

1.1.1 Présentation générale

La consommation mondiale de sucre (124 millions de tonnes en 1999) a été multipliée par quinze depuis 1900 du fait des augmentations de la population et de la consommation annuelle par habitant qui a quadruplé depuis cette date passant de 5,1 à 20,4 kg/habitant/an (Martiné, 2003). Cette évolution a été essentiellement assurée par l'accroissement de production de la canne qui fournit actuellement 70 % du sucre mondial. Elle constitue la source exclusive de sucre pour les pays en développement.



Photographie 1. Champs de canne à sucre à La Réunion, un mois (a), trois mois (b) et six mois (c) après la plantation.

Les propriétés morphologiques et phénologiques de la plante sont présentées en annexe 1.

La canne est une plante pérenne qui se propage généralement par voie végétative. Elle est plantée sous forme de boutures de tiges et les repousses des tiges, après chaque coupe, permettent plusieurs récoltes successives (Figure 1). Le sucre est une réserve carbonée qui s'accumule dans la tige tout au long de la croissance, aussi la date de récolte n'est pas entièrement déterminée par le cycle biologique. Ces traits conduisent à identifier des caractéristiques et une terminologie particulières (Martiné, 2003).

Coupe : récolte d'une parcelle, pratiquée en une seule opération, à un moment décidé à la fois sur des critères biologiques, climatiques, cultureux et industriels. La date de coupe marque la fin d'un cycle de récolte et le début du cycle suivant.

Campagne : période de récolte de l'ensemble des parcelles alimentant une sucrerie.

Cycle de culture ou cycle total : temps écoulé entre deux plantations (2 à 10 ans), comprenant une ou plusieurs coupes (Figure 1).

Cycle de récolte : souvent appelé improprement cycle annuel : temps écoulé entre deux coupes successives ou entre la plantation et la première coupe (Figure 1).

Vierges ou cannes plantées : pousses (tiges) du premier cycle de récolte, issues directement de boutures (plantation).

Repousses : pousses des cycles de récolte suivant une vierge.

Germination : démarrage, en début de cycle de récolte, des bourgeons issus des boutures ou des parties souterraines des tiges coupées.

Tige usinable : portion inférieure de la tige, constituée d'entre-nœuds ayant achevé leur croissance et contenant du saccharose. Elle correspond à la partie envoyée à l'usine.

Maturation : période d'accumulation de sucre qui s'étend de l'apparition de la tige usinable jusqu'à la coupe. Ce terme est aussi employé, dans la pratique, pour désigner une phase

d'accroissement particulier de la concentration en sucre (en fin de cycle), sous l'effet de conditions climatiques ou d'un traitement agronomique.

Rendement canne : masse fraîche de tiges usinables par unité de surface aussi appelé rendement. Dans la pratique, le rendement canne peut incorporer quelques résidus supplémentaires, selon le mode de récolte.

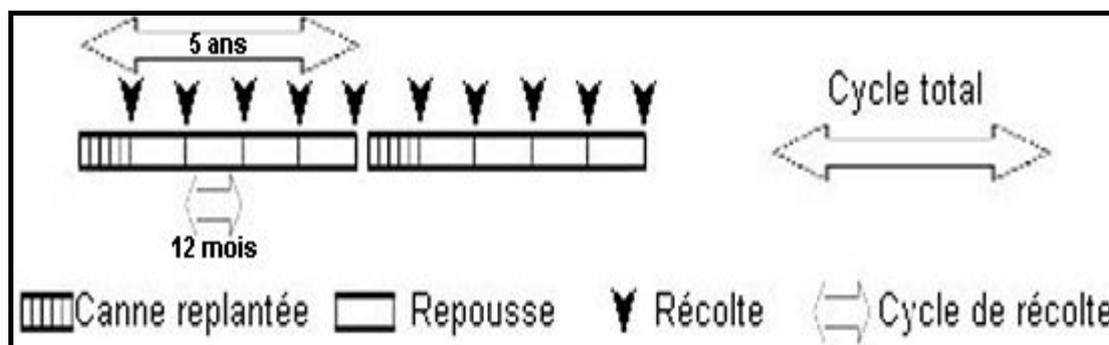


Figure 1. Cycle total et cycle de récolte de la canne à sucre.

Rendement sucre : masse de sucre (saccharose) par unité de surface.

Richesse : concentration de sucre (saccharose en %) dans la tige usinable fraîche.

Fibre : concentration de matières sèches en % (les sucres non compris) dans la tige usinable fraîche. La matière sèche est constituée en majorité de cellulose.

Comme le maïs, le cycle photosynthétique de la canne est du type C_4^3 ; c'est d'ailleurs sur cette plante qu'il a été identifié pour la première fois. Dans les limbes (Figure 2), le CO_2 est fixé dans les cellules du mésophylle, et le saccharose, fabriqué dans les gaines entourant les faisceaux vasculaires, est libéré dans le phloème (Lingle, 1999).

³ C_4 : le premier sucre synthétisé par la plante est composé de quatre atomes de carbone

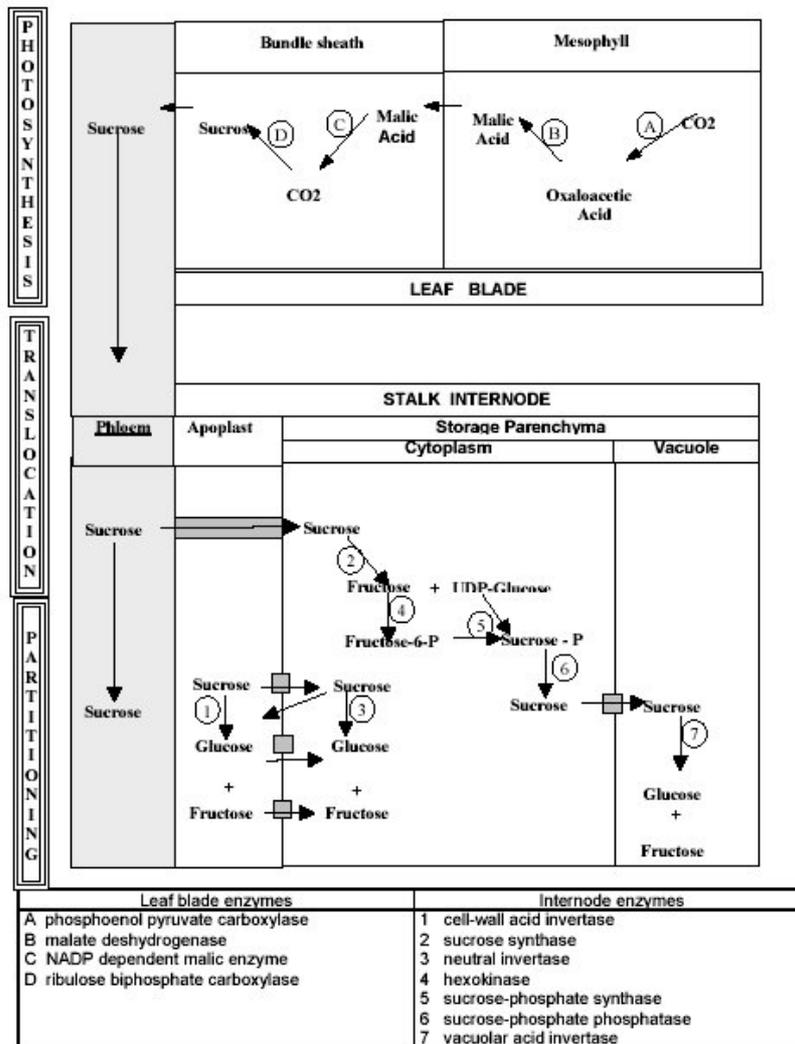


Figure 2. Représentation schématique de l'élaboration du saccharose (Sucrose) dans la feuille, de son transport vers le phloème, et de son métabolisme de stockage dans le parenchyme (dégradation et synthèse) d'après Lingle, 1999.

Le saccharose est ensuite transporté très rapidement (84 cm.h^{-1}) des feuilles vers les tissus de stockage (Hart, 1965; Hartt, 1970). Le mouvement vers le bas peut continuer jusqu'au huitième entre-nœud sous l'insertion de la feuille (Hartt et al, 1963).

Dans la tige, le déchargement du saccharose à partir du phloème, et son métabolisme ultérieur, varient suivant l'âge des entre-nœuds :

- La lignification et la subérisation progressives des cellules entourant le phloème limitent le déchargement du saccharose,
- On observe des processus très complexes et simultanés de dissociation du saccharose en glucose et fructose et de synthèse du saccharose à partir de ces deux sucres. Plusieurs enzymes interviennent dans ces réactions (Figure 2) ; leur abondance et leur

activité dans les entre-nœuds changent suivant leur stade de développement (Moore, 1995). Ainsi, les enzymes de dissociation du saccharose en glucose et fructose, nécessaires à la croissance, sont plus abondantes et actives dans les entre-nœuds en croissance (Celestine-Myrtil et Parfait, 1987; Lingle et Smith; 1991) et très faibles dans les entre-nœuds âgés (Su et al, 1992).

Par ailleurs, les organes de stockage de la canne ne sont pas de simples puits, mais un système très dynamique (Lingle, 1999). Bien que les dissociations et synthèses parallèles du saccharose au sein de la même cellule apparaissent coûteuses en énergie, la présence simultanée de cycles catabolique et anabolique du saccharose permet à la plante de répondre rapidement à des changements environnementaux (Moore, 1995).

Généralement, le transport, la croissance et la partition sont plus sensibles aux facteurs environnementaux (température et pluviométrie) que la photosynthèse (Hartt, 1965). Ainsi, la maturation est le résultat d'une altération plus prononcée du transport et de la partition que de la photosynthèse (Hartt, 1965; Lingle, 1999).

Les précipitations ont une influence négative sur l'accumulation du saccharose en stimulant la croissance au lieu de la maturation (Nyati, 1996). Un stress hydrique et thermique pendant le dernier quart du cycle favorise l'augmentation du rendement final en sucre (Gascho, 1985).

On constate que la richesse saccharine fluctue annuellement en analysant l'évolution de la richesse au cours de la campagne de récolte (Figure 3) de 1999 à 2003 pour les deux bassins canniers de l'île de La Réunion. Globalement, pour les deux bassins canniers, la richesse saccharine augmente au cours de la campagne de récolte. Ce phénomène se reproduit d'année en année. Cependant, la richesse du bassin cannier « Le Gol » (zone sud et ouest de l'île) semble plus constante que celle de « Bois Rouge » (zone nord et est), il y a moins de variation inter-annuelle. L'année 2002 apparaît avec des richesses relativement faibles par rapport aux autres années surtout pour le bassin cannier de « Bois Rouge ».

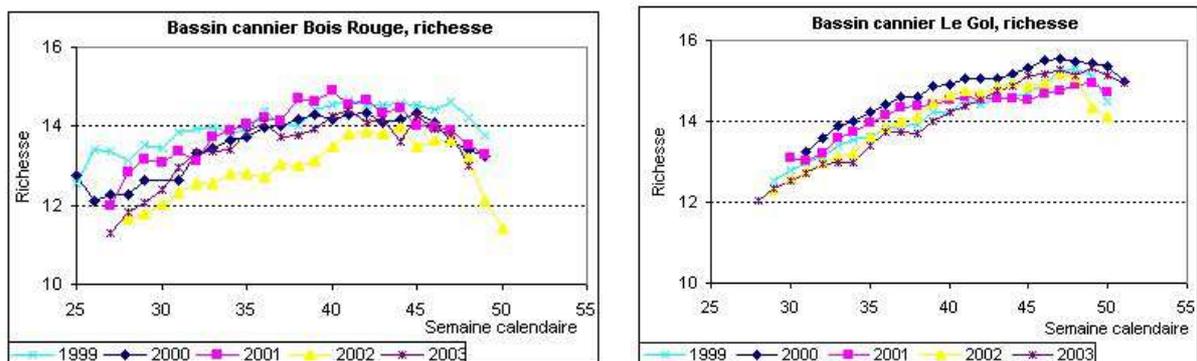


Figure 3. Evolution de la richesse saccharine de 1999 à 2003 pour les deux bassins cannier de l'île de La Réunion, CTICS.

Ces fluctuations différentes en fonction des zones géographiques et des années confirment bien l'influence de facteurs environnementaux sur l'élaboration du rendement sucre. Le cyclone Dina a touché l'île de La Réunion en Janvier 2002 apportant des précipitations excessives particulièrement abondantes sur la partie est de l'île. Ceci explique en partie les faibles richesses saccharine observées en 2002.

Le bassin cannier « Le Gol » est constitué de beaucoup plus de périmètre irrigués que celui de « Bois Rouge ». Le contrôle de l'apport en eau est plus facile en zone irriguée qu'en zone pluviale. De fait, le rationnement en eau, favorisant en fin de cycle la maturation des cannes peut être efficace. En effet, les richesses sont en moyenne plus élevées pour le bassin cannier «Le Gol » que celui de « Bois Rouge ».

L'évolution du tonnage réceptionné par usine et par année peut être analysé (Figure 4). Cependant, on ne pourra pas suivre l'évolution des rendements au cours de la campagne car les tonnages réceptionnés sont fonction de la capacité des usines.

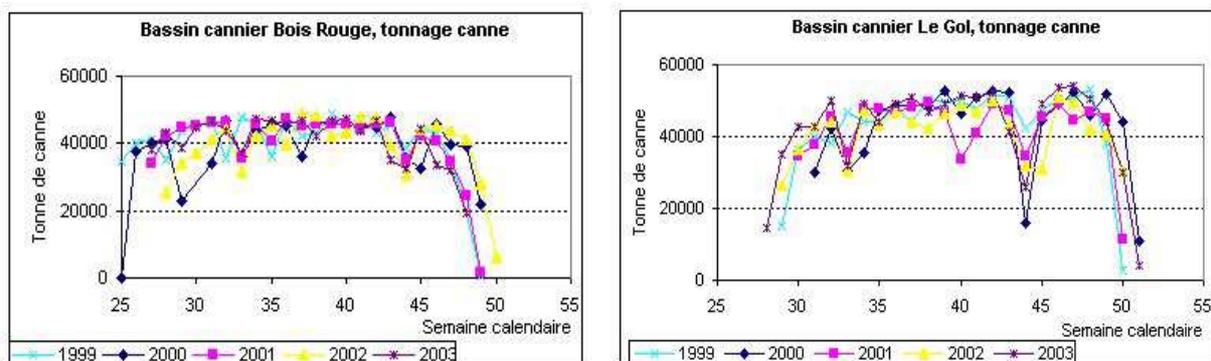


Figure 4. Evolution des tonnages hebdomadaires de canne réceptionnés par bassin cannier de 1999 à 2003, CTICS.

L'évolution des tonnages réceptionnés est comparable pour les deux bassins, une phase de démarrage (mis en place de la logistique) puis stabilisation de la production. Une chute du tonnage de canne réceptionné se remarque à la semaine 44, surtout pour le bassin cannier de l'usine « Le Gol », conséquence du week-end de la Toussaint.

1.1.2 Le système de culture cannier à La Réunion

La première sucrière de l'île de la Réunion fût construite en 1785 à Saint-Benoit par Laisné de Beaulieu, elle fût sans lendemain car détruite trois ans plus tard par un "coup de vent". La crise persistante du café et l'importante détérioration des cafétérias de l'île par les cyclones incita certains colons à tenter l'aventure de la canne à sucre. Dès lors, les sucrières de la Réunion (à l'époque île Bourbon) connurent un boom, surtout à partir de 1817, année où Charles Desbassayns équipa son moulin du Chaudron d'une machine à vapeur; ce faisant, la fabrication du sucre devenait une industrie. A l'apogée de cette aventure, en 1834, le nombre d'usines atteignait les 194.

Aujourd'hui, il reste deux usines sucrières sur l'île, l'usine de Bois Rouge et l'usine du Gol, et l'agriculture réunionnaise repose essentiellement sur la canne à sucre. La production annuelle s'élève à environ 200 000 tonnes, celle-ci couvre environ 25 600 ha, soit 50 % des terres cultivables.

Malgré une réduction des surfaces cultivées, la canne à sucre occupe une place importante dans l'économie de la Réunion, qui connaît actuellement une évolution plus dynamique que celle des autres départements d'Outre-mer. La filière canne-sucre représente la première source de revenus à l'exportation après le tourisme. Elle est aussi la première industrie agroalimentaire de l'île.

Les plantations ont lieu généralement de novembre à mars (période chaude et pluvieuse). Le cycle de culture moyen a pu être abaissé à 8,3 ans et devrait tendre vers un optimum économique de 7 à 8 ans soit une vierge suivi de 6 à 7 repousses (Figure 6). L'âge des cannes à la récolte varie de 10 à 18 mois avec une majorité entre 11 et 13 mois (annexe 3).

La récolte ou campagne, opération la plus exigeante en travail, se déroule de juillet à décembre. La main d'œuvre agricole, de plus en plus rare et chère, met en péril de nombreuses exploitations et entraîne un effort de mécanisation, avec différentes solutions en fonction de la pente du terrain. Un mois avant le début de la campagne, l'usine doit, en se

fondant sur les estimations individuelles de production, définir le quota journalier que pourra fournir chaque agriculteur (production par nombre de jours de campagne). Le prix de la tonne de canne livrée dépend de sa richesse et de la richesse moyenne des livraisons de la même période.

La zone irriguée (Figure 5) représente actuellement 6700 ha (un quart des surfaces de canne) concentrés sur la région sèche du sud-ouest (bras de La Plaine et bras de Cilaos). A ces surfaces, grâce au basculement de l'eau des cirques de Mafate et Salazie (de la zone humide à l'est à la zone sèche à l'ouest de l'île), devraient s'ajouter prochainement 5200 ha (un cinquième des surfaces de canne) situés entre 0 et 660 m d'altitude dans la zone ouest.

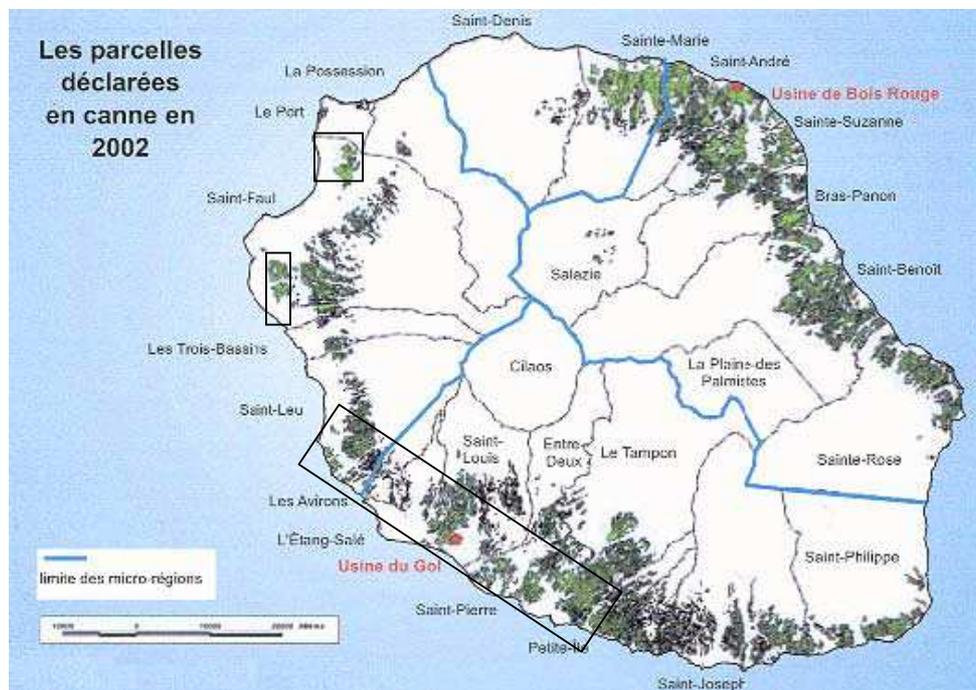


Figure 5. Carte de la sole cannière réunionnaise, les encadrés délimitent les périmètres irrigués (D.A.F., 2002).

Cependant, certaines saisons particulièrement sèches et la concurrence de l'eau d'habitation conduisent à des rationnements en eau de plus en fréquents et nécessitent une optimisation de la gestion de l'eau.

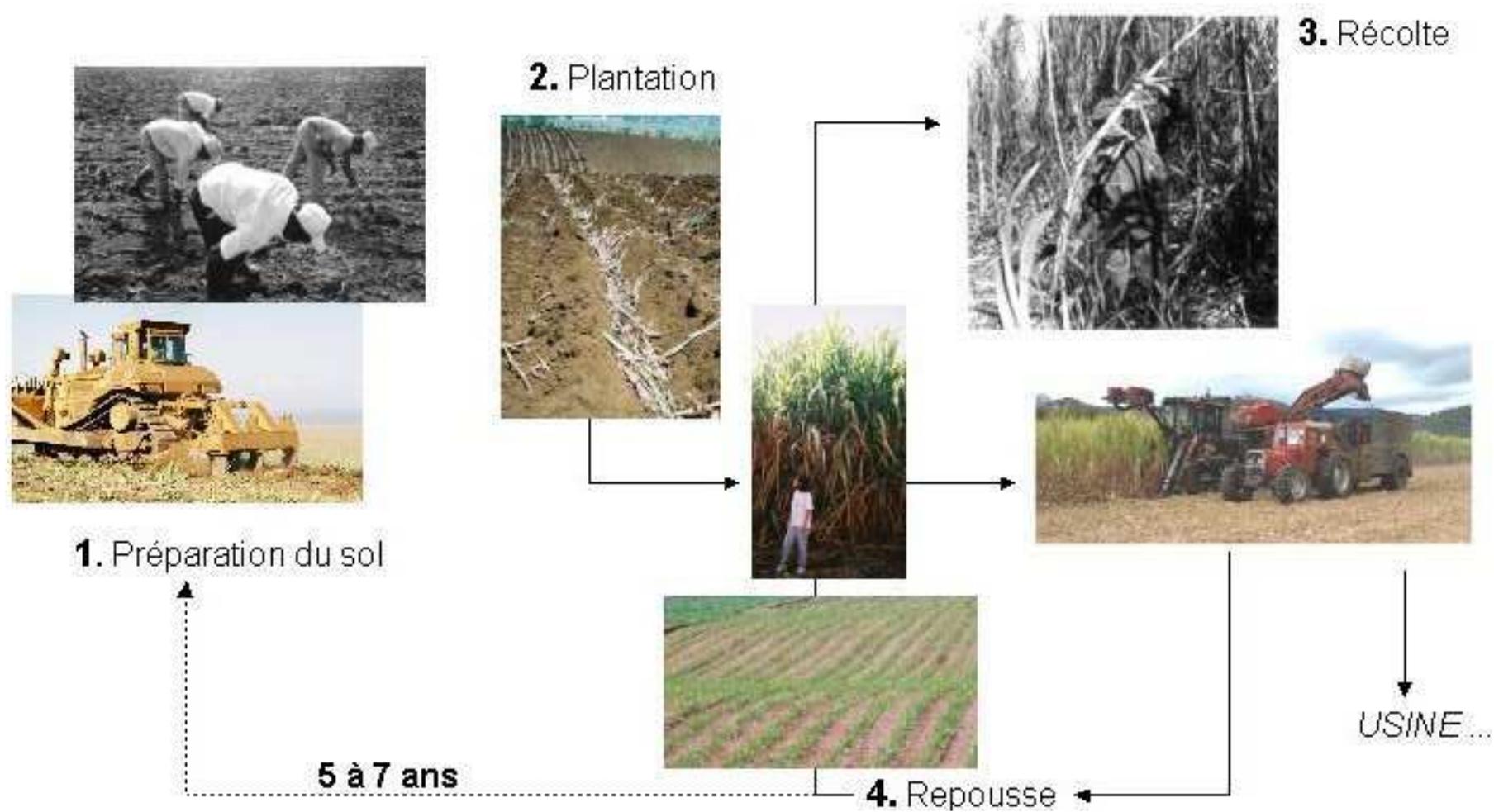


Figure 6. Schématisation du cycle total et du cycle de récolte de la canne à sucre à La Réunion.

1.1.3 Evolution de l'indice foliaire (LAI) de la canne

L'indice foliaire ou LAI (Leaf Area Index) d'un couvert végétal est un paramètre adimensionnel. Il représente l'aire totale des faces supérieures des feuilles par unité de surface de sol. Ce paramètre constitue une caractéristique clé de la structure de la végétation en raison du rôle des feuilles chlorophylliennes dans de nombreux processus biologiques et physiques. La surface des feuilles est un facteur déterminant concernant l'assimilation du carbone. L'évaluation du LAI fournit donc un indicateur du potentiel de croissance de la plante (Weiss, 1998) et il est largement utilisée dans les modèles de fonctionnement de la végétation.

Il existe peu d'études traitant du LAI de la canne à sucre. Récemment, le programme *Canne à sucre* du CIRAD-Réunion a lancé un projet visant à mettre en place un modèle de simulation de la croissance de la canne basé sur le LAI (Martiné, 2003).

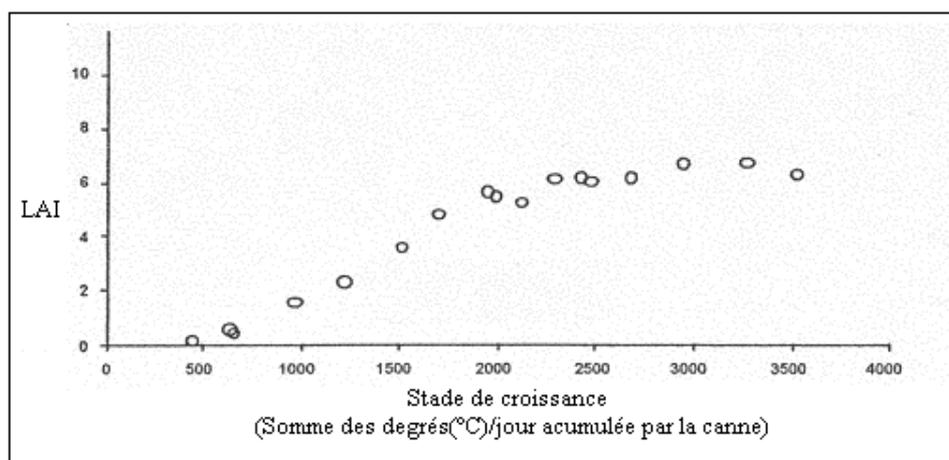


Figure 7. Evolution du LAI de la canne à sucre réunionnaise (Martiné, 2003).

On remarque sur la Figure 7 que le LAI de la canne suit deux phases. Il progresse régulièrement lors des premiers stades de croissance et ce jusqu'à 2000 – 2500 degrés/jour (4 à 6 mois) où il se stabilise autour d'une valeur de 6. L'estimation du LAI est significative pour la première phase puisque la stabilisation après 2500 degrés/jour n'apporte aucune information sur les changements de l'état de la plante. Cette estimation permet d'évaluer le début crucial du cycle : le tallage et le développement du couvert végétal.

La mesure du LAI peut être obtenue rapidement grâce à un appareil de mesure : le LAI-2000 Plant Canopy Analyzer de la société LI-COR®. L'avantage de cet appareil est de fournir des

estimations rapides et non destructives du LAI, à partir de mesures directionnelles de rayonnement intercepté par le couvert végétal (Welles et Norman, 1991).

1.1.4 Evolution du taux d'azote foliaire (T_N) de la canne

L'azote (N) est de loin le plus important nutriment qui contrôle le développement du couvert végétal et il constitue un élément essentiel des parois cellulaires, des protéines cytoplasmiques, des acides nucléiques et de la chlorophylle, en plus de bien d'autres composants. Il joue donc un rôle important dans le taux de développement des feuilles, la taille définitive et la longévité de celles-ci, la formation et la survie des talles ou des branches, ainsi que dans la productivité finale.

Les apports azotés sont de plus en plus raisonnés et dépendent de l'état azoté du couvert. Ce dernier est évalué à partir de la mesure du contenu en chlorophylle des feuilles à certains stades du développement de la culture (Baret, 1999).

Au cours de la croissance et de la maturation de la canne à sucre, la teneur en azote des feuilles diminue continuellement. Cette diminution présente deux phases distinctes (voir Figure 8) : le T_N des feuilles diminue d'abord progressivement pour ensuite accentuer fortement sa décroissance lorsque la canne rentre en maturation.

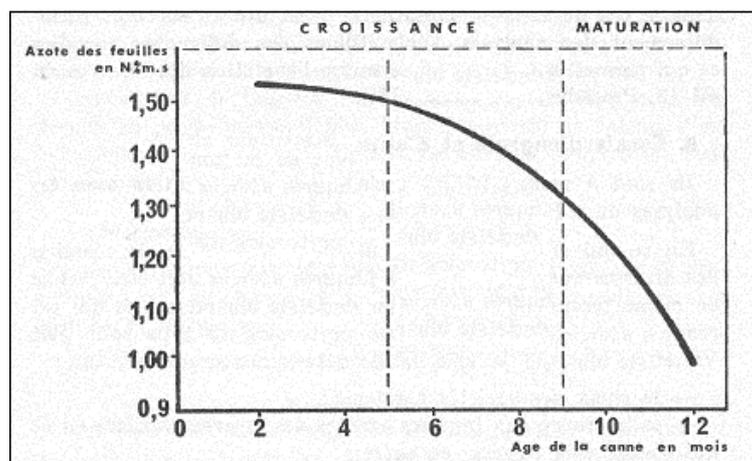


Figure 8. Evolution du T_N des feuilles pour une culture de canne à Porto Rico (Fauconnier et Bassereau, 1970).

L'évolution du T_N des feuilles étant liée à la croissance et à la maturation de la plante, son estimation doit permettre d'évaluer le degré de maturité de la canne. Le suivi temporel du T_N

doit donc être réalisé en priorité sur les derniers mois du cycle de croissance de la canne pour suivre son état de maturation. En effet, des travaux de recherche (Borden, 1948; Stevensen *et al.*, 1992) ont montré qu'une quantité excessive d'azote disponible en fin de cycle, au moment de la récolte, avait un impact négatif sur le rendement en sucre. Il a même été démontré qu'un apport d'azote effectué sur des repousses de plus de 15 semaines peut diminuer significativement le rendement final en sucre (Das, 1936; Borden, 1942, 1944; Samuels, 1965 ; Hurney, 1984; Wood, 1990 ; Chapman, 1994). Ce phénomène est accentué par l'humidité du sol : l'azote diminuera d'autant plus le rendement sucre que l'eau dans le sol est disponible (Cheema *et al.*, 1970). Il a été mis en évidence que l'effet de l'azote sur le rendement canne et sur le rendement sucre dépend du niveau d'irrigation, de la quantité d'eau disponible pour la plante (Wiedenfeld, 1995, 2000).

Ainsi, les apports azotés augmentent le rendement canne et diminuent la richesse saccharine (Reddy *et al.*, 1978 ; Muchow *et al.*, 1996). Cependant l'effet positif de l'azote sur le rendement canne semble être plus important que son effet négatif sur la richesse saccharine (Wiedenfeld, 2000). Il existe donc un intérêt stratégique à la connaissance de l'état azoté de la canne : optimiser les apports en azote pour maximiser le rendement canne final sans compromettre une bonne teneur en sucre des cannes.

Le SPAD-502, produit par MinoltaTM, mesure de manière instantanée un indice lié à la teneur en chlorophylle (indice de T_{Chl}), lui-même relié au T_N des feuilles. Les valeurs obtenues augmentent proportionnellement avec le taux de chlorophylle dans les feuilles (Schepers *et al.*, 1992 ; Dwyer *et al.*, 1994 ; Smeal *et al.*, 1994 ; Westcott *et al.*, 1995, Richardson *et al.*, 2002). Cet indice est obtenu à partir des propriétés optiques des feuilles.

L'indice foliaire et le taux d'azote sont donc les deux indicateurs primordiaux représentatifs du stade de développement de la canne à sucre.

La géomatique agricole

Lorsque la géomatique est utilisée pour l'application adaptée des intrants aux besoins spécifiques des cultures dans les champs, elle ouvre la porte à de nouvelles pratiques agricoles regroupées sous l'appellation « agriculture de précision » (Viau, 2000a).

1.1.5 L'agriculture de précision

Nous allons maintenant voir quel rôle peut jouer la télédétection dans une agriculture de précision et comment cette technique permet d'estimer les paramètres biophysiques descriptifs de l'état d'une culture.

1.1.5.1 *Outils et méthodes*

L'agriculture de précision est un concept récent qui affiche un objectif agronomique (amélioration du rendement et de la qualité des produits) et économique, tout en cherchant à préserver l'environnement (meilleure utilisation des intrants). Elle illustre la volonté d'ajuster les pratiques culturales au plus près des besoins des plantes, en tenant compte de leur variabilité spatiale intra et inter parcellaire. Pour mettre en application les différents concepts reliés à l'agriculture de précision, des outils spécialisés sont nécessaires. La géomatique est, comme d'autres disciplines, porteuse de solutions pour l'agriculture de précision. La géomatique, discipline née au début des années 1980, a pour but d'intégrer les moyens d'acquisition et de gestion des données à référence spatiale (Beaulieu *et al.*, 1990). Elle fait appel aux sciences et aux technologies reliées à l'acquisition, au stockage, au traitement et à la diffusion des données à caractère géographique.

Les objectifs de la géomatique agricole sont de procurer des outils de positionnement et de mesure précis, de gérer l'information géographique, de permettre le suivi des cultures, d'évaluer le rendement, de détecter les maladies et de soutenir la prise de décision pour une agriculture durable (CRAAQ, 2003). Le panel d'outils qu'offre la géomatique agricole pour l'agriculture de précision comprend plusieurs composantes (Stombaugh et Shearer, 2000). L'avènement du GPS à la fin des années 1970, combiné avec la capacité accrue des micro-ordinateurs, fut notons-le, le pivot technologique issu de la géomatique et a donné l'élan à l'agriculture de précision (Atherton *et al.*, 1999 ; Stafford, 2000).

Les technologies géomatiques les plus fréquemment utilisées en agriculture sont le GPS (Global Positioning system), les capteurs de rendement, les images satellites, les photographies aériennes, ainsi que les systèmes d'information géographique (Groupe Céréalières de France, 1999 ; Viau, 2000b ; CRAAQ, 2003). Ces différents outils permettent

de recueillir des informations diverses qui serviront à établir des stratégies d'agriculture de précision (voir Tableau 1). Le GPS est utilisé pour géoréférencer les différentes données recueillies. Son utilisation est omniprésente dans toutes les facettes de l'agriculture de précision. Il permet entre autres le suivi temporel des paramètres suivis au champ, en repérant le positionnement des points de mesure en coordonnées géographiques (Atherton *et al.*, 1999). Les différents capteurs peuvent, quant à eux, mesurer les volumes de grains ou le poids, la conductivité électrique du sol ou sa teneur en matière organique, la présence de végétation et leurs caractéristiques (Groupe Céréaliers de France, 1999). Leur utilisation repose habituellement sur une approche en deux temps qui demande de récolter l'information avant de la compiler en une carte afin de guider les interventions à mener. Par opposition, une approche en temps réel mesure les paramètres, traite l'information et gère une action appropriée sur le site même (Stombaugh et Shearer, 2000).

Les différentes technologies présentées dans le Tableau 1 génèrent une grande quantité d'informations accessibles au producteur agricole pour éclairer sa prise de décision, par exemple en terme de gestion des fertilisants.

Tableau 1. Technologies de la géomatique utilisées en agriculture de précision.

Technologie	Outils	Information générée disponible en agriculture
GPS	GPS et DGPS	coordonnées X,Y
		géoréférence
		modèles numériques de terrain
		cartes topographiques
télédétection	photographies aériennes	cartographie et plans de ferme
		analyses géographiques
	capteur dans le visible	calculs de superficie
		suivi des cultures
	capteur dans l'infrarouge	détermination des stades phénologiques
		indice de végétation
mesure de conductivité électrique du sol	capteur Veris	contenu en matière organique
		détection de mauvaises herbes
capteur numérique	capteur de rendement	paramètres physiques du sol
		flux et volume de grain
systèmes informatiques	systèmes d'information géographique	carte de rendement (lorsqu'utilisé avec un GPS)
		gestion de l'information à caractère spatial

Les principaux produits informationnels issus des technologies géomatiques et des bases de données à référence spatiale sont les cartes de sol, les cartes de rendement, les cartes topographiques et les modèles numériques de terrain, les cartes de fertilité du sol et les cartes de localisation des éléments (CRAAQ, 2003). Elles servent à planifier les interventions

classifiées comme étant de l'agriculture de précision telle l'application à taux variable de semences, d'herbicides ou de fertilisants (Stombaugh et Shearer, 2000).

Des différentes sources disponibles résultent une grande quantité d'informations mais il y a un manque de procédures pour les exploiter. En fait, il y a plus d'informations disponibles que ce que le producteur peut gérer. Les techniques actuelles impliquant beaucoup de temps, de connaissances et de fonds, il y a un besoin de développer des outils de caractérisation rapides pour permettre à l'agriculture de précision de s'étendre (Stafford, 2000). Les besoins actuels en géomatique agricole se résument en une solution de caractérisation des cultures qui opérera en temps réel, qui aura une bonne résolution et dont le traitement pourra être automatisé (Atherton *et al.*, 1999).

1.1.5.2 La télédétection en agriculture

Le domaine agricole est un consommateur de données de télédétection principalement à cause du grand territoire qui est couvert par ses activités. Les grandes surfaces agricoles ne sont gérées et exploitées que par peu de personnes et les caractéristiques des cultures y sont en constante évolution dans le temps, ce qui fait de la télédétection une source d'information privilégiée dans ce milieu (Moran *et al.*, 1994).

Les apports de la télédétection au monde agricole sont nombreux et variés. Historiquement ce sont les photographies aériennes qui constituent le premier support de télédétection utilisé en agriculture. Elles sont utilisées depuis longtemps pour cartographier les cultures et effectuer des plans de ferme, utiles pour les mesures de superficies et des potentiels de rendements à des fins de prime d'assurance (Régie des Assurances agricoles du Québec, 1997).

Aujourd'hui, la recherche s'oriente plus vers la caractérisation du contenu d'une parcelle (état de couvert) que ses limites (contours des parcelles). L'utilisation de la réflectance comme indicateur de la concentration d'azote dans les productions agricoles en est encore à ses débuts (Schröder *et al.*, 2000). Elle permet la détection des stress chez certains végétaux bien avant d'autres techniques (Carter *et al.*, 1996). Pour leur part, les images de réflectance dans le proche infrarouge permettent de détecter les variations spatiales à l'intérieur des champs

agricoles tels que les types de sol, les stress nutritifs et les différences de rendement (Chaerle et Straten, 2000).

Il est fréquent d'utiliser des rapports de bandes dérivées des mesures de réflectance, communément appelés des indices, pour arriver à discriminer certaines caractéristiques des végétaux (Lichtenthaler *et al.*, 1998). Les indices de végétation ont connu un essor important dans les années 1980 alors que la plupart des chercheurs dans le domaine s'affairaient à développer des outils d'aide à l'interprétation (Bariou *et al.*, 1985). De multiples indices basés sur la réflectance des feuilles sont toujours utilisés pour évaluer la surface totale des feuilles par unité de surface, estimation particulièrement utile pour la prévision des récoltes.

La combinaison de plusieurs sources d'information telles que les données météorologiques et les images satellites, permet d'obtenir des indices plus complexes. Les indices de sécheresse, découlant des indices de végétation constituent également une utilisation agronomique de la télédétection. La combinaison des données météorologiques, des données sur l'utilisation du sol et des images de télédétection permet de déterminer un indice qui peut ensuite être intégré dans des modèles agro-météorologiques de planification (Vogt *et al.*, 2000).

La télédétection apporte une information permettant le suivi des productions agricoles et l'aide à la décision des différentes opérations culturales.

1.1.6 Estimation des paramètres biophysiques de surface par télédétection

L'estimation des paramètres biophysiques d'une culture par télédétection fait appel aux propriétés optiques des couverts végétaux. Les bases physiques de la télédétection et ses applications sont présentées en annexe 4 et 5.

L'observation des cultures à partir des satellites permet d'estimer un certain nombre de caractéristiques qui peuvent être classées selon deux aspects principaux :

- **La structure du couvert** : Le LAI est la variable de structure la plus importante. Elle caractérise en effet le potentiel d'absorption d'énergie et d'échange avec l'atmosphère.

- **Les propriétés optiques des feuilles :** Ces propriétés sont liées aux caractéristiques biochimiques des feuilles (teneur en azote, chlorophylle, eau...).

Ces variables biophysiques peuvent être utilisées comme indicateurs pour moduler un certain nombre d'opérations culturales. Leur estimation doit être dynamique c'est-à-dire qu'un véritable suivi dans le temps doit être effectué tout au long du cycle cultural. Il est possible d'obtenir par interpolation ou extrapolation les variables biophysiques à certains stades critiques ou bien détecter des indicateurs de problèmes potentiels : stress, maladies,... (Baret, 1999).

Le défi, du point de vue de la télédétection, consiste à isoler les effets de la teneur en pigments chlorophylliens des feuilles sur la réflectance spectrale observée de ceux attribuables à d'autres caractéristiques du couvert, notamment sa structure et les proportions optiques du sol lorsque le couvert n'est pas fermé.

1.1.6.1 Estimation de la surface foliaire

L'évolution du LAI a été étudiée à partir de modèles de transfert radiatif reproduisant les propriétés optiques d'un couvert de blé (Goel et Thompson, 1984), de soja et de maïs (Goel et Grier, 1987) et sur différents sites de production expérimentaux de blé (Asrar *et al.*, 1985). Les résultats (Figure 9) montrent que lorsque le LAI augmente, la réflectance diminue dans le visible et augmente dans le proche infrarouge (PIR). Cependant, dans les deux cas, un palier de saturation apparaît au delà duquel l'accroissement du LAI n'a plus d'effet sur le comportement spectral du couvert.

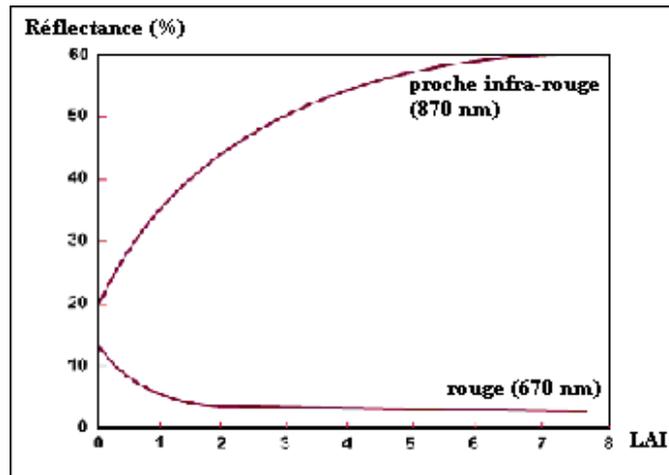


Figure 9. Comportement spectral d'un couvert végétal dans le rouge et le pIR en fonction du LAI (CNERTA, 2003).

Ces résultats encourageants ont poussé les chercheurs à utiliser des indices de végétation, combinant les réflectances dans le rouge et le proche infrarouge (pIR), pour déterminer l'évolution du LAI de manière plus précise, tout en diminuant les effets de la contribution spectrale du sol et des variations d'éclairement de la surface (Baret et Guyot, 1991).

Parmi les plus connues, citons les indices RVI et NDVI (Rouse *et al.*, 1974) qui sont significativement corrélés aux changements d'état des couverts végétaux, et notamment à l'évolution du LAI (Myneni *et al.*, 1997). L'indice SAVI (Huete, 1988) et MSAVI (Qi *et al.*, 1994) ont l'avantage d'être moins sensibles à la contribution spectrale du sol. La formulation de ces différents indices de végétation est donnée en annexes 5 et 10.

Les travaux scientifiques se sont étendus aux essais en plein champ sur d'autres productions comme le maïs ou le haricot (Price et Bausch, 1995 ; Pacheco *et al.*, 2001a), à l'utilisation de modèles de réflectance de canopée plus élaborés (Qi *et al.*, 2000) associés à l'étude quasi-totale du spectre (Zarco-Tejada, 2000) et à des capteurs aéroportés de résolution spectrale plus fine (Boegh *et al.*, 2002).

Les capteurs hyper-spectraux aéroportés proposent des images enregistrées dans plusieurs fines bandes spectrales (largeur : environ 2 nm). Cette finesse de résolution spectrale autorise l'estimation plus précise des valeurs de LAI (Lelong *et al.*, 1998 ; Pacheco *et al.*, 2001b). Ainsi, des indices de végétation générés à partir de mesures de réflectances hyperspectrales ont permis d'estimer le LAI avec une gamme de précision très variables d'après Baret et Guyot (1991), Chen (1996) et Brown *et al.* (2000).

Récemment, Haboudane *et al.* (2004) a mis en évidence l'avantage d'utiliser des données hyperspectrales CASI pour l'estimation du LAI dans un contexte d'agriculture de précision. L'estimation du LAI a été obtenue en utilisant des indices de végétation calculés à partir des réflectances enregistrées par le CASI pour plusieurs cultures (maïs, blé et soja). Les coefficients de détermination obtenus entre les différents indices et les mesures de LAI, ainsi que les erreurs quadratiques moyennes, sont présentés au Tableau 2.

Tableau 2. Caractéristiques des régressions entre les valeurs de LAI observées et estimées à partir d'indices de végétation (Haboudane, 2004).

Spectral index	Slope	Intercept	r^2	RMSE
<i>Soybean</i>				
MTVI2	1.010	+ 0.138	0.98	0.28
MSAV1	1.071	+ 0.040	0.97	0.43
RDVI	1.195	- 0.061	0.95	0.75
TVI	1.445	- 0.142	0.80	1.86
<i>Corn</i>				
MTVI2	1.027	+ 0.025	0.89	0.46
MSAV1	1.121	0.050	0.88	0.58
RDVI	1.234	0.124	0.90	0.66
TVI	1.444	0.157	0.81	1.21
<i>Wheat</i>				
MTVI2	0.808	0.166	0.74	0.85
MSAV1	0.873	0.212	0.75	0.79
RDVI	0.998	0.311	0.73	0.79
TVI	1.186	0.391	0.56	1.28
<i>Corn, soybean, and wheat</i>				
MTVI2	1.046	+ 0.016	0.95	0.43
MSAV1	1.114	0.040	0.93	0.55
RDVI	1.244	0.132	0.93	0.76
TVI	1.501	0.171	0.82	1.62

Ces résultats confirment la pertinence de l'utilisation des données hyperspectrales pour l'estimation fine du LAI dans un contexte d'agriculture de précision. Cependant, les valeurs de r^2 obtenues dans cet article sont élevées et à considérer avec modération.

1.1.6.2 Estimation de la teneur en azote

La teneur en chlorophylle des feuilles (T_N) est un des premiers paramètres touchés par le stress azoté et observable par télédétection. Une connaissance quantitative de l'intensité et de l'emplacement de la perte de pigments est extrêmement utile tant pour la gestion des intrants en temps réel que pour l'interprétation a posteriori des facteurs de production qui peuvent expliquer les limitations de la productivité des cultures.

Les avancées scientifiques concernant la télédétection du contenu en azote des feuilles découlent directement des recherches effectuées sur l'estimation de leur teneur en chlorophylle (Haboudane *et al.*, 2002).

La réflectance aux alentours de 550 nm (zone d'influence des pigments foliaires) s'avère être la plus adéquate pour identifier différents traitements azotés du maïs (Blackmer *et al.*, 1994). Dans le but de détecter les déficiences en azote, les mêmes auteurs (Blackmer *et al.*, 1996) ont identifié la réflectance des longueurs d'ondes 550 nm et 710 nm comme étant les plus sensibles au stress.

De même que pour le LAI, l'utilisation de capteurs hyper-spectraux permet d'estimer convenablement le T_N d'un couvert végétal. Les travaux menés par Boegh *et al.* (2002) ont prouvé la possibilité d'évaluer les variations spatiales de l'état azoté d'une surface agricole. Pour l'estimation de paramètres biochimiques, la finesse de résolution des capteurs hyper-spectraux permet l'élaboration de nouveaux indices réagissant comme des indicateurs biologiques (Zarco, 1999).

C'est ainsi que des indices comme le *Photochemical Reflectance Index* (PRI) ont permis l'estimation du taux d'azote d'une parcelle de tournesol présentant plusieurs niveaux d'insuffisance en azote (Peñuelas *et al.*, 1994). La formulation de l'indice PRI est présentée en annexe 5.

Cependant, pour les couverts végétaux peu développés, l'influence spectrale du sol sur la mesure de réflectance de la canopée reste le principal obstacle (Bausch et Duke, 1996). Dans le cas de la canne à sucre, le couvert de la parcelle est assez rapidement fermé, entre deux et quatre mois après la coupe (ou la plantation), en fonction de la saison.

1.1.6.3 Estimation de la biomasse

Il a été montré que la biomasse pouvait être estimée à partir des indices de végétation. La meilleure relation est obtenue en utilisant l'intégrale de la courbe d'évolution de l'indice de végétation au cours du cycle cultural (Tucker *et al.*, 1979 ; Ahlrichs and Bauer, 1983 ; Holben *et al.*, 1980). L'intensité de l'activité photosynthétique de la couverture végétale et la durée de

cette activité au cours de cycle cultural (Rudorff et Bastita, 1990 ; Tucker *et al.*, 1980 ; Daughtry *et al.*, 1980) sont alors prises en compte.

D'autres auteurs ont montré que le rendement potentiel d'une culture est en relation avec la surface foliaire de la culture dans la première phase du cycle. Le rendement final est, lui, corrélé à l'évolution de la surface foliaire durant le cycle cultural. La plus forte corrélation entre un indice de végétation et le rendement apparaît lors du « boom stage » et de la montaison du blé, moment où l'indice de végétation atteint quasiment sa valeur maximale pour la saison. Les indices de végétation ont été utilisés pour estimer 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 ; Tucker *et al.*, 1979a ; Crist, 1984 ; Holben *et al.*, 1980 ; Ortiz *et al.* 1997 ; Rasmussen, *et al.* 1998).

La télédétection permet donc d'estimer le taux d'azote, le développement foliaire et la biomasse. Cela donne alors une possibilité de suivre la croissance et d'estimer les rendements.

Utilisation de la télédétection comme outil d'aide à la gestion de la Canne

La télédétection peut s'appliquer à la gestion de la canne à sucre tout comme aux autres types de cultures en prenant en compte ces caractéristiques. Dans différents pays, les chercheurs se sont intéressés à l'utilisation de cet outils pour la culture de cette graminée.

1.1.7 Cartographie de la sole cannière et des états du couvert

L'utilisation de la télédétection a permis de discriminer les différents types d'occupation du sol à l'aide de données SPOT multispectrales et panchromatiques, et des données radar (ERS⁴). Les parcelles de canne ont pu être cartographiées mais aucune différenciation variétale n'a été possible (Johnson et Kinsey-Henderson, 1997). Les résultats ont mis en évidence que le radar pouvait être complémentaire aux données SPOT en fournissant une information sur la structure physique du couvert. Narciso et Schmidt (1999) ont démontré la

⁴ European Remote sensing Satellite

capacité des images LANDSAT pour identifier et cartographier les champs de canne en Afrique du Sud (SASEX⁵).

Une étude pilote a été menée en Australie pour déterminer le potentiel de la télédétection et de l'analyse spatiale pour l'identification et la cartographie des parcelles de canne coupées (McDonald and Routley, 1999). L'objectif était d'estimer les surfaces de canne coupées et restant à couper durant la campagne sucrière. La classification de l'image avant le début de la coupe permet de localiser les parcelles de canne avec une précision comprise entre 91 et 97%. Cependant, les classifications faites à partir d'images enregistrées pendant la campagne de récolte apportent une information moins précise, entre 36 et 47% de surfaces coupées bien classées.

L'utilisation de la télédétection pour le suivi des coupes et des replantations a également été testée en Afrique du Sud en utilisant des images du satellite SPOT 4. Toutefois, Gers et Schmidt (2001) ont démontré les limites de l'utilisation de la télédétection en raison de la résolution spatiale des images (pas forcément adaptée pour des petites parcelles dont la surface est inférieure à 0,4 ha) et la fréquence d'acquisition des images en relation avec les conditions climatiques (couverture nuageuse importante en zone tropicale).

Plus récemment, la détection et l'estimation des surfaces de canne coupées, à partir d'images SPOT, ont également fait l'objet de recherches en Guadeloupe avec des résultats plutôt encourageants soit 90% de pixels bien classés (Bégué *et al*, 2004).

Actuellement, les photographies aériennes orthorectifiées sont utilisées pour digitaliser les parcelles « agronomiques » de canne en Guadeloupe dans le cadre du projet AGRIGUA pour la mise en place d'un système d'information géographique (Lainé, 2001). De même, la D.A.F. de La Réunion a mis en place sa base de données parcellaire en digitalisant les îlots exploitants sur les photographies aériennes de la BD_Topo de l'IGN (Figure 10). Cette méthode a également été utilisée en Afrique du Sud (Gers, 2000).

⁵ South African Sugar Association Experiment Station



Figure 10. Photographie aérienne de la BD_Topo de l'IGN avec le parcellaire cannier (îlots exploitants) de la base de données de la D.A.F..

L'évolution des technologies aérospatiales, avec un changement des caractéristiques des images enregistrées, a amené à développer l'utilisation de la télédétection sur de nouvelles thématiques. On pourra citer comme exemple l'évolution des satellites SPOT. En mai 2002, SPOT 5 fut lancé avec succès et enregistre depuis des images à une résolution spatiale, après traitement, à 2,5m. Cette nouvelle caractéristique a permis au projet SUCRETTE d'utiliser ces images pour la mise à jour du parcellaire cannier à La Réunion, sur plus d'un quart de la sole cannière de l'île (Figure 11).



Figure 11. Image Spot 5 du 06/07/02, à gauche parcellaire D.A.F., à droite parcellaire agronomique.

L'évolution de la résolution spatiale des images disponibles peut permettre un suivi d'un système d'irrigation à grande échelle. En effet, il est possible de détecter des anomalies de croissance dues à des problèmes de gicleurs bouchés. Cette application a été testée à l'île

Maurice en 1999 à partir d'images SPOT 4 et les conclusions ont mis en avant la nécessité d'utiliser des images avec une résolution spatiale plus fine (Jhoty and Autrey, 2001).

La Figure 12 met en évidence les limitations méthodologiques induites par les caractéristiques de l'image utilisée. L'image du satellite QuickBird révèle beaucoup plus d'informations que l'image NDVI SPOT. L'apport de la diminution de la résolution spatiale des images est quantifiable, une simple interprétation visuelle permet d'identifier certains objets qui n'étaient pas visibles sur une image avec une résolution spatiale plus grande.



Figure 12. Zone de faible développement dans une parcelle de canne irriguée par pivot central, exploitation de Médine, Ile Maurice ; à gauche, image QuickBird à 2,5m de résolution et à droite image SPOT 5 à 10m de résolution spatiale.

En ce qui concerne l'apport d'information dû à une augmentation de la résolution spectrale, des études récentes menées en Australie par le CSIRO⁶ ont montré la possibilité d'identifier des parcelles de canne victimes de certaines maladies, en particulier la rouille (*Orange Rust*) avec une précision de 97% à partir de données hyperspectrales enregistrées par le satellite Hyperion (220 bandes, de 0,4 à 2,4 μm).

Des études ont également été menées en Afrique du Sud pour évaluer le potentiel des images digitales hyperspectrales aéroportées pour l'estimation de certains paramètres comme la teneur en eau des feuilles, l'âge et les variétés des cannes. Les résultats sont encourageants avec la possibilité de discriminer les variétés de cannes, leur âge, leur état hydrique ainsi que certains problèmes de drainage (Schmidt *et al.* 2000), à partir de quatre longueurs d'ondes et une résolution spatiale de 0,5 m.

Les données de télédétection sont donc efficaces et adaptées pour cartographier la sole cannière.

⁶ Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation

1.1.8 Estimation de la production

Pendant la décennie passée, les recherches ont évalué le rendement des récoltes en employant des données satellites, comme le *Large Area Crop Inventory Experiment* (LACIE) aux Etats-Unis. Celles-ci ont estimé la production mondiale de blé avec des images Landsat MSS. À une échelle régionale, le *Monitoring Agriculture with Remote Sensing* (MARS), projet dirigé par l'Union Européenne a utilisé des images satellites à haute résolution spatiale pour évaluer la récolte à un niveau européen (Moulin, *et al.* 1998). Ces projets ont montré que la télédétection peut fournir des informations détaillées pour la discrimination des cultures.

Pour la canne à sucre, le rendement final est fonction de deux paramètres : le rendement canne et la richesse en sucre. L'élaboration du rendement final en sucre étant un phénomène relativement complexe, les recherches dans le domaine de la télédétection se sont essentiellement portées sur l'estimation du rendement canne soit la biomasse fraîche.

L'utilisation de modèle de croissance mécaniste ou agro-météorologique permet plus facilement d'accéder au rendement sucre. Argete (1983) a étudié l'utilisation des données Landsat MSS couplées à un modèle agro-météorologique pour estimer le rendement en canne aux Philippines. Les mesures de rendement étaient proches des estimations faites à partir des données Landsat MSS. Les images Landsat ont été également utilisées au Brésil pour développer un modèle d'estimation du rendement canne à partir d'un couplage entre un modèle agro-météorologique et un indice de végétation (Rudorff et Batista, 1990). Leurs résultats sur trois années montrent que le couplage entre télédétection et modèle de croissance permet la meilleure estimation possible du rendement. Le couplage explicite entre 50% et 69% des variations de rendements observées (erreur comprise entre 10,5 et 14,1 t/ha) sur 40 000 ha. Les auteurs préconisent d'utiliser la télédétection pour estimer le LAI qui sera ensuite utilisé en forçage dans le modèle de croissance. Cette même conclusion se retrouve pour d'autres cultures que la canne dans les travaux de Moulin *et al.* (1998).

Il a été démontré par des techniques de traitement d'image que le NDVI généré à partir des données Landsat TM pouvait être utilisé pour prédire le rendement final en canne sur deux années (1998 et 1999) dans deux districts en Australie (Noonan, 1999). L'estimation de la production par télédétection à l'échelle globale (67 000 ha) est proche des valeurs données par

les usines : entre 4,7 et 4,9 millions de tonnes estimées par télédétection pour une production réelle de 4,5 à 5,2 millions de tonnes de canne.

Il a été tenté pour la première fois sur la canne à sucre d'établir une relation entre le cumul d'indice de végétation NDVI, calculé à partir des données NOAA, et les rendements mesurés par les agriculteurs et les complexes sucriers en Afrique du Sud (Schmidt *et al.* 2000). Les résultats permettent de penser que cette technologie peut être employée en opérationnel pour améliorer l'estimation de la production.

2 MATERIELS ET METHODES

Afin d'estimer les potentialités et les limites des capteurs aérospatiaux pour le suivi agronomique du parcellaire cannier, nous avons sélectionné des sites d'études représentatifs des différentes conditions que l'on rencontre à La Réunion. A l'acquisition des données hyper et multispectrales correspondantes aux sites choisis est associée une campagne simultanée de mesures au champ.

les sites d'études

Le choix des deux sites d'études a été déterminé en fonction de plusieurs critères. Nous avons pris en compte les différentes variétés de canne à sucre cultivées sur l'île de La Réunion de manière à en traiter les plus répandues, soit les variétés R570 et R579. Le deuxième critère a été la localisation géographique des exploitations, en relation avec les différences climatiques contrastées présentes sur l'île entre l'est et l'ouest. Enfin, nous avons privilégié les exploitants agricoles qui sont déjà en relation avec le CIRAD.

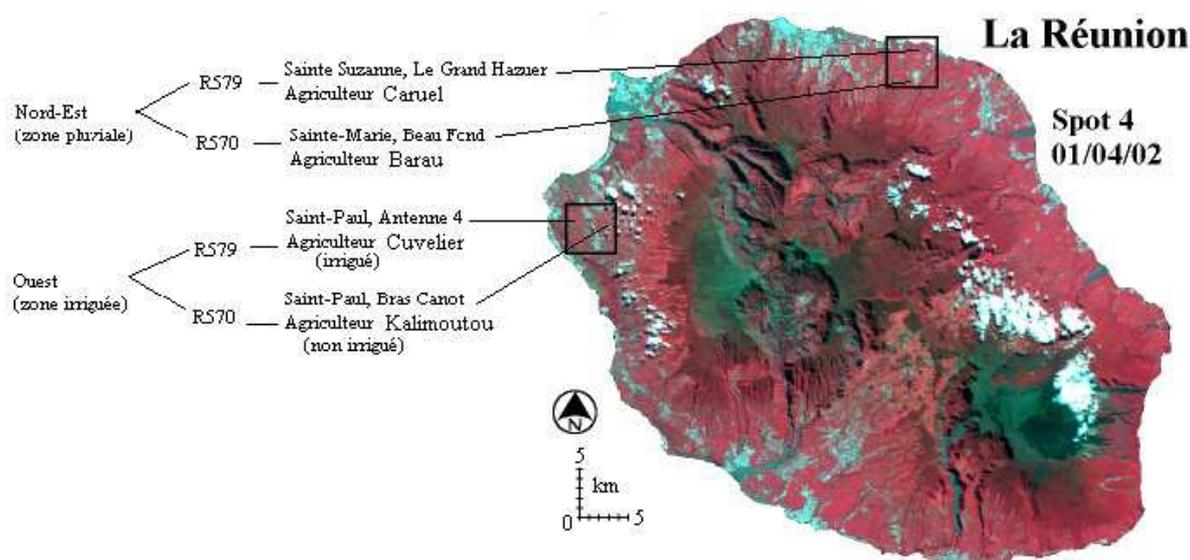


Figure 13. Localisation des sites d'études; en fond, composition colorée en fausses couleurs, image SPOT 4 du 01/04/02.

Dans un premier temps, les sites d'études sont localisés à l'échelle de l'exploitation agricole. Nous avons sélectionné quatre exploitations correspondantes à nos critères (Figure 13). Il faudra ensuite choisir des parcelles d'études au sein de chaque exploitation.

2.1.1 Les exploitations agricoles

- **Localisation, surface, rendement et richesse saccharine**

Les exploitations que nous avons sélectionnées pour faire nos mesures au champ sont représentées par deux groupes. Le premier groupe est composé de deux exploitations du nord-est, M. Barau et M. Caruel (Figure 14), qui peuvent être considérées comme de grosses exploitations agricoles pour La Réunion, avec plus de 180 hectares de canne (Tableau 3).



Figure 14. Localisation des deux exploitations du nord-est, Barau et Caruel sur fond d'image SPOT 5, composition colorée en vraies couleurs du 6 juillet 2002.

Le deuxième groupe comprend les deux exploitants de la zone ouest, M. Cuvelier et M. Kalimoutou (Figure 15) qui possèdent des exploitations avec une surface totale proche de la moyenne (6,7 ha) de La Réunion (D.A.F., 2003).

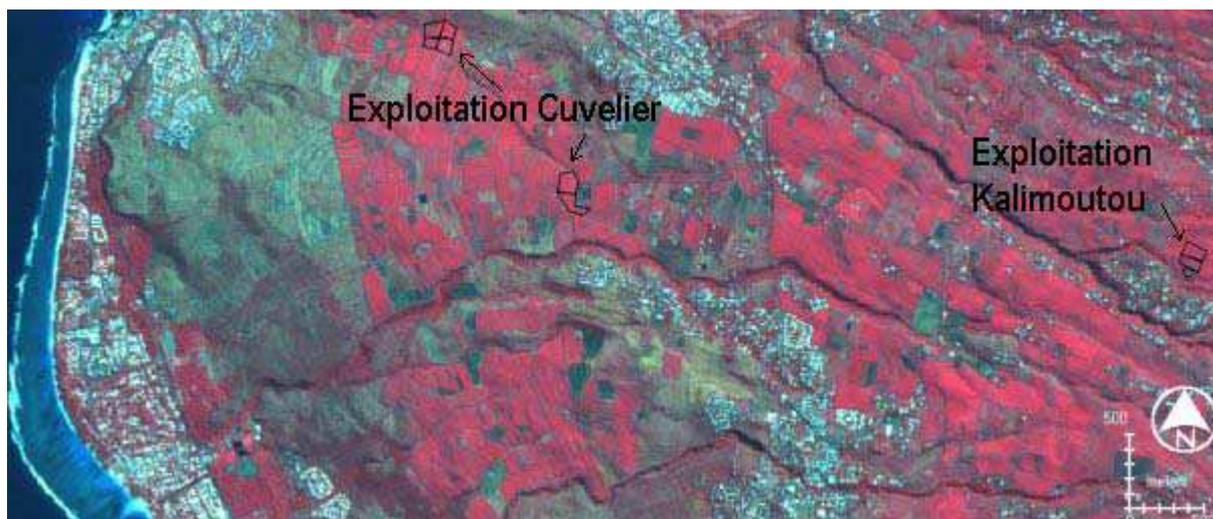


Figure 15. Localisation des exploitations de l'ouest, Cuvelier et Kalimoutou sur fond d'image SPOT 5, composition colorée en fausses couleurs du 13 mai 2004.

Globalement, nous avons deux types bien distincts d'exploitations, deux grandes et deux petites.

Tableau 3. Caractéristiques des exploitations suivies durant les expérimentations de mesures au champ.

Exploitation	Surface totale de l'exploitation (ha)	Nombre de parcelle	Surface moyenne d'une parcelle (ha)	Surface de la plus grande parcelle (ha)	Surface de la plus petite parcelle (ha)	Rendement canne moyen 2002 (t/ha)	Richesse moyenne 2002 (%)
Barau (NE)	180,63	52	3,47	10,98	0,44	88	12,58
Caruel (NE)	180,67	33	5,47	9,53	0,80	114	13,62
Cuvelier (O)	9,40	15	0,62	1,49	0,16	95	13,52
Kalimoutou (O)	7,90	9	0,96	1,40	0,52	52	13,35

On remarque que pour les grandes exploitations, les parcelles les plus grandes ont des surfaces identiques à la surface totale des exploitations de l'ouest (Tableau 3). Cela induit des pratiques culturales différentes. En effet, les exploitations de l'est sont quasiment mécanisées pour toute les opérations culturales (plantations, traitements et coupe) alors que pour les exploitations de l'ouest tout se fait manuellement. Ceci aura un impact direct sur l'homogénéité des parcelles étudiées.

- **Les variétés cultivées**

Les deux exploitations de l'ouest ont une stratégie variétale différente des exploitations de l'est. Les exploitants n'y cultivent qu'une seule variété de canne, la mieux adaptée aux conditions climatiques. L'exploitation de M. Kalimoutou se situant à près de 700 m d'altitude, est cultivée avec la variété R570 qui est plus adaptée aux conditions thermiques des hauteurs, aux températures plus faibles. L'exploitation de M. Cuvelier est située aux alentours de 180 m ; moins sensible à l'effet de l'altitude, la variété R579 est cultivée sur la totalité des surfaces.

Les deux exploitations du nord-est possèdent deux variétés de canne plus ou moins représentées en fonction de leur altitude respective. L'exploitation agricole de M. Barau se situe un peu dans les hauteurs de l'île, l'altitude moyenne est de 450 m. Il a choisi de planter les deux variétés R570 et R579. La répartition en terme de surface cultivée est identique pour les deux cultivars (50% R570 et 50% R579). L'altitude moyenne de l'exploitation de M. Caruel étant de 70 m, la représentativité des cultivars est différente : 63% pour R579 et 37% pour R570, en surfaces plantées.

2.1.2 Caractéristiques bio-climatiques

D'après Raunet (1991), voici le descriptif des sols qui sont présents sur les exploitations agricoles suivies :

Exploitation Caruel : sols ferrallitiques brun-rouge faiblement désaturés et sols "faiblement ferrallitiques andiques" brun-jaune épais sur cendres.

Exploitation Barau : sols "faiblement ferrallitiques andiques" brun-jaune sur cendres, associés à des ressauts rocheux.

Exploitation Cuvelier : sols bruns très peu épais ou "tuf" compact affleurant et sols bruns ferruginisés sur couche colluviale assez épaisse.

Exploitation Kalimoutou : andosols désaturés non perhydratés chromiques sur cendres épaisses.

Il existe un fort contraste pluviométrique entre les deux zones d'étude. Les précipitations annuelles moyennes s'élèvent à près de 500 mm pour la zone ouest contre 1300 mm pour la zone nord-est. Compte tenu du passage du cyclone Dina en janvier 2002, les données pluviométriques de cette année sont exceptionnellement élevées (cf. Figure 16). Les températures sont mesurées à une altitude proche du niveau de la mer. Les évolutions des températures moyennes de l'ouest et du nord-est sont similaires, ces dernières variant de façon plus significative avec l'altitude (cf. annexe 2).

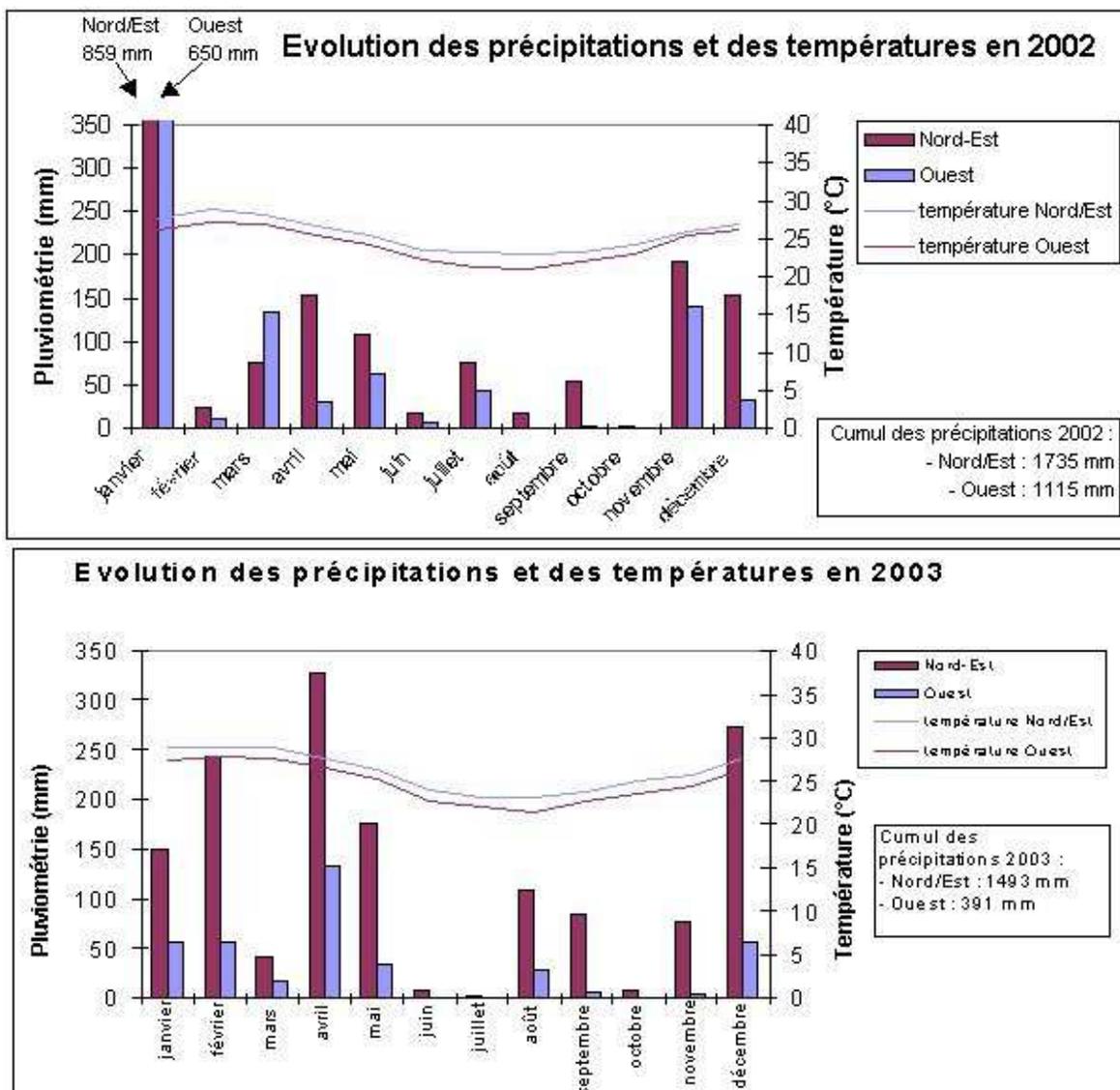


Figure 16. Evolution climatique des sites nord-est et ouest en 2002 et 2003 (Météo France, 2003)

La pluviométrie, la température et les variétés sont différentes selon les sites d'études.

Acquisition des données biologiques et agronomiques

Comme nous l'avons vu dans la première partie concernant l'état de l'art, les deux paramètres clés pour le suivi d'un couvert végétal sont la surface foliaire (caractéristique du développement végétatif) et le taux d'azote dans les feuilles.

Les variables biophysiques descriptives du couvert de la canne (la surface foliaire et le taux d'azote foliaire) sont issues de trois expérimentations, avec des protocoles de mesures différents qui correspondent à l'approche diachronique, synchronique et des mesures complémentaires. L'objectif est de coupler les mesures de terrain avec les données radiométriques issues de différents capteurs (radiomètre de terrain Cimel, CASI et SPOT 4&5). À terme, toutes les données biologiques seront couplées avec les données radiométriques des satellites SPOT. Les localisations géographiques des mesures sont obtenues avec la prise des coordonnées au GPS différentiel.

2.1.3 Suivi temporel des variables mesurées, approche diachronique

La première expérimentation a été mise en place pour suivre dans le temps l'évolution des variables biologiques du mois d'août au mois d'octobre 2002. Pour ce faire, des parcelles de canne à sucre ont été sélectionnées en fonction de la variété et du stade de développement. Les pratiques culturales à La Réunion et en particulier l'étalement de la campagne de coupe de juillet à décembre font qu'il est possible de trouver des parcelles à différents stades de développement en un même temps. L'objectif initial était de suivre durant trois mois quatre parcelles à différents stades de développement de manière à reconstituer l'intégralité du cycle pour les deux variétés suivies, R570 et R579. L'intervalle de temps entre deux mesures sur une même parcelle est d'un mois.

2.1.3.1 Sélection et localisation des parcelles suivies

Le Tableau 4 présente les parcelles, variétés et localisations qui ont été sélectionnées pour effectuer nos mesures au champ lors de la première expérimentation.

Tableau 4. Caractéristiques des parcelles suivies au cours de la première expérimentation ; le nom des parcelles qui commence par un « B » sont situées sur l'exploitation de M. Barau, « C » pour M. Caruel, « Cuv » pour M. Cuvelier et enfin « Kali » pour M. Kalimoutou.

Stade (mois)	Zone pluviale (nord-est)			Zone irriguée (ouest)		
	R570			R570	R579	
0 à 1				C11		
1 à 2	B66			C11		
2 à 3	B66					
3 à 4				MARIE		
4 à 5				MARIE		
5 à 6						
6 à 7				C25		Cuv2
7 à 8	B05			C25	Kali3	Cuv2
8 à 9	B05	B30		C25	Kali3	Cuv2 Cuv3
9 à 10	B05	B30	B03	C03	Kali3 Kali2	Cuv3
10 à 11	B30		B03	C03	Kali2	Cuv3
11 à 12	B03			C03	Kali2	Cuv1
12 à 13				C07		Cuv1
13 à 14				C07		Cuv1
14 à 15				C07		

Acquisition des données au mois de :

aôut-02	sept-02	oct-02
---------	---------	--------

La parcelle MARIE (Tableau 4) a été ajoutée en cours de réalisation des mesures de ce protocole car un manque de données concernant les stades de croissances de trois à cinq mois est apparu suite à des perturbations du calendrier des coupes engendrées par des conditions atmosphériques défavorables (fortes pluies). Sa localisation est donnée sur la Figure 14.

La localisation des parcelles suivies lors de cette première expérimentation sur les exploitations de M. Caruel et M. Barau, situées au nord-est de l'île, est donnée en Figure 17.

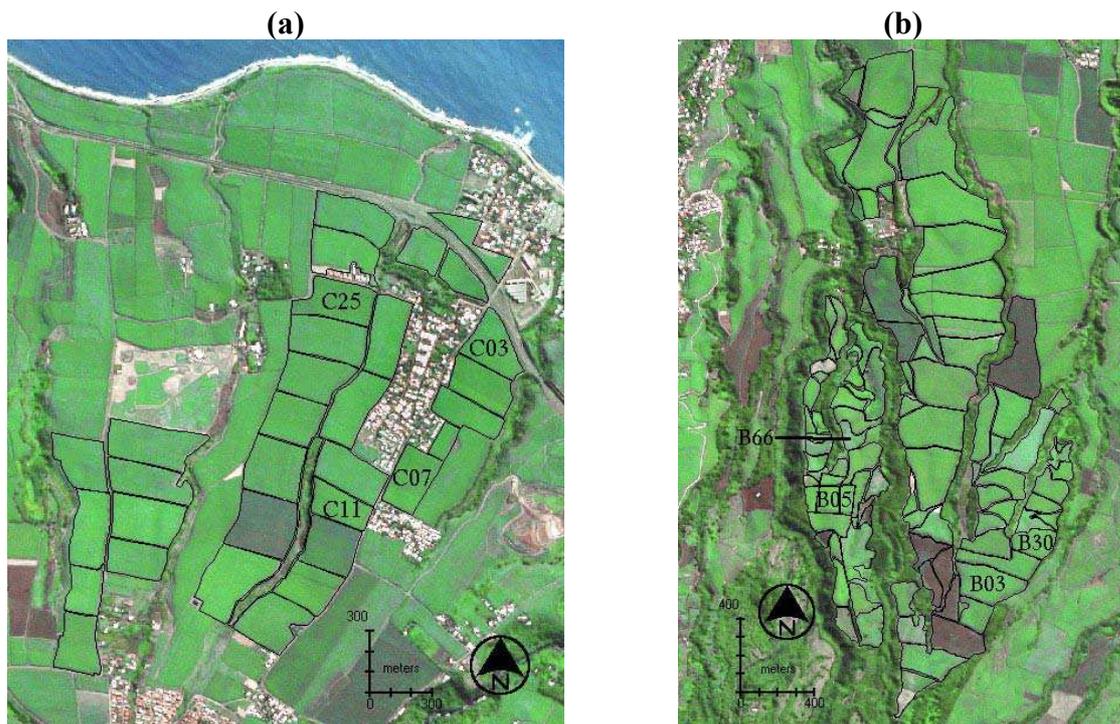


Figure 17. Localisation des parcelles d'études sur les exploitations de M. Caruel (a) et M. Barau (b), sur fond d'image Spot 5 à 2,5 m de résolution, composition colorée en vraies couleurs du 6 juillet 2002.

La Figure 18 quant à elle présente la localisation des parcelles d'études, pour la première expérimentation, sur les exploitations de M. Cuvelier et M. Kalimoutou situées dans l'ouest de l'île.



Figure 18. Localisation des parcelles d'étude sur les exploitations de M. Cuvelier (a) et M. Kalimoutou (b), sur fond d'image Spot 5 à 2,5 m de résolution, composition colorée en fausses couleurs du 13 mai 2004.

2.1.3.2 Protocole de mesures

Pour chaque parcelle suivie, trois à quatre placettes de 20 mètres sur 20 mètres orientées selon les rangs sont délimitées en fonction de la taille des parcelles (Figure 19).

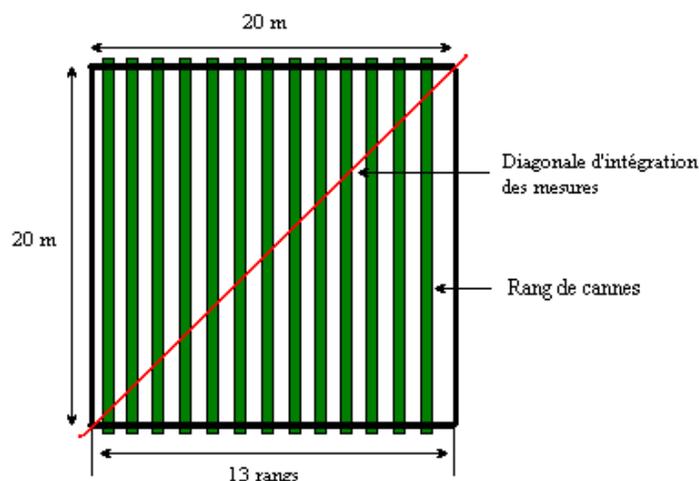


Figure 19. Placette de mesure pour le suivi temporel mise en place lors de la première expérimentation.

Les mesures ont été faites sur la diagonale de la placette pour limiter les effets dus à la culture en rang de la canne. Sur chaque placette on réalise :

20 mesures de LAI : 10 mesures du rayonnement transmis avec le LAI-2000 dans le rang et 10 dans l'inter-rang. Chaque série de mesures est encadrée par deux mesures du rayonnement incident au-dessus de la canopée. Le LAI calculé par le LAI-2000 de chaque placette est la moyenne des LAI des rangs et des inter-rangs, ceci afin d'atténuer tout effet de rang. La fiche technique et la théorie sous-jacente aux mesures du LAI-2000 sont données en annexe 6.

30 mesures au SPAD-502 : D'après le laboratoire d'analyse foliaire du CIRAD, la composition chimique de la troisième feuille déroulée à partir du sommet de la plante (F3) est représentative de la composition chimique de la plante entière. Ces mesures sont donc prises sur le tiers médian de trente feuilles (F3) et réparties le long de la diagonale de la placette. Une seule mesure par feuille est réalisée. Le principe de calcul de cet indice est présenté en annexe 7.

Des mesures de réflectances ont également été faites à l'aide du radiomètre de terrain Cimel CE-310 sur ces placettes pour ce protocole ; elles seront présentées ultérieurement. Une présentation des caractéristiques du radiomètre Cimel CE-310 est disponible en annexe 8. Les

mesures effectuées durant cette première expérimentation sont disponibles par localisation et par variété dans le tableau présenté en annexe 11.

2.1.4 Mesures ponctuelles des variables biophysiques, approche synchronique

Cette deuxième expérimentation a été effectuée en synchronisation avec une campagne d'acquisition d'images hyperspectrales CASI dont les caractéristiques sont disponibles en annexe 9. L'acquisition des données aéroportées CASI a été réalisée le 21 et 22 septembre 2002. Seuls les stades de croissance présents au moment de l'acquisition ont pu être étudiés. Les parcelles ont été choisies en fonction de la variété (R570 et R579) et en fonction de leur stade de développement (6, 9 et 12 mois).

2.1.4.1 *Sélection et localisation des parcelles suivies*

Les parcelles suivies pour la deuxième expérimentation sont les mêmes que pour la première expérimentation (Figure 20 et 21). La même nomenclature a été utilisée pour identifier les parcelles suivies lors de ce deuxième protocole de mesure, sauf pour la parcelle « BAGA » que nous avons dû choisir en dehors des exploitations suivies précédemment (Tableau 5). Aucune parcelle ne présentait les caractéristiques souhaitées, soit un stade de développement inférieur à six mois pour la variété R579. Nous avons classé la parcelle BAGA dans l'exploitation de M.Caruel car elle est située à une altitude proche de celle ci.

Tableau 5. Caractéristiques des parcelles suivies au cours de la deuxième expérimentation.

Zone géographique	Variété	Agriculteur	Parcelle	Stade de croissance
Nord-Est (zone pluviale)	R579	Caruel	BAGA	5 à 6 mois
			C25	8 à 9 mois
			C03	11 à 12 mois
	R570	Barau	BJ570	5 à 6 mois
			B05	9 à 10 mois
			B30	10 à 11 mois
Ouest (zone irriguée)	R579	Cuvelier	Cuv5	5 à 6 mois
			Cuv2	8 à 9 mois
	R570	Kalimoutou	Kali4	5 à 6 mois
			Kali2	11 à 12 mois

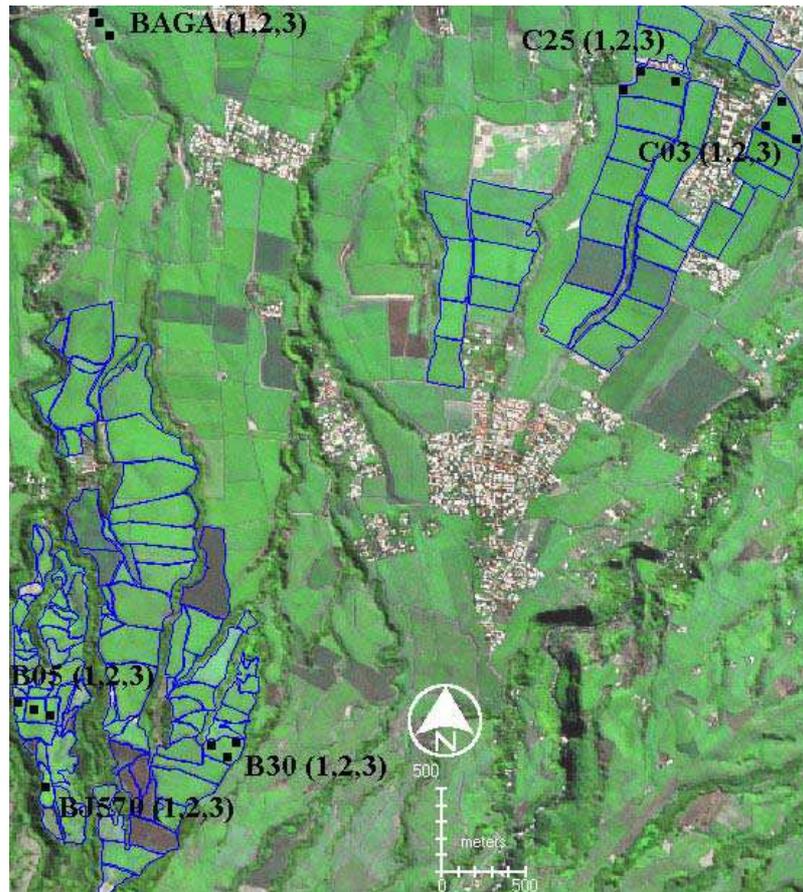


Figure 20. Localisation des points de mesure lors de la deuxième expérimentation, exploitations de M. Caruel et M. Barau.

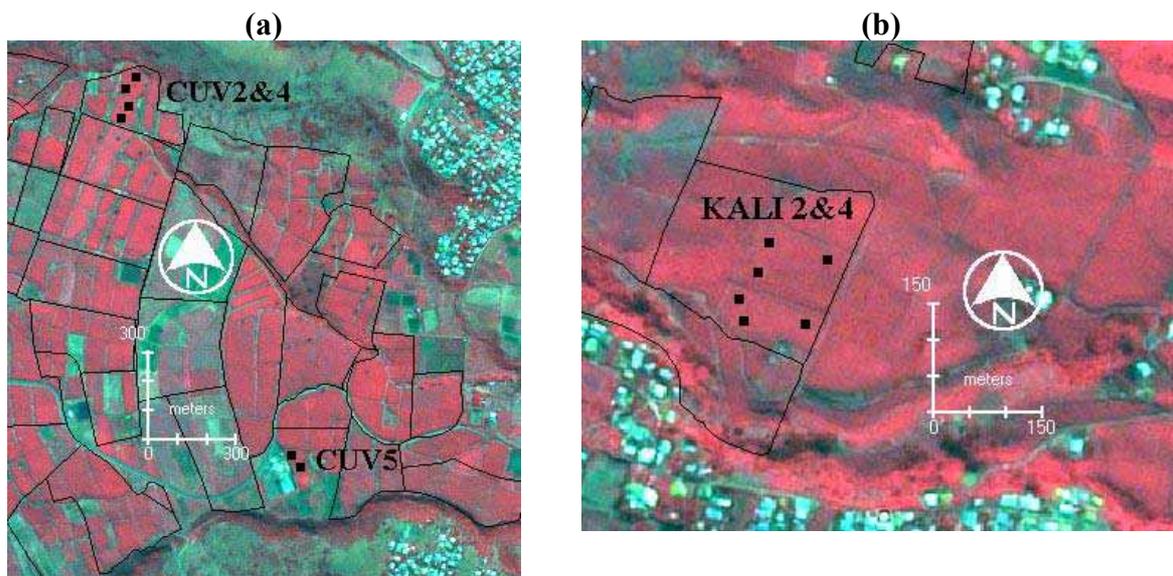


Figure 21. Localisation des points de mesures lors de la deuxième expérimentation, exploitations de M. Cuvelier (a) et M. Kalimoutou (b).

2.1.4.2 Protocole des mesures effectuées

Pour chaque parcelle suivie, deux à trois placettes de mesures sont définies en fonction de la taille de la parcelle. Dans le cas des images CASI, la résolution spatiale des images est de deux mètres. Par conséquent, pour s'assurer qu'au moins un pixel de l'image se trouve dans la placette, celle-ci doit être au minimum de quatre mètres sur quatre. La Figure 22 illustre comment ont été faites les mesures.

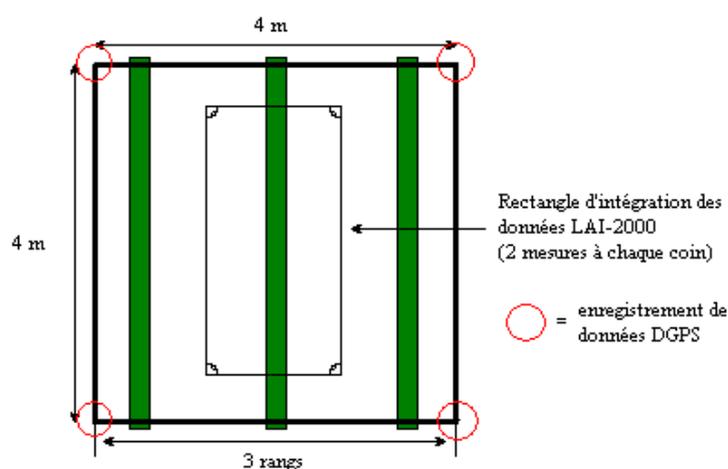


Figure 22. Schéma d'une placette de mesures effectuée pour la deuxième expérimentation, approche synchronique.

Sur chaque placette on réalise :

30 mesures SPAD-502 : La taille réduite des placettes nous permet de faire des mesures sur les trois rangs. Ainsi, 10 mesures sont réalisées le long de chaque rang (sur le tiers médian de la troisième feuille déroulée, la F3).

8 mesures de LAI : Soit deux mesures faites au LAI-2000 aux quatre coins d'un rectangle de 3 mètres par 1,5 mètres (Figure 22). Pour mesurer l'indice de surface foliaire à l'intérieur du rectangle, la lentille du LAI-2000 comporte un cache (270°) permettant de restreindre la mesure à la surface du rectangle.

Mesure de densité et de hauteur de la canne : Comptage des cannes « usinables » sur les 3m de rang (compris dans le rectangle) et mesure de leur hauteur « htvd⁷ » pour estimer la biomasse fraîche. Une relation a été mise en évidence entre la somme des hauteurs (htvd) mesurées par unité de surface et la biomasse fraîche (Martiné, 2003).

⁷ htvd : hauteur d'une tige, distance entre le sol et la dernière ligule visible

Prélèvement foliaire : Analyses chimiques (N, P et K) en laboratoire et mesure de la teneur en eau relative des feuilles F3 (chaque échantillon représente plus de 20 feuilles).

Tableau 6. Récapitulatif des mesures faites lors de la deuxième expérimentation.

	Les variables biophysiques mesurées sur le terrain						
	Teneur eau	SPAD	N	P	K	LAI-2000	Biomasse
	relative (%)		g/kg m.s.			m ² /m ²	t/ha
B30c1	71,14	30,7	14,2	1,62	16,7	5,49	50,29
B30c2	68,62	30,1	11,3	1,39	14,5	5,91	62,72
B30c3	67,76	30,1	9,2	1,41	18,0	5,13	44,82
BAGA c1	71,77	35,7	18,6	2,14	19,9	1,32	3,34
BAGA c2	70,58	36,4	17,3	1,87	18,6	2,48	7,19
BAGA c3	71,07	36,2	19,0	2,37	21,4	2,66	2,06
C03c1	66,13	21,8	8,1	1,41	13,6	4,07	100,35
C03c2	70,90	33,3	14,0	1,85	14,8	4,30	90,41
C03c3	67,25	26,8	10,6	1,56	14,9	3,76	56,10
C25c1	65,25	32,4	12,3	1,62	16,0	3,82	37,95
C25c2	68,52	35,9	15,8	1,88	19,7	4,49	44,26
C25c3	67,74	35,2	15,1	1,75	22,8	3,89	39,06
KALI2c1	63,62	18,7	7,0	1,11	16,3	3,30	26,75
KALI2c2	63,24	23,6	8,5	1,08	16,5	5,02	52,47
KALI2c3	68,40	24,9	13,4	1,26	14,2	3,48	31,64
KALI4c1	69,42	34,5	13,6	1,30	16,6	2,81	15,71
KALI4c2	67,65	33,4	12,3	1,30	20,0	2,29	10,18
KALI4c3	64,51	32,8	8,2	1,03	14,7	3,31	21,70
CUV2c1	64,59	23,0	9,8	1,27	20,1	4,55	41,11
CUV2c2	65,55	21,8	10,0	1,67	14,6	4,26	35,67
CUV2c3	66,36	25,9	9,6	1,51	14,6	4,26	40,79
CUV4c1	65,37	21,7	9,9	1,51	15,6	3,75	32,90
CUV4c2	67,44	30,1	11,4	1,38	18,6	3,99	41,74
CUV4c3	68,44	29,8	11,7	1,31	20,5	4,99	44,74
CUV5c1	68,89	33,4	14,3	1,19	14,1	1,97	2,46
CUV5c2	69,68	31,3	13,6	1,26	14,8	2,22	4,15
CUV5c3	69,69	31,4	12,4	1,30	14,9	1,95	5,54
Maximum	71,77	36,40	19,00	2,37	22,80	5,91	100,35
Minimum	63,24	18,70	7,00	1,03	13,60	1,32	2,06
Moyenne	67,76	29,66	12,27	1,49	16,93	3,68	35,04
ecart type	2,40	5,25	3,17	0,32	2,62	1,17	25,19

2.1.5 Mesures complémentaires

Lors du traitement des données biologiques et radiométriques mesurées en 2002 nous avons constaté un manque de données concernant les parcelles en jeune stade, inférieur à trois mois. La mise en place d'une troisième expérimentation a été nécessaire en 2003 pour, combler certains manques de données (mesures de LAI et de SPAD) pour des parcelles en jeune stade. Ces mesures ont été faites de mai à juillet 2003. Il s'agit d'une approche diachronique avec une revisite des parcelles tous les 15 jours. Neuf parcelles ont été suivies, trois parcelles en jeune stade (1 mois), trois parcelles de six mois et trois parcelles de neuf mois (Tableau 7). Trois parcelles de canne ont été choisies dans la zone sud de l'île, car elle est souvent dégagée

de nuage sur les images SPOT. Ce choix des parcelles du sud augmente la possibilité d'obtenir un couple de données biologiques et radiométriques exploitable nécessaire pour l'établissement des relations entre les paramètres biologiques et la réponse spectrale d'une parcelle de canne.

Les paramètres mesurés ont été : le LAI, le taux d'azote par le SPAD, la teneur en eau relative des feuilles par prélèvement foliaire ainsi que le taux de sucre dans la canne, par une mesure du Brix (quantité de solutés dans le jus de canne) au réfractomètre.

Tableau 7. Caractéristiques des parcelles suivies au cours de la troisième expérimentation.

Zone géographique	Variété	Agriculteur	Parcelle	Stade de croissance
Nord-Est	R579	Caruel	C06	1 mois
			C25	6 mois
			C09	9 mois
	R570	Barau	B27	1 mois
			B56	6 mois
			B04	9 mois
Sud	R579	-	SP3	1 mois
			SP2	6 mois
			SP1	9 mois

La mesure du LAI des parcelles en jeune stade nécessite l'utilisation d'une méthode différente de celle des deux expérimentations précédentes. L'utilisation du LAI-2000 pour estimer le LAI d'un couvert végétal peu couvrant n'étant pas préconisé, nous avons estimé le LAI par une méthode biométrique.

Il a été établi que la surface S (m²) de la F3 pouvait être estimée par la relation suivante (Mongelard, 1968) :

$$S = L \times l \times K$$

Avec L : longueur de la F3 (m)

l : largeur de la F3 (m)

K : coefficient égal à 0,70

Le LAI peut être calculé en utilisant cette méthode par :

$$\text{LAI} = S \times n \times T$$

Avec S : surface moyenne des F3 (m²)

n : nombre moyen de feuilles/tige

T : nombre moyen de tiges/m²

Nous avons dans ce protocole estimé la surface (S) de 30 feuilles F3 à chaque visite sur les parcelles pour l'estimation du LAI.

Prétraitements des données

2.1.6 Comparaison des méthodes d'estimation du LAI

Le LAI peut être estimé soit directement à l'aide d'un instrument de mesure (LAI-2000 dans certaines conditions) soit indirectement par des relations simples entre le LAI et d'autres paramètres morphologiques de la plante.

2.1.6.1 Mesures du LAI avec le LAI-2000

L'hétérogénéité spatiale du couvert végétal (rang et touffe) peut engendrer une sous-estimation du LAI par mesure du rayonnement intercepté. Les valeurs proposées par le LAI-2000 doivent donc être comparées à des valeurs de LAI de référence. La fiche technique et la théorie sous-jacente aux mesures du LAI-2000 sont données en annexe 6.

2.1.6.2 Mesure indirecte du LAI à partir de la hauteur « htvd »

Une relation biométrique indirecte relie le LAI à la somme des hauteurs « htvd » des tiges d'une surface définie, notée « Shtvd » (Martiné, 2003). La hauteur « htvd » d'une tige est la

distance entre le sol et la dernière ligule visible. Cette relation biométrique a été établie à partir de 24 couples de mesures. Son expression est la suivante :

$$\text{LAI} = 0,0015 \times \text{Shtvd}^{(1,1415)}$$

où Shtvd est exprimé en cm/m^2 , avec $R^2 = 0,92$

Cependant, la relation est valable uniquement pour des « Shtvd » inférieurs à 1500 cm/m^2 (soit un LAI de 6 environ). Au delà, il n'y a aucune relation visible. L'utilisation du nombre de feuilles vertes par tige devrait permettre d'affiner la relation précédente et d'estimer correctement le LAI lorsque « Shtvd » est supérieur à 1500 cm/m^2 . Afin de distinguer les valeurs de LAI obtenues avec le LAI-2000 et celles obtenues avec la relation biométrique, ces dernières sont notées LAI-Shtvd.

2.1.6.3 Normalisation des mesures de LAI

Nous pouvons comparer les valeurs LAI-2000 et les mesures de LAI-Shtvd réalisées lors de l'acquisition des données terrain dans le cadre de la deuxième expérimentation.

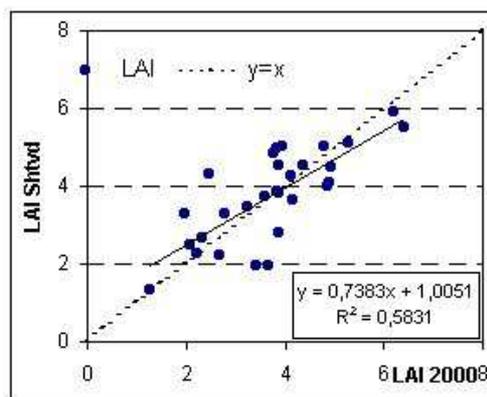


Figure 23. Relation entre les valeurs de LAI estimées par le LAI-2000 et par les mesures de Shtvd.

En réalisant une régression linéaire (Figure 23), nous obtenons une droite dont l'expression est la suivante :

$$\text{LAI2000} = (0,7383 \times \text{LAIShtvd}) + 1,0051$$

avec $R^2 = 0,58$ et $\text{RMSE} = 0,83$.

Compte tenu de l'intervalle des valeurs de LAI (de 1,2 à 6,4), la RMSE⁸ nous indique que le LAI-2000 estime les valeurs de LAI avec une erreur relative de 16 %.

Le coefficient directeur (inférieur à 1) sous hypothèse linéaire montre que :

1. le LAI-2000 semble sous-estimer l'indice de surface foliaire lorsque celui-ci est faible (<3, couvert peu développé avec des touffes) ;
2. le LAI-2000 paraît sur-estimer l'indice de surface foliaire lorsque celui-ci est plus élevé (couvert très développé) ou le LAI-Shtvd est sous-estimé car on approche des limites de validité de la relation.

Malgré une dispersion évidente des valeurs autour de la droite (1:1), la gamme des valeurs mesurées avec les deux méthodes est tout à fait comparable.

2.1.7 Calcul du T_N

Une nouvelle méthode d'analyse du T_N des feuilles a été expérimentée avec succès sur les six principaux cultivars de canne à sucre de la Réunion (Pouzet *et al.*, 2003) avec l'appareil SPAD-502. Le principe de calcul de cet indice est présenté en annexe 7.

Cette méthode propose un diagnostic de nutrition azotée de la canne à sucre plus simple et plus rapide que les analyses foliaires en laboratoire à partir d'échantillons destructifs. Les résultats montrent que le T_N peut être évalué à partir de mesures directes effectuées avec cet appareil.

D'après Pouzet (2003), la relation linéaire obtenue pour les variétés confondues (Figure 24) est la suivante :

$$T_N = -7,0611 + 0,5316 \cdot (\text{unité SPAD})$$

avec R² = 0,61, CV = 0,16 et RMSE = 2,64.

Le T_N est exprimé en gramme par kilogramme de matière sèche et les mesures données par l'appareil SPAD-502 sont notées « unité SPAD ».

⁸ *Root Mean Square Error*

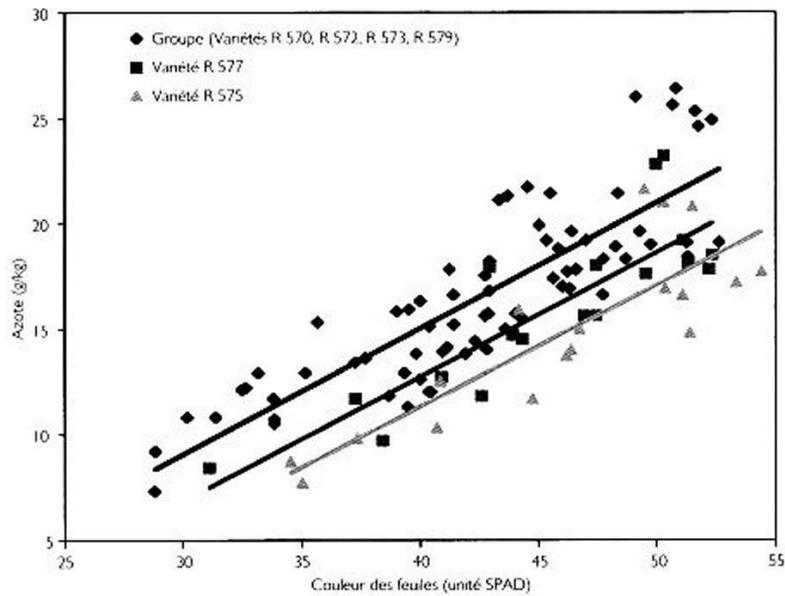


Figure 24. Relation entre le taux d'azote foliaire et la valeur de SPAD (Pouzet, 2003)

La qualité de cette relation peut être évaluée à partir du calcul de la RMSE qui est l'écart moyen entre les valeurs de T_N mesurées sur le terrain et les valeurs obtenues à partir de la relation.

Sachant que les valeurs de T_N varient de 7 à 26 g/kg, la RMSE de 2,64 signifie que la relation admet une erreur relative de 13,8 %.

2.1.8 Stade croissance : du mois aux degrés/jours

La différence d'altitude, donc de température, influence le développement de la canne à sucre. Deux parcelles de canne à sucre de même variété et de même âge (mesuré en mois) situées à des altitudes différentes ne sont pas au même stade de croissance.

La somme des degrés Celcius accumulés par jour entre la date de coupe précédente et la date de la mesure, renseigne de manière pertinente sur le stade de croissance de la canne à sucre (Fauconnier, 1970). Selon cet auteur, la valeur de degrés/jour est obtenue en soustrayant le degré de végétation de la canne à sucre (12°) à la température moyenne d'une journée, selon l'expression suivante :

$$\text{Degrés / jour} = \frac{(\text{température maximale} + \text{température minimale})}{2} - 12^{\circ}$$

Les données climatiques journalières utilisées dans cette étude ont été enregistrées par des stations météorologiques (La Mare et Colimaçons) situées à proximité des sites d'études. Ces stations ont permis d'établir approximativement les températures maximales et minimales pour chaque site :

- la station de « La Mare » est située à la même altitude et à proximité de l'exploitation de l'agriculteur Caruel (Nord-Est ; R579).
- les températures moyennes journalières au niveau de l'exploitation de l'agriculteur Barau (Nord-Est ; R570) sont déduites des données de la station de « La Mare ». Seule la différence d'altitude (agriculteur Caruel : 70 m ; agriculteur Barau : 450 m) engendre une variation de la température suivant le gradient thermique vertical de -0,7 °C pour 100 m (cf. annexe 2). Cela induit une différence de 2,7 °C entre les deux sites.
- la station « Colimaçon » est située dans la zone ouest de l'île, sur le versant où se situe l'exploitation de l'agriculteur Cuvelier (Ouest ; R579). L'agriculteur Cuvelier se trouve à 170 m d'altitude, tandis que la station « Colimaçon » se situe à 780 m. De la même façon, on ajoute 4,3 °C aux températures moyennes de la station.
- les températures au niveau de l'exploitation de l'agriculteur Kalimoutou (Ouest ; R570) qui se situe à 700 m d'altitude sont également obtenues à partir de la station « Colimaçon ». La différence d'altitude nous amène à ajouter 0,6 °C aux températures relevées par la station « Colimaçon ».

Les données radiométriques

Les données radiométriques ont été enregistrées par le radiomètre Cimel, le spectroradiomètre CASI et les satellites SPOT 4&5.

2.1.9 Le radiomètre Cimel

Le radiomètre Cimel a été utilisé uniquement durant l'acquisition des données terrain pour l'approche diachronique (première expérimentation) de août à octobre 2002. Il permet d'identifier de façon contrôlée les relations qui peuvent exister entre les paramètres biophysiques descriptifs de l'état du couvert de la canne, comme le LAI ou le taux d'azote dans les feuilles, et le comportement spectral du couvert (mesures conjointes dans le temps et caractérisation exhaustive des surfaces mesurées).

La réflectance du couvert de la canne est calculée à l'aide d'un radiomètre de terrain, le CE-310, développé par la société CIMEL ELECTRONIQUE (cf. annexe 8). Cet appareil est destiné à la simulation des mesures radiométriques des satellites SPOT. A partir de la mesure instantanée du rayonnement incident et réfléchi par le couvert végétal, il permet de mesurer la réflectance d'un objet dans les bandes spectrales suivantes :

- 500 à 590 nm (canal vert XS1 de SPOT) ;
- 615 à 680 nm (canal rouge XS2 de SPOT) ;
- 790 à 890 nm (canal pIR XS3 de SPOT).

Avant la campagne d'acquisition, le radiomètre CE-310 a été étalonné à l'aide d'une plaque de Sulfate de Baryum, dont les caractéristiques spectrales sont connues. Les coefficients d'étalonnage sont les suivants (Bégué, Communication personnelle, 2002):

- canal vert : 1,027
- canal rouge : 1,088
- canal pIR : 1,168

Sur chaque placette et simultanément aux mesures biologiques de la première expérimentation, vingt mesures de réflectance sont effectuées dans le vert, le rouge et le pIR. Ces mesures sont prises sur la diagonale de la placette de mesure (Figure 19). Une potence permet de disposer le capteur au-dessus de la canopée des parcelles de canne à sucre. Pour les

stades de développement avancés présentant une couverture totale du feuillage, le capteur est situé à 1 mètre au dessus de la canopée (Photographie 2). Pour les premiers stades du développement, l'utilisation de la potence nous permet d'intégrer une plus grande surface de mesure. Le capteur est, dans ce cas, situé à une distance de 2 mètres au dessus de la canopée.

La hauteur du mât détermine la surface mesurée au sol par :

$$H = \frac{P}{2 \tan \frac{\alpha}{2}}$$

avec H : hauteur du mât (m)

P : diamètre du disque d'intégration au sol (m)

et α : angle d'ouverture circulaire de la tête de mesure

Ainsi, avec un angle de 12° , la tête de luminance du radiomètre située à 2 mètres de la cible intègre une surface de $0,2 \text{ m}^2$.



Photographie 2. Prise de mesures au radiomètre Cimel CE-310 sur du pailis.

Les mesures de réflectance du couvert enregistrées avec le Cimel ont été faites systématiquement pour toutes les parcelles suivies durant la première expérimentation (Tableau 4). Lors des mesures avec le radiomètre Cimel la hauteur du mât, l'heure, ainsi que les conditions atmosphériques ont été notées.

2.1.10 Le spectroradiomètre CASI

La campagne d'acquisition d'images a été effectuée le 21 et 22 septembre 2002 à l'aide d'un capteur hyper-spectral aéroporté : le CASI, produit de la société Itres[®]. Les images ont été enregistrées à environ 2500 mètres d'altitude, la résolution spatiale des images enregistrées est de deux mètres (Despinoy, 2002). Ces données seront exploitées en relation avec les mesures faites lors de la deuxième expérimentation.

Le CASI est un spectroradiomètre imageur conçu pour l'acquisition d'images à haute résolution spectrale (19 bandes spectrales de largeur inférieure à 14 nm) dans le visible et le proche infra-rouge, à l'aide d'une plate-forme aéroportée (cf. annexe 9).

La finesse et le nombre de bandes spectrales sélectionnées dans le visible et le pIR représentent un avantage certain vis-à-vis du radiomètre de terrain CE-310.

2.1.10.1 *Choix des bandes spectrales*

Une campagne préalable de mesures radiométriques sur le terrain à l'aide d'un spectroradiomètre portable, le ASD PSII, a été faite quelques jours avant l'acquisition des images par le CASI. Le spectroradiomètre ASD PSII enregistre les longueurs d'ondes de 350 nm jusqu'à 1072 nm. Le choix des 19 bandes spectrales s'est fait après l'analyse des spectres enregistrés sur le terrain (Figure 25) et en accord avec HDI⁹ (*Hyperspectral DI*), le prestataire d'image CASI, qui par son expérience dans l'acquisition d'images hyperspectrales sur la végétation nous a orienté vers certaines fenêtres spectrales. Nous avons également recherché dans la littérature scientifique les longueurs d'ondes sensibles aux paramètres biophysiques (LAI, T_N et biomasse) que nous cherchions à estimer à partir de ces images.

⁹ <http://www.hdi.ns.ca/>

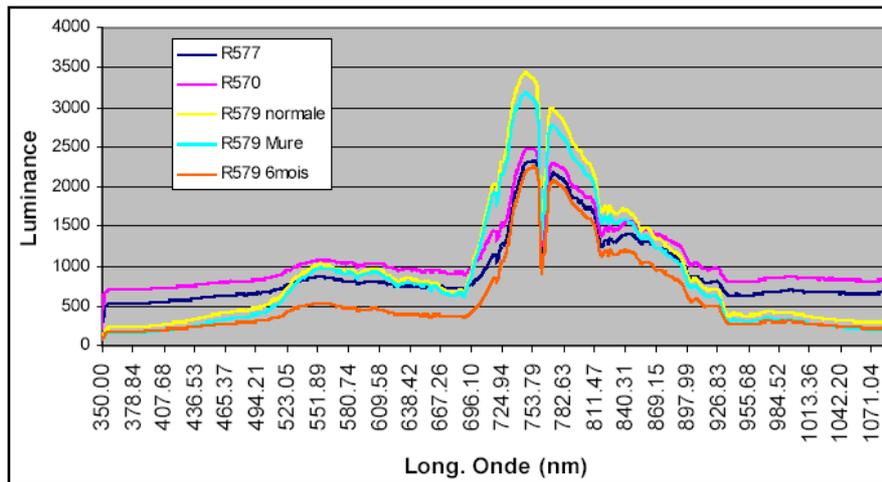


Figure 25. Spectres d'un couvert de canne à sucre mesurés sur le terrain avec ASD PSII.

Les spectres ont été mesurés sur des parcelles de canne qui présentent des caractéristiques biophysiques différentes afin de mettre en évidence les longueurs d'ondes sensibles à ces états (variété, surface foliaire, taux d'azote, biomasse...). La largeur et les longueurs d'ondes choisies pour l'acquisition des images CASI sont présentées à la Figure 26.

	Centre (nm)	Largeur de bande (nm)	Max (nm)	Min (nm)	Couleur du spectre
1	410	10,3	420,3	399,7	Bleu foncé
2	489,5	10,4	499,9	479,1	Bleu Clair
3	524,9	10,4	535,3	514,5	Vert foncé
4	557,7	7,7	565,4	550	Vert clair
5	575,5	10,5	586	565	Vert clair
6	600	10,5	610,5	589,5	orange
7	643,5	6,8	650,3	636,7	Rouge
8	679,6	6,8	686,4	672,8	Rouge foncé
9	696,7	3	699,7	693,7	Rouge foncé
10	704,3	4,9	709,2	699,4	Rouge foncé
11	719,6	4,9	724,5	714,7	Rouge foncé
12	739,6	9,7	749,3	729,9	Rouge foncé
13	784,6	4,9	789,5	779,7	Rouge foncé
14	794,2	4,9	799,1	789,3	Rouge foncé
15	839,3	5,9	845,2	833,4	PIR
16	858,5	7,8	866,3	850,7	PIR
17	886,4	8,8	895,2	877,6	PIR
18	908,6	13,6	922,2	895	PIR
19	932,7	8,8	941,5	923,9	PIR

Figure 26. Descriptif des bandes spectrales mesurées par le CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager), campagne 2002 à La Réunion.

Lors de la campagne d'acquisition d'images CASI, dix-sept transects ont été enregistrés. Dans cette étude, nous n'avons traité que les sept transects comprenant nos sites expérimentaux.

2.1.10.2 Pré-traitements des images CASI

Les images ont été livrées par le prestataire de service canadien HDI après correction des effets de prise de vue grâce à la centrale inertielle (roulis, lacet tangage) en valeurs de réflectance, corrigées des effets atmosphériques par le logiciel ACORN (Despinoy, 2002). En raison du relief du terrain les transects présentent de fortes distorsions géométriques qu'il s'agit de corriger avant toute utilisation. La résolution spatiale des images CASI étant de deux mètres, leur correction géométrique nécessite une image de référence ayant une résolution spatiale au moins égale à deux mètres. La correction géométrique est faite sous ERDAS IMAGINE en utilisant comme images de référence les ortho-photographies de la BD-Topo de l'IGN. Ces photographies aériennes qui ont été digitalisées puis ortho-rectifiées ont une résolution spatiale d'un mètre. Le système de projection utilisé à La Réunion par l'IGN est le Gauss Laborde. Les coordonnées géographiques sont exprimées en mètres.

Nous avons retenu le modèle *Rubber Sheeting* comme modèle de correction géométrique car ce modèle est particulièrement adapté aux images contenant des distorsions sévères. Il propose deux méthodes de correction, linéaire et non linéaire, qui appliquent respectivement une fonction du 1^{er} et du 5^{ème} degré aux pixels de l'image à corriger. Le modèle linéaire a été préféré au non linéaire, car ce dernier apporte dans notre cas des déformations supplémentaires. Pour obtenir un résultat satisfaisant (Figure 27), plus de 250 points de contrôle au sol ont été nécessaires par image. L'indicateur RMSE obtenu pour chaque correction géométrique est inférieur à 1 pixel. Quelques distorsions rémanentes ne sont pas corrigées mais elles concernent des zones non cultivées, principalement les ravines.

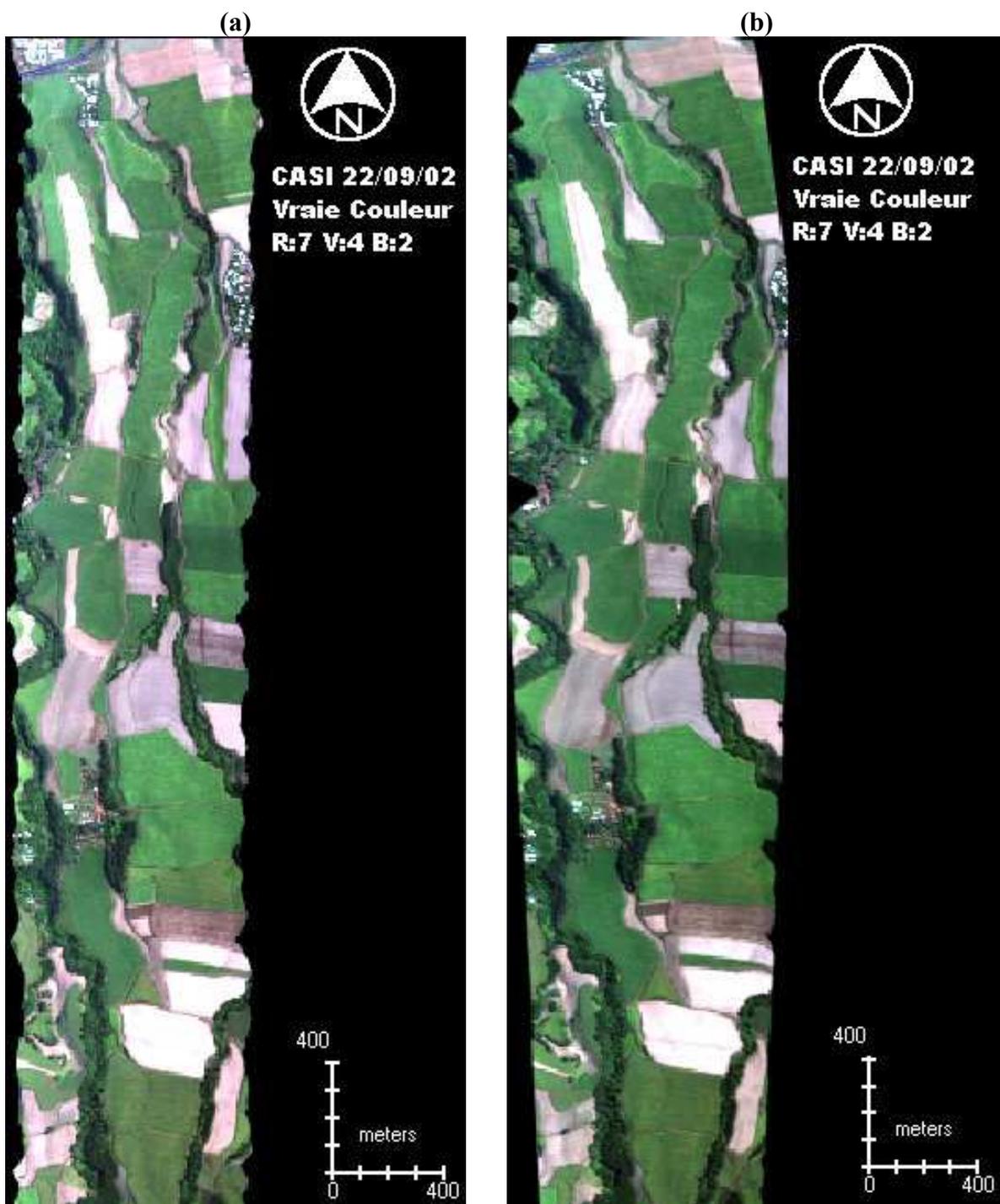


Figure 27. Exemple d'un transect CASI avant correction géométrique (a) et après correction géométrique (b) en composition colorée vraies couleurs.

2.1.11 Les images SPOT

Le jeu de données d'images SPOT utilisé dans cette thèse provient de la base de données spatiales ISLE-Réunion (Information SatelLitaire pour L'Environnement de la Réunion) réalisée sur l'initiative du CNES. Cette base de données nous a permis d'avoir à disposition suffisamment d'images satellites SPOT 4&5 pour constituer une série temporelle exploitable sur nos sites d'étude. Le paramètre de la nébulosité a été le plus restrictif dans le choix des images, surtout durant l'été qui est une période particulièrement pluvieuse. Nous avons sélectionné les images de manière à pouvoir les traiter en relation avec les mesures faites sur le terrain durant les trois expérimentations. Les caractéristiques des images et des capteurs embarqués sur les satellites SPOT 4&5 sont décrites en annexe 12.

2.1.11.1 *Choix des images de la série temporelle*

Le Tableau 8 présente les images utilisées ainsi que leurs caractéristiques. Les heures d'acquisition sont comprises entre 10h00 et 10h30, heure locale (GMT+4).

Initialement, nous souhaitions que la série d'images comprenne une image par mois dégagée sur les sites d'étude à 10 mètre de résolution. A cause de la nébulosité, certains mois nécessitent l'acquisition de deux images comme par exemple les mois de septembre et octobre. La série temporelle est donc constituée de dix-neuf images (neufs en 2002 et dix en 2003) provenant des différents capteurs de SPOT 4&5 avec des angles de visée qui sont hétérogènes.

Les images de la base de données ISLE-Réunion sont au niveau 1A ; elles n'ont subi aucun traitement géométrique, radiométrique ou atmosphérique. Pour que ces images soient utilisables en multi-temporel, il faut être particulièrement vigilant sur les pré-traitements géométriques (superposition des images) et radiométriques (étalonnage de la mesure physique). Une normalisation des effets dus à la topographie sera appliquée sur toutes les images en raison du relief omniprésent de l'île de La Réunion. Enfin, les images seront toutes corrigées (par correction géométrique affine) pour avoir une taille de pixel identique, soit 10 mètres. Lors de la normalisation topographique, les images sont re-échantillonnées à 12 mètres car nous utilisons un Modèle Numérique de Terrain (MNT) avec un pas de 25 mètres.

Tableau 8. Liste et caractéristiques des images SPOT 4&5 utilisées pour constituer la série temporelle.

Dates	Format	Capteurs	ANGLES (degré)		
			visée R-	élevations solaires	Azimut solaire
01/04/02	PXI	SPOT4 hrv2	25,8 R	50,7	53,7
12/06/02	PXI	SPOT4 hrv1	3,2 L	39,2	30,9
06/07/02	J	SPOT5 hrv2	25,08R	40,4	28,9
08/08/02	PXI	SPOT4 hrv1	10,7 L	44,3	36,3
14/08/02	PXI	SPOT4 hrv1	19,2 R	43,6	41,7
09/09/02	PXI	SPOT4 hrv1	19,2 R	51,6	48,9
22/09/02	J	SPOT5 hrg2	25,0 L	67,7	96,6
09/10/02	PXI	SPOT4 hrv2	24,8 L	65,7	54,6
18/10/02	J	SPOT5 hrg2	24,9 L	65,2	83,3
26/02/03	J	SPOT5 hrg1	11,9 R	58,5	72,2
25/03/03	XI	SPOT4 hrv2	3,6 L	55,1	53,2
26/04/03	XI	SPOT4 hrv1	26,3 R	45,4	42,2
04/05/03	J	SPOT5 hrg1	10,9 L	46,7	33,6
06/06/03	XI	SPOT4 hrv2	4,6 R	39,5	31,7
17/06/03	XI	SPOT4 hrv1	26,2 R	37	34,5
21/07/03	J	SPOT5 hrg1	10,58 L	41,1	32,5
21/08/03	J	SPOT5 hrg2	18,17 L	48,8	37,2
14/10/03	XI + P	SPOT4 hrv2	4,6 R	64,3	62,6
20/11/03	XI + P	SPOT4 hrv2	10,6 R	66	90,5

XI : produit natif, SPOT4 multispectrale

P : produit natif, SPOT4 panchromatique

PXI : fusion P+XI

J : produit natif SPOT5 multispectrale

A terme, les images SPOT de la série temporelle seront mises en relation avec les paramètres mesurés au champ lors des trois expérimentations, principalement pour étudier les relations qui peuvent exister entre les réflectances, la surface foliaire et le taux d'azote.

2.1.11.2 Les pré-traitements des images SPOT

- **La correction géométrique :**

La correction géométrique des images a été faite par ortho-rectification, correction qui prend en compte les distorsions dues au relief. Pour cela, on utilise le modèle de déformation de SPOT (donné par ERDAS) auquel on intègre le MNT et une trentaine de points d'amer. Cette ortho-rectification prend en compte la géométrie de la visée. Ce traitement est fait avec comme image de référence l'image SPOT 5 du 06/07/02, première image ortho-rectifiée par le CNES disponible sur le site ISLE-Réunion. La résolution métrique de cette image est de 2,5 mètres. Elle sera utilisée comme référence pour la correction géométrique de toutes les

images de la série temporelle. Le modèle mathématique de re-échantillonnage utilisé est celui du « plus proche voisin » pour conserver la radiométrie originale de chaque pixel.

- **L'étalonnage radiométrique absolu au sommet de l'atmosphère :**

L'étalonnage radiométrique est indispensable pour tout traitement d'images ayant pour but :

- l'accès à des propriétés quantifiées des surfaces ;
- la comparaison des résultats d'un traitement avec les données mesurées sur le terrain ;
- les comparaisons multidates ;
- la reproductibilité d'une méthode d'identification ou de classification.

Les détecteurs sont des dispositifs mesurant un courant électrique en fonction de l'énergie lumineuse reçue et prenant des valeurs numériques allant de 0 à 255 en fonction de l'intensité pour du 8 bits. L'ensemble est conçu pour que le compte numérique soit proportionnel à la luminance reçue. Cependant, avant toute utilisation, ces mesures requièrent des opérations d'étalonnage destinées à corriger certains défauts des capteurs et à convertir le signal reçu en une valeur à signification physique, la luminance. C'est ainsi que la conversion des comptes numériques SPOT en luminance se fait selon la formule fournie par SPOT Image :

$$\boxed{L = (X / a_\lambda) + b_\lambda}$$

Avec : L = luminance ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)

X = valeur numérique (de 0 à 225)

a_λ = gain de calibration absolu, pour la bande spectrale λ ($\text{W}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m}$)

b_λ = biais de calibration absolu, pour la bande spectrale λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)

a_λ et b_λ sont donnés dans les fichiers annexes fournis par Spot image avec les images. Ces coefficients sont évalués régulièrement et réactualisés en fonction du vieillissement des capteurs.

Ainsi donc, à partir de la mesure de luminance acquise au niveau du capteur, nous pouvons calculer la réflectance au sommet de l'atmosphère à partir de l'équation suivante :

$$\rho = \pi L / (E \cos (\theta_s))$$

Avec : ρ = réflectance dans la bande spectrale considérée

L = Luminance équivalente dans la bande choisie ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$)

E = constante solaire dans la bande spectrale considérée ($\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}^{-1}$)

θ_s = angle zénithal solaire

Les valeurs de E sont données dans les en-têtes des fichiers fournis avec les images satellitaires. L'éclairement au niveau du sol variant selon les perturbations engendrées par la traversée de l'atmosphère (les données atmosphériques ne sont pas disponibles pour calculer l'éclairement reçu au niveau du sol), on travaille donc sur les réflectances équivalentes enregistrées au sommet de l'atmosphère.

- **La normalisation topographique :**

L'influence de la topographie sur des images satellitaires engendre des mesures de réflectances différentes pour des surfaces de même nature spectrale ou très similaires. Le modèle de correction direct le plus simple est basé sur l'hypothèse que la surface est Lambertienne, c'est-à-dire que la surface a une luminance égale quand elle est vue de toutes les directions. Le modèle de normalisation Lambertien corrige simplement les valeurs de luminance par le cosinus de l'angle d'incidence solaire.

Ce modèle de normalisation topographique tient compte de la variation d'illumination en fonction de la pente par rapport au soleil, mais ne prend pas compte de l'angle de visée. On utilise l'équation suivante pour normaliser la luminance :

$$L_n = L \times \frac{\cos \theta_s}{\cos i}$$

Avec :

L_n = Luminance normalisée, exprimé en compte numérique

L = Luminance mesurée par le capteur, exprimée en compte numérique ou réflectance

θ_s = angle zénithal solaire

i = angle d'incidence solaire et $\cos i = \cos \theta_n \cos \theta_s + \sin \theta_n \sin \theta_s \cos (\phi_s - \phi_n)$

Ce modèle est décrit par Justice *et al.* (1979, 1981). Strahler *et al.*(1978) ont examiné ce modèle dans le cas de données LANDSAT. Par ailleurs, Jones *et al.*(1988) ont étendu son application dans le cas de données SPOT HRV.

Afin d'avoir une meilleur appréhension des différents angles utilisées (angle zénithal solaire et angle d'incidence solaire) pour l'étalonnage radiométrique et la normalisation topographique, nous avons représenté la géométrie de la visée entre le soleil, la surface observée et le capteur (Figure 28).

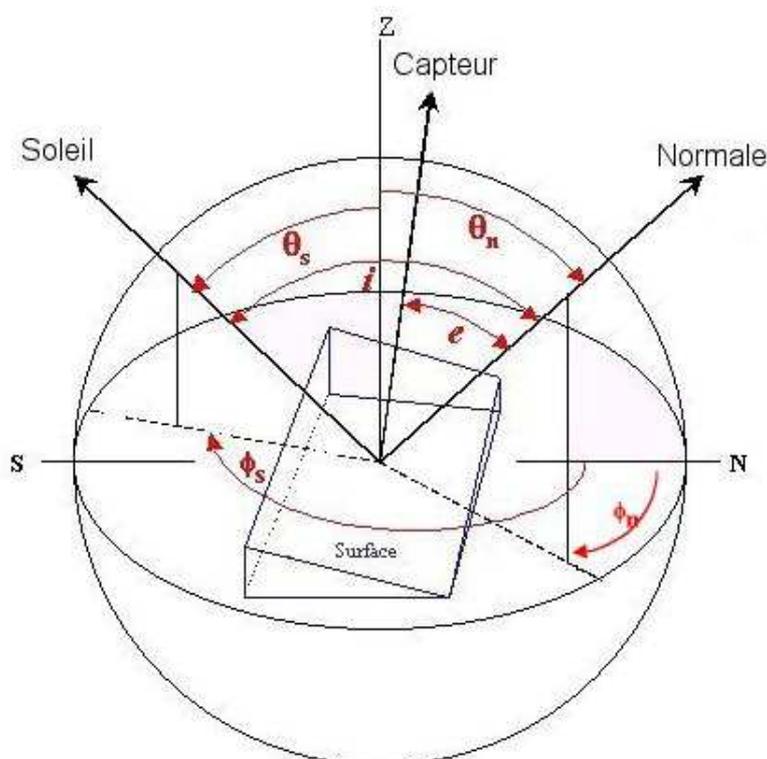


Figure 28. Géométrie de la visée entre le soleil, la surface observée et le capteur.

Avec :

i = angle d'incidence solaire

e = angle de visée

θ_s = angle zénithal solaire

θ_n = Pente

ϕ_s = angle azimutal solaire

ϕ_n = angle d'orientation de la surface

- **La fusion de résolution :**

La série temporelle doit être constituée d'images SPOT ayant la même résolution spatiale (10 mètre) or, le format brut des images SPOT 4 multispectrale est du « XI », pixel à 20 mètres. La fusion d'images entre les bandes multispectrales et la bande panchromatique de SPOT 4 donne une image multispectrale (4 bandes) à la résolution de la panchromatique (10 mètres). Ce format est appelé « PXI ». Dans le cadre du projet ISLE-Réunion, les données satellitaires mises à disposition par le CNES via Spot Image ont subi le pré-traitement de fusion (P+XS) entre les quatre bandes multispectrales et la couche panchromatique.

Nous avons testé l'impact de ce ré-échantillonnage sur la radiométrie en comparant la radiométrie d'une image brute multispectrale à 20 mètres avec celle d'une image multispectrale ré-échantillonnée à 10 mètres. Cette vérification nous a paru nécessaire avant d'engager toute analyse ou interprétation des images. La méthode est appliquée sur une image SPOT 4 en date du 01/04/02. Les deux scènes sont orthorectifiées avec une RMSE inférieure à 1 pixel. Les extractions sont faites sur les comptes numériques bruts codés sur 8 bits.

On utilise cinq zones (Figure 29) sur lesquelles sont faites les extractions des valeurs de la radiométrie sur les quatre bandes pour les deux images. Une couche vecteur est créée afin d'extraire et de calculer automatiquement les statistiques zonales par polygone.

ID	Surface (ha)	Nord	Sud
1	2,64	166947,77	72801,20
2	3,11	166562,33	75373,18
3	2,24	184842,02	30140,25
4	4,61	136833,83	71118,46
5	9,68	140700,19	51240,22

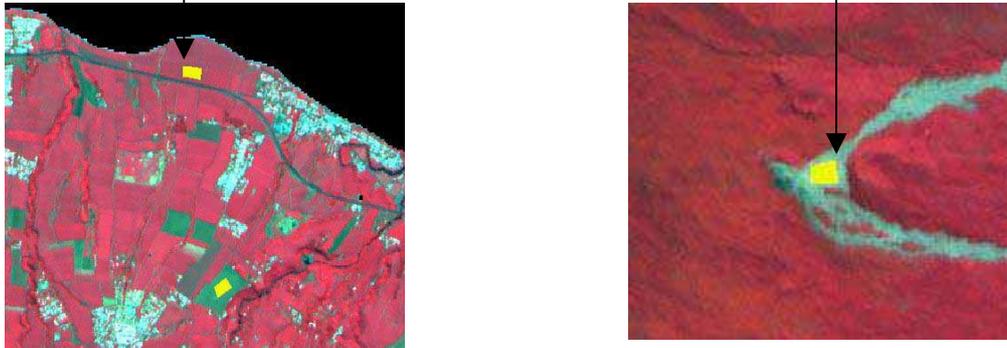


Figure 29. Localisation et surface des sites utilisés pour le contrôle de la radiométrie entre les images SPOT 4 fusionnées et non fusionnées.

La méthode consiste à comparer les valeurs des moyennes entre les images XI et PXI pour chaque polygone (Tableau 9). On peut estimer l'erreur quadratique moyenne existant entre les deux images pour chaque bande (Tableau 10).

Tableau 9. Exemple d'extraction des valeurs radiométriques des cinq sites d'études dans la bande XS1 pour les deux images.

01/04/02		XS1					
XI (20m)	Surface (ha)	ID	MAX	MIN	MEAN	RANGE	STD_DEV
	2,64	1	81	76	77,772	6	1,134
	3,11	2	71	67	69,104	5	0,819
	2,24	3	103	91	97,660	13	2,446
	4,61	4	176	84	118,702	93	18,633
	9,68	5	60	43	47,783	18	2,139

01/04/02		XS1					
PXI (10m)	Surface (ha)	ID	MAX	MIN	MEAN	RANGE	STD_DEV
	2,64	1	82	75	77,921	8	1,380
	3,11	2	73	67	69,335	7	1,242
	2,24	3	105	92	98,770	14	2,606
	4,61	4	178	75	118,066	104	21,151
	9,68	5	58	42	47,517	17	1,960

Ce sont les valeurs moyennes de chaque bande pour chacun des cinq sites qui sont utilisées pour calculer l'erreur quadratique moyenne par bande, indicateur d'une différence de valeur entre les deux images (Tableau 10).

Tableau 10. Calcul de la RSME pour chaque bande entre les valeurs radiométriques des deux images.

XS1		XS2		XS3		XS4	
XI	PXI	XI	PXI	XI	PXI	XI	PXI
77,772	77,921	89,702	89,872	55,456	55,148	61,912	61,015
69,104	69,335	51,866	51,787	124,119	124,201	70,358	70,512
97,660	98,770	105,98	106,636	99,66	100,92	95,3	96,647
118,702	118,066	123,519	122,496	84,154	84,755	89,423	89,194
47,783	47,517	36,409	36,067	81,374	81,686	52,975	53,204
RMSE 0,597		RMSE 0,571		RMSE 0,655		RMSE 0,741	

Les écarts observés entre les valeurs radiométriques d'une image avant et après fusion restent faibles. L'écart augmente en fonction des bandes, le plus élevé se trouvant dans la bande du moyen infrarouge (XS4). L'erreur est acceptable car au maximum elle est inférieure à 1% de la valeur du compte numérique.

- **Inter-étalonnage des images SPOT 4&5 :**

La question de l'inter-étalonnage des capteurs s'est posée assez tôt dans le traitement des données quand les premières séries temporelles ont été analysées. En effet, comme on peut le voir sur la Figure 30, les réflectances acquises avec le satellite SPOT5 dans le proche infrarouge (XS3) sont systématiquement plus basses que celles acquises avec le satellite SPOT4. On peut supposer, même si les effets sont moins forts en raison d'une dynamique plus faible du signal, qu'il en est de même dans tous les canaux.

Pour corriger ces effets « capteur », nous avons appliqué et comparé deux méthodes :

1. Inter-étalonnage des capteurs HRG et HRVIR par la méthode dite des « invariants ».
2. Mise à jour des coefficients d'étalonnage radiométrique, fournis par le CNES, et tenant compte de la dérive de la sensibilité des capteurs.

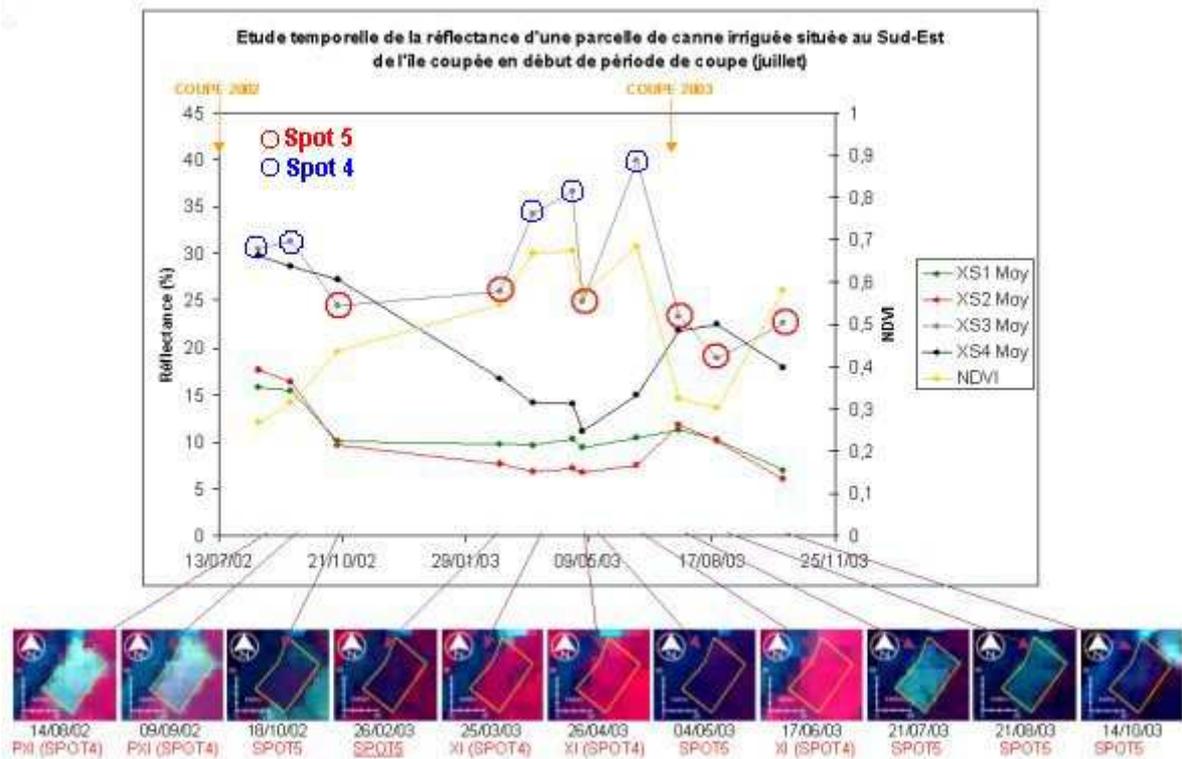


Figure 30. Evolution des réflectances d'une parcelle de canne à La Réunion entre deux coupes (réflectances mesurées par SPOT 4&5).

La méthode d'inter-étalonnage par points invariants :

La méthode d'inter-étalonnage par points invariants se base sur l'hypothèse de stabilité de la réflectance d'une surface dans le temps (tarmac d'aéroport, lave volcanique, toits de bâtiment...). On identifie des points « invariants » présentant une large gamme de réflectance.

Les invariants doivent être suffisamment grands pour limiter les erreurs de superposition des images, et dégagés de nuage, sur la série d'images à étalonner (Tableau 11 et 12). L'équilibre doit ensuite être à peu près maintenu entre le nombre d'images des satellite SPOT 4&5. Les réflectances sont extraites aux points invariants (pixels) sur les images SPOT 4 et SPOT 5. Nous avons remarqué une différence des réflectances enregistrées d'un satellite à l'autre.

Tableau 11. Détails des extractions des valeurs de réflectances enregistrées par SPOT4 sur les points invariants.

	SPOT 4						
	X	Y	nb images	XS1	XS2	XS3	XS4
Bâti Port	137884	70161	6	43,70	46,53	56,52	41,97
Tarmac Saint-Pierre	149783	28667	7	10,15	8,52	9,29	9,44
Lave Volcan	177128	37695	7	8,18	7,40	6,58	6,97
Forêt des hauts	154922	50938	5	6,99	4,86	27,26	11,42
Terrain antenne	134818	67470	6	9,73	8,95	15,85	20,43
Renforts rivière	136487	69096	5	16,53	15,96	20,29	17,42
Végétation littoral Nord	147533	77550	6	7,78	5,40	29,08	11,86
Bâti Saint-Denis	157161	76403	6	40,78	46,65	54,28	40,01
Ciment Clair	136525	69494	5	21,60	23,08	23,65	19,92
Cible Foncée	139165	65571	7	7,93	5,40	5,89	4,94

Tableau 12. Détails des extractions des valeurs de réflectances enregistrées par SPOT5 sur les points invariants.

	SPOT5						
	X	Y	nb images	XS1	XS2	XS3	XS4
Bâti Port	137884	70161	5	29,06	37,13	43,41	32,08
Tarmac Saint-Pierre	149783	28667	6	8,58	7,16	8,30	9,84
Lave Volcan	177128	37695	6	7,03	6,66	6,68	7,37
Forêt des hauts	154922	50938	5	6,40	4,71	23,62	12,15
Terrain antenne	134818	67470	5	8,49	7,93	14,31	19,88
Renforts rivière	136487	69096	5	13,35	13,01	15,94	15,71
Végétation littoral Nord	147533	77550	5	7,00	4,89	21,90	12,15
Bâti Saint-Denis	157161	76403	6	32,31	40,55	46,99	36,00
Ciment Clair	136525	69494	5	17,65	18,66	19,50	20,28
Cible Foncée	139165	65571	5	6,89	4,81	5,97	7,30

Pour chaque canal, la moyenne des réflectances obtenues avec chaque satellite est calculée, toutes dates confondues (Tableau 11 et 12). On obtient deux valeurs de réflectance par cible. Par une droite de régression entre ces valeurs de réflectances SPOT 4 et SPOT 5, on obtient l'équation de la régression des réflectances de SPOT 4 en fonction de SPOT 5, ici pris comme référence.

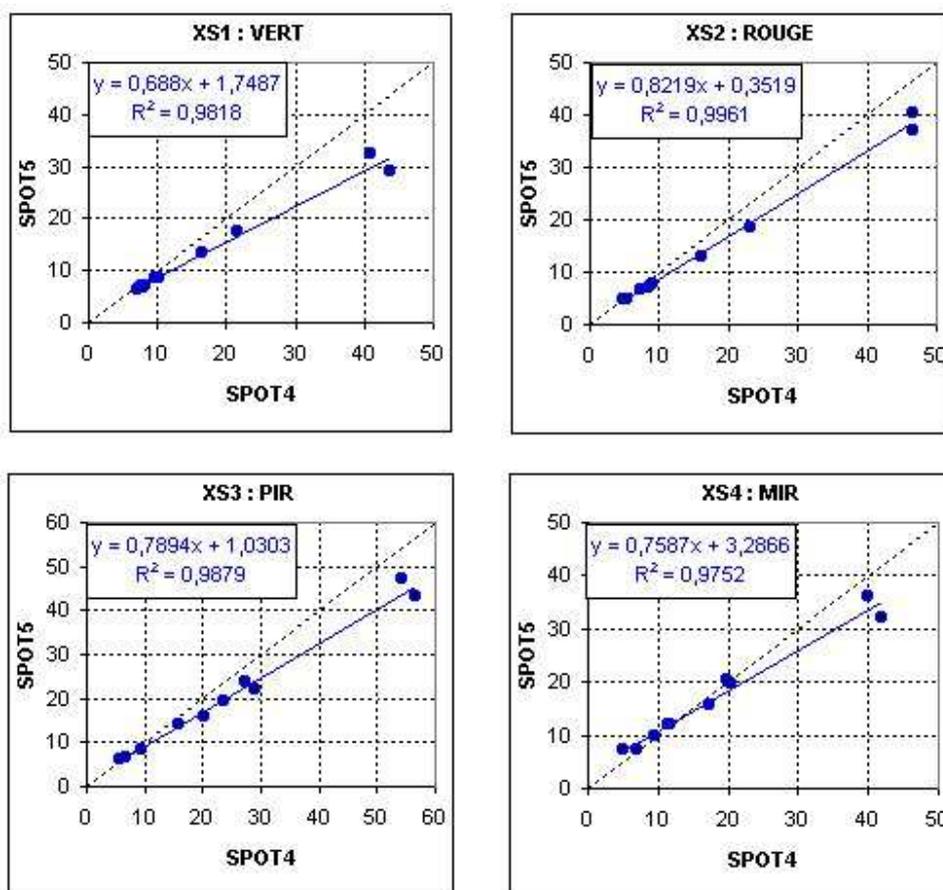


Figure 31. Droites d'inter-étalonnage obtenus par bande entre SPOT4 et SPOT5.

Cette méthode nous a permis de normaliser les réflectances enregistrées. Le nombre de points est faible mais il est difficile de trouver des invariants couvrant d'une part la gamme des réflectances mesurées et d'autre part dégagés de nuage sur toutes les images de la série temporelle.

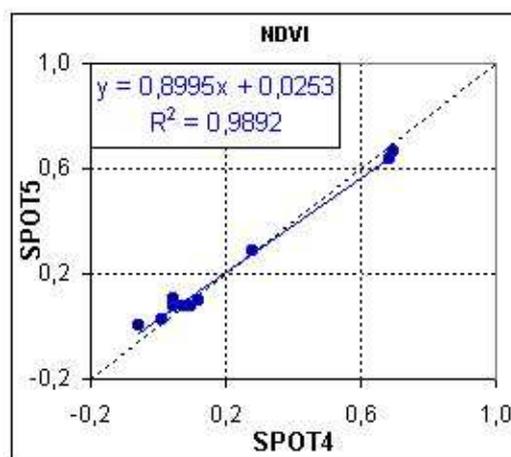


Figure 32. Droites d'inter-étalonnage obtenus pour l'indice de végétation NDVI entre SPOT4 et SPOT5.

On peut remarquer que le NDVI est moins sensible à l'inter-étalonnage des capteurs que la réflectance. Cette méthode ne différencie pas les instruments à bord (exemple HRVIR1 et HRVIR2), essentiellement par manque de données et sur l'hypothèse du vieillissement « parallèle » des capteurs.

Tableau 13. Récapitulatif des coefficients d'inter-étalonnage obtenus par la méthode des points invariants.

$\rho_{SPOT5} = f(\rho_{SPOT4})$	REUNION		
	a	b	R ²
Vert (XS1)	0,6880	1,7487	0,98
Rouge (XS2)	0,8219	0,3519	0,99
PIR (XS3)	0,7894	1,0303	0,99
MIR (XS4)	0,7587	3,2866	0,98
NDVI	0,8995	0,0253	0,99

La méthode d'inter-étalonnage par mise à jour des coefficient d'étalonnage :

Le coefficient d'étalonnage a_λ ($W^{-1} \cdot m^2 \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) est fourni par Spot Image pour chaque bande spectrale λ . Ce coefficient est calculé pour prendre en compte l'*Absolute Calibration Gain* (A_k) du capteur et le gain utilisé à bord lors de l'acquisition de l'image (*Analog Gain Value* G_m qui dépend du capteur, de la bande spectrale et du *Gain Number* de 1 à 10 lors de l'acquisition de l'image) :

$$a_\lambda = A_k \times G_m$$

Tableau 14. Mise à jour des coefficients d'étalonnage A_k (en jaune) fournis par SPOT Image.

Date	Physical_calibration_date	Satellite	Capteur	Coefficients etalonnage ($W^1.m^2.sr.\mu m$)				Gain number			
				XS1	XS2	XS3	XS4	XS1	XS2	XS3	XS4
21/01/2003	2000-03-01	5	2	1,0410	1,3438	1,7671	6,8353	4	4	5	4
11/02/2003	2002-11-01	5	2	1,0032	1,2995	1,8358	8,3357	4	4	5	4
29/03/2003	2002-11-01	5	2	1,0032	1,2995	1,8358	8,3357	4	4	5	4

On voit bien dans le (Tableau 14) que pour un même instrument, mêmes gains, les coefficients d'étalonnage sont différents, ils ont été mis à jour entre le 21/01/03 et le 11/02/03. La différence est faible dans le visible (XS1 et XS2) et le pIR (XS3), inférieur à 4%, mais très importante dans le MIR (XS4), plus de 22%.

Le CNES est actuellement en train de revoir toute sa méthodologie d'étalonnage des capteurs ; de nouvelles valeurs d'étalonnage ont été calculées et devraient être mises en place par Spot Image fin octobre 2004. Cette mise à jour des coefficients A_k tiendra compte de la perte de sensibilité des capteurs avec le temps. Cette perte est importante dans les premières semaines de mise en service du capteur puis devient faible mais régulière.

D'une façon générale, les étalonnages relatifs entre les deux instruments d'un même satellite sont peu différents (entre 0,9 et 1,05). Ce résultat conforte notre méthode d'inter-étalonnage par invariants qui ne tient pas compte de la différence entre capteurs à bord d'un même satellite. Par contre, les variations relatives d'étalonnage sont importantes entre SPOT4 et SPOT5 (environ 0,8).

Les exemples de corrections radiométriques par la méthode des invariants et après la mise à jour des coefficients d'étalonnage fournis par le CNES, sur trois parcelles de canne à La Réunion sont présentés en Figure 33.

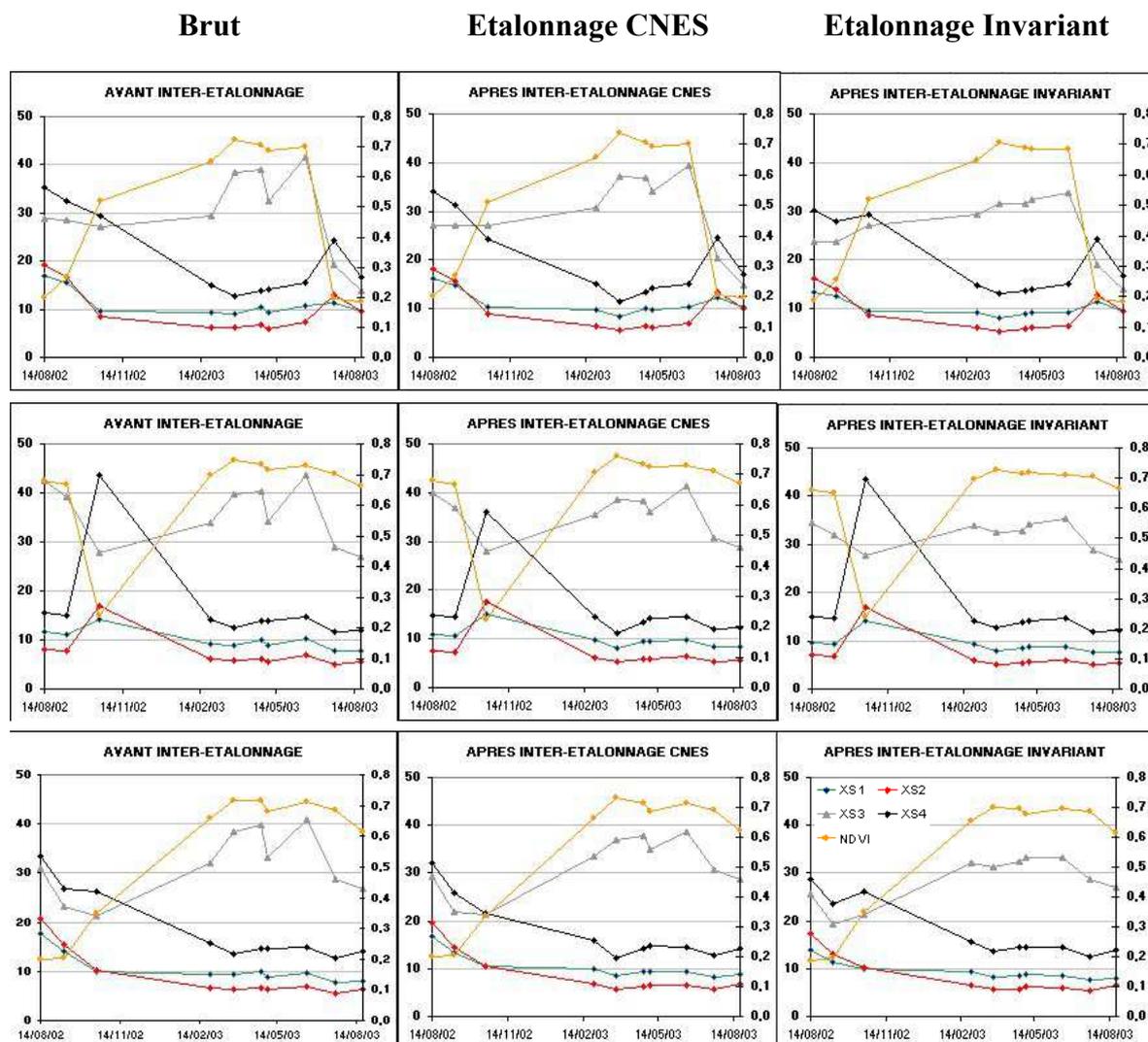


Figure 33. Exemples d'évolution des réflectances pour trois parcelles de canne à La Réunion, sans inter-étalonnage (colonne de gauche), avec étalonnage par mise à jours par le CNES des coefficients a_λ (colonne du milieu) et avec étalonnage par la méthode des points invariants (colonne de droite).

La Figure 33 illustre que la meilleure normalisation des effets capteurs est obtenue en appliquant la méthode d'inter-étalonnage par points invariants (visuellement, meilleur lissage des évolutions temporelles surtout dans le proche infrarouge, XS3). De plus, cette méthode permet de normaliser (pour ce jeu de données) la série d'images par rapport à d'autres paramètres comme les angles de visée et les angles solaires qui sont sources de perturbation du signal enregistré. Ainsi, dans le cadre de notre étude, la méthode des points invariants sera utilisée pour inter-étalonner les capteurs embarqués sur SPOT4 et SPOT 5.

Ces données doivent maintenant être couplées et traitées afin d'évaluer l'efficacité de la télédétection comme outils d'aide à la gestion de la canne à sucre à La Réunion.

3 RESULTATS ET DISCUSSION

Après l'analyse et le traitement des différentes données acquises, nous nous intéresserons à l'apport de la télédétection au suivi de la croissance de la canne et dans l'utilisation d'un modèle de production.

Analyses des données

Nous avons procédé à l'analyse des différentes données acquises sur le terrain et par télédétection. Nous présenterons tout d'abord l'analyse des paramètres biophysiques de surface, puis nous passerons à l'analyse des facteurs de production pour finir par l'étude de l'évolution temporelle du signal.

3.1.1 Analyses des paramètres biophysiques de surface

L'indice de surface foliaire (LAI) et le taux d'azote (T_N) sont les paramètres biophysiques que nous analyserons. Nous procéderons ensuite à des tests statistiques nous permettant de mieux comprendre la variabilité de notre jeu de données biologiques.

3.1.1.1 Evolution du LAI au cours du cycle

L'évolution temporelle du LAI peut être représentée en fonction du stade de croissance exprimé en mois (à partir de la date de plantation ou dernière coupe) ou en somme des degrés jours accumulés par la canne. La différence d'altitude entre nos différents sites de mesure, donc de température, influence le développement de la canne à sucre. La somme des degrés($^{\circ}$ C)/jour, accumulés entre la date de coupe précédente et la date de la mesure, renseigne de manière pertinente (Martiné, 2003) sur le stade de croissance de la canne à sucre et sera utilisée pour présenter nos résultats.

Les mesures faites lors du suivi temporel comportaient trois à quatre placettes de mesures par parcelle. Les données ont été regroupées par parcelle en moyennant les valeurs des placettes de mesures.

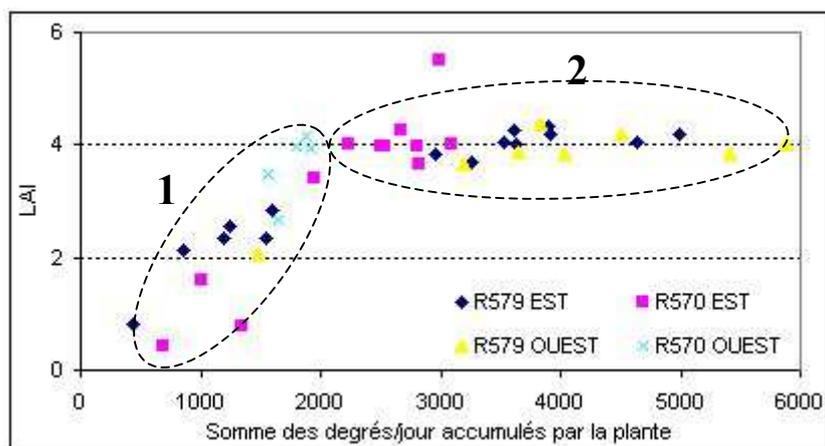


Figure 34. Evolution de la valeur du LAI parcellaire par localisation et par variété, en fonction des degrés jours accumulés par la plante (La Réunion, 2002).

La Figure 34 présente l'évolution du LAI en fonction de la somme des degrés jours accumulés pour les variétés R570 et R579. Sans faire de distinction entre les variétés et les localisations, il semble que le jeu de données couvre la totalité du cycle annuel de la canne à sucre. On observe clairement deux phases caractéristiques du développement du couvert de la canne à sucre (Figure 34). Le LAI progresse linéairement pendant les six premiers mois (2000-2500 degré/jours) puis se stabilise autour de la valeur 4. L'évolution du LAI, variable décrivant l'état du couvert végétal, est cohérente avec les travaux déjà effectués sur la canne à sucre (Martiné, 2003).

Cependant, en distinguant les quatre cas (deux variétés, deux localisations), on remarque que le nombre de points et leur distribution dans le temps varient en fonction du lieu et de la variété mesurées.

Les mesures réalisées sur le site « ouest » ne sont pas distribuées le long du cycle et correspondent plutôt à la phase de stabilisation du LAI. Les données collectées sur le site « est », malgré une absence de données pour les stades de croissance de la R579 se situant entre 1500 et 3000 degrés/jour, sont plus nombreuses et leur distribution est plus homogène.

3.1.1.2 Evolution du taux d'azote au cours du cycle

Tout comme le LAI, le taux d'azote (T_N) est étudié par variété et par localisation afin de mieux appréhender le jeu de données. Certaines mesures n'ont pu être représentées car les dates de coupe ou de plantation ne sont pas connues avec certitude.

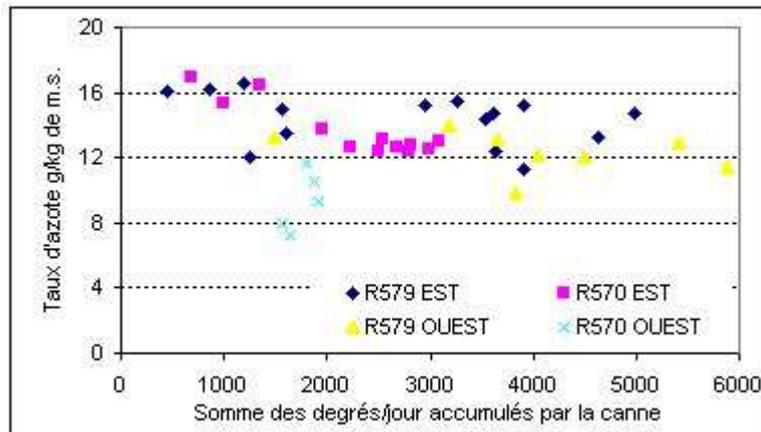


Figure 35. Evolution du taux d'azote foliaire par variété et localisation (La Réunion, 2002).

Le T_N de la canne à sucre nous renseigne sur le degré de maturité de la culture ; l'étude de ce paramètre n'est intéressante qu'une fois que la canne a fini sa croissance végétative, après 2500 degrés/jour (de 4 à 6 mois).

Cependant, la distribution des points sur la Figure 35 ne montre aucune tendance évidente. Seule une légère diminution globale du taux d'azote au cours du cycle (de 16 à 12 g/kg de m.s.) est remarquable.

3.1.1.3 Analyse de variance

Afin de mieux comprendre la variabilité de notre jeu de données biologiques, nous avons fait des tests statistiques sur les effets « variété » et « lieu ». Les données agronomiques du suivi temporel ne nous permettent pas d'obtenir des classes avec le même nombre de répétitions. Nous étudions l'influence des facteurs « lieu » et « variété » sur le LAI et le T_N à partir des données terrain issues du deuxième protocole de mesure destinées à l'analyse hyper-spectrale CASI. Ce jeu de données présente des classes homogènes permettant une analyse de la variance (ANOVA).

- **Les facteurs « lieu » et « variété »**

Nous utilisons une démarche dite inductive. Nous allons partir des données terrain pour évaluer les effets de facteurs exogènes sur les mesures de LAI et T_N . Nous admettons la loi normale comme étant la plus adaptée à notre jeu de données biologiques.

Les paramètres biologiques mesurés lors de l'acquisition des données terrain sont fonction de trois facteurs :

- le lieu, le Nord-Est, ou l'Ouest
- la variété, R570 ou R579
- le stade de croissance

Chaque parcelle représente une combinaison des facteurs. Nous avons implanté trois placettes par parcelle. Nous réalisons donc une répétition de trois mesures par parcelle, ce qui représente au total 27 combinaisons à étudier. L'analyse de variance vise à mettre en évidence les effets de chacun des trois facteurs sur les mesures de T_N et de LAI.

- **Regroupement des données en vue de l'analyse**

Dans le nord-est, nous avons pu mesurer trois stades de croissance pour chaque variété. En revanche dans l'ouest, pour la variété R570, nous possédons seulement les données d'une parcelle âgée de 10 à 12 mois. Pour la variété R579, nous avons pu mesurer des parcelles âgées de 5 à 6 mois et de 8 à 10 mois.

Pour évaluer l'influence du lieu sur les mesures, nous devons éliminer l'effet de la variété et réaliser une analyse de variance sur les groupes 1 et 2 (Tableau 15) pour chaque paramètre biologique.

Pour identifier l'existence d'un effet « variété » et « stade de croissance » sur les mesures de chaque paramètre biologique, nous nous concentrons sur les données du nord-est, en effectuant une analyse de variance (ANOVA) sur les groupes A et B (Tableau 15). Les résultats détaillés des tests statistiques sont présentés en annexe 13.

Tableau 15. Identification des groupes pour les deux analyses de variance.

Zone géographique	Variété	Stade de croissance	Groupe	
Nord-Est	R579	5 à 6 mois	1	A
		8 à 10 mois		
		10 à 12 mois		
	R570	5 à 6 mois		B
		8 à 10 mois		
		10 à 12 mois		
Ouest	R579	5 à 6 mois	2	
		8 à 10 mois		
	R570	10 à 12 mois		

Pour analyser l'effet du lieu ↗

Pour analyser l'effet de la variété et du stade de croissance ↗

Nous présentons les résultats de l'analyse de variance sur l'effet « lieu » et sur l'effet « variété » et « stade de croissance ».

- **Résultats de l'analyse de variance**

a) Analyse de l'effet « lieu »

Pour une même variété (R579) et pour les deux stades de croissance mesurés (5-6 mois et 8-10 mois), les moyennes de LAI sont identiques indifféremment du lieu. On observe également une différence significative entre les stades de croissance. En effet, de 5-6 mois à 8-10 mois, le LAI augmente tandis que le T_N diminue (Figure 36). Ces tendances traduisent l'évolution normale de ces deux paramètres.

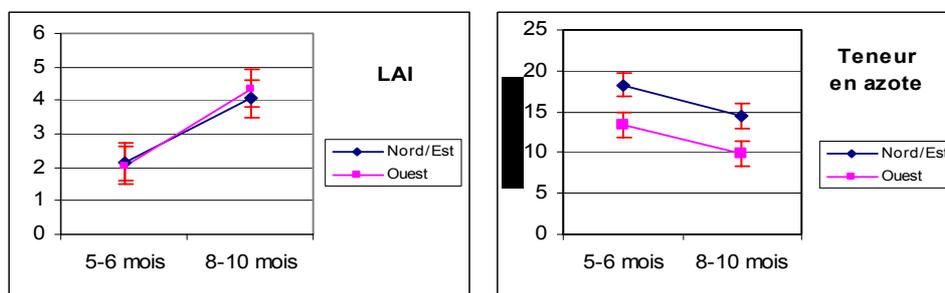


Figure 36. Comparaison des moyennes de LAI et de teneur en azote entre le nord-est et l'ouest pour la variété R579 ; les barres d'erreurs représentent les plus petite différence significative (*ppds*).

La Figure 36 nous montre qu'il existe une influence du lieu uniquement en ce qui concerne la teneur en azote. En effet, la différence est significative entre les moyennes de teneur en azote

puisque les *ppds* (plus petite différence significative) permettent de différencier les données du nord-est de l'ouest (Annexe 13). Cette différence peut être une conséquence de pratiques culturales différentes entre le nord-est et l'ouest. En effet, les parcelles de l'ouest sont irriguées contrairement à celles du nord-est, situées en zone pluviale.

b) Analyse de l'effet « variété » et « stade de croissance »

Nous observons une évolution des paramètres en fonction des différents stades du développement de la culture. En effet, le LAI augmente (développement du couvert végétal) tandis que les valeurs de teneur en azote diminuent (Figure 37).

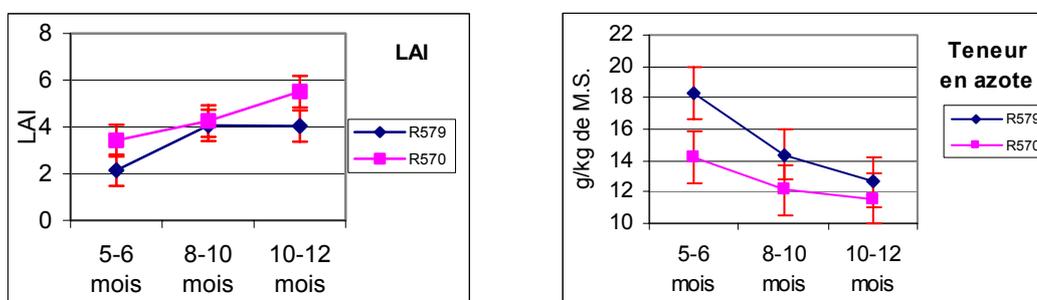


Figure 37. Comparaison des moyennes de LAI et des teneur en N par variété pour le site nord-est ; les barres d'erreurs représentent les *ppds*.

Quel que soit le paramètre mesuré, l'analyse de variance sur les groupes A et B nous montre une influence de la variété et du stade de croissance sur les mesures. La variété R570 présente un LAI qui progresse régulièrement tandis que celui de la variété R579 stagne en fin de cycle. Ces observations sont cohérentes avec les caractéristiques de chaque variété (Annexe 3). En début de cycle, la R570 présente un démarrage très fort car son tallage est plus abondant que la R579. De plus, en fin de cycle, la R579 se dépaille alors que la R570 non.

D'une manière générale, la chute de la teneur en azote s'atténue progressivement. L'effet « variété », important en début de croissance (R579 plus vert foncé que la R570) n'est plus significatif à la maturation. Cette évolution va dans le sens des observations réalisées par Pouzet et al. (2003) à La Réunion.

- **Conclusion sur l'analyse de variance :**

Il existe un effet « variété » sur les valeurs de T_N . L'influence du lieu n'est quant à lui perceptible que pour les valeurs de teneur en azote. Le stade de croissance influe également sur les valeurs de LAI et T_N , traduisant l'évolution de ces paramètres au cours du développement de la canne.

Pour la suite de l'analyse de données, on peut utiliser les valeurs de LAI quel que soit le lieu de la prise de mesure pour une variété donnée. Par contre les mesures de taux d'azote doivent être traitées par lieu et par variété.

3.1.1.4 Relation entre les paramètres physiologiques

Nous allons dans cette partie traiter et analyser les données concernant les variables physiologiques mesurées lors du deuxième protocole de mesures pour l'exploitation des données CASI (principalement des analyses foliaire, N P K et teneur en eau) et des données de Brix et SPAD collectées durant le troisième protocole de mesures.

L'étude de ces paramètres est particulièrement intéressante pour la compréhension du phénomène de maturation de la canne qui est assez complexe, dépendant de plusieurs variables. Le stade de croissance est le paramètre primordial. Une canne à sucre ne passe en phase de maturation qu'à partir d'un certain stade, une fois sa croissance végétative terminée. De plus, comme nous l'avons vu précédemment (Partie 1.1.1), les conditions climatiques jouent un rôle non négligeable. Un autre paramètre ayant une interaction avec la maturation est l'azote disponible, qui peut être mesurée dans les feuilles (T_N). Nous allons, dans un premier temps, étudier les relations qui existent entre teneur en eau, teneur en azote et la couleur des feuilles (SPAD), à partir des données mesurées pendant la campagne CASI.

- **Relation entre la teneur en eau relative, l'azote et la couleur des feuilles**

Durant ce protocole de mesures, neuf parcelles ont été visitées avec trois placettes de mesure par parcelle où nous avons collecté des échantillons de feuille pour analyse chimique. Les

neufs parcelles sont localisées sur les sites nord-est et ouest. Les variétés R570 et R579 y sont représentées. Les données sont disponibles en annexe 11.

La Figure 38 présente la relation entre la teneur en eau relative des feuilles et l'intensité de leur couleur (valeur de SPAD).

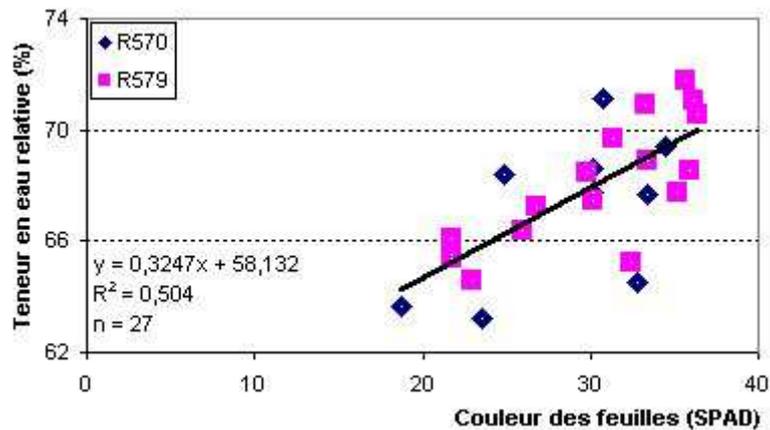


Figure 38. Relation entre la teneur en eau relative des feuilles et leur couleur (valeur de SPAD).

On remarque une relation entre ces deux paramètres physiologiques. Le coefficient de détermination ($R^2 = 0,50$) et le nombre d'observation ($n = 27$) nous indiquent que la relation est significative avec un niveau de probabilité supérieur à 0,01. La valeur de SPAD (couleur des feuilles) est d'autant plus forte que la teneur en eau relative des feuilles augmente.

Par ailleurs, l'azote agit également sur la couleur des feuilles qui fonce avec l'augmentation du taux d'azote. La Figure 39 présente la relation obtenue entre la couleur des feuilles (valeur de SPAD) et la teneur en azote des feuilles.

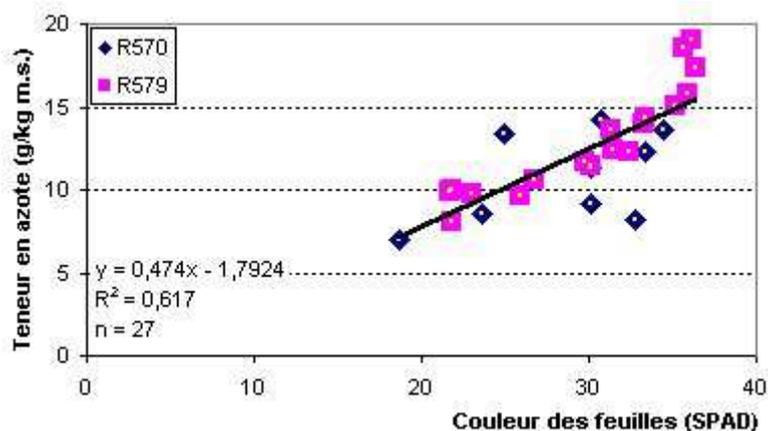


Figure 39. Relation entre la teneur en azote et la couleur des feuilles mesurées avec le SPAD.

La relation est également significative avec un niveau de probabilité supérieur à 0,01. La relation obtenue indique que la teneur en azote des feuilles influe sur leur couleur mesurée avec le SPAD. Plus le taux d'azote dans les feuilles est élevé, plus la valeur de SPAD est forte, traduite par une couleur verte plus foncée.

La mesure de la valeur de SPAD est donc à la fois corrélée à la teneur en eau relative des feuilles et à la teneur en azote des feuilles. On peut utiliser la valeur de SPAD comme un indicateur de l'état hydrique et azoté de la canne. Nous proposons maintenant d'étudier la relation qui existe entre la valeur de SPAD et la richesse de la canne mesurée par le Brix. Si la valeur de SPAD est un bon indicateur de l'état hydrique et azoté de la canne, il pourrait renseigner également sur la richesse de celle-ci. En effet, la teneur en eau relative et la teneur en azote des feuilles sont les deux paramètres à prendre en compte pour quantifier l'état de maturité d'une canne.

- **Relation entre la mesure au SPAD et la valeur de Brix**

Rappelons que le réfractomètre donne une mesure de Brix, quantité de solutés dans le jus de canne. Pour une canne mature ou en phase de maturation, le soluté n'est quasiment constitué que de saccharose ; le Brix donne donc une information sur la richesse de la canne en sucre.

Le troisième protocole de mesure a permis d'obtenir un jeu de données comportant des mesures de SPAD et de Brix simultanées. Les mesures de Brix ont été faites sur trois cannes échantillonnées par parcelle. Chaque canne a fait l'objet de trois mesures de Brix, à chacune de ses extrémités et en son milieu. Ces données ont été moyennées de manière à ce que chaque point représente une valeur parcellaire de SPAD et de Brix (Figure 40).

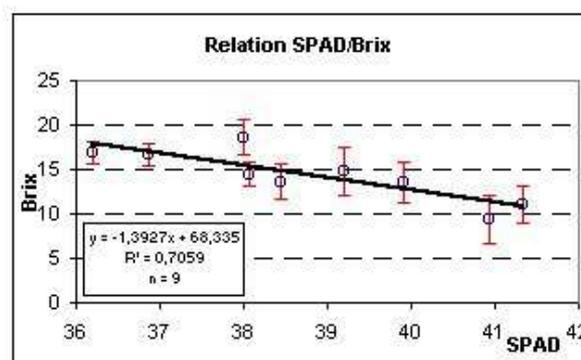


Figure 40. Relation entre les valeurs de SPAD et Brix mesurées lors de la deuxième expérimentation, les barres d'erreurs représentent l'écart type.

Bien que le jeu de données soit assez restreint, le Brix apparaît comme corrélé de manière significative avec un niveau de probabilité supérieur à 0,01. Plus les valeurs de SPAD sont faibles, plus les valeurs de Brix sont fortes. Ce résultat est en adéquation avec les travaux réalisés en Guadeloupe par Pellegrino (2003) qui couvre une gamme de valeurs de SPAD et de Brix plus importantes (Figure 41) dans le cadre du projet SUCRETTE.

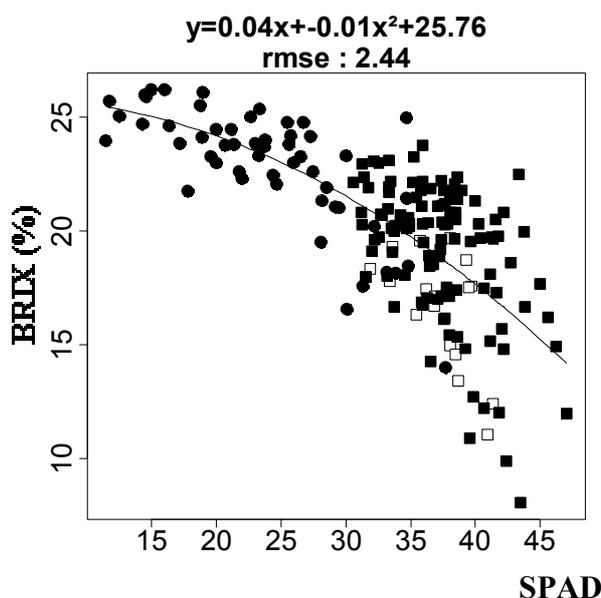


Figure 41. Relation entre les valeurs de SPAD et Brix, moyennes parcellaires pour la Guadeloupe 2003 et 2004 (carrés et ronds noirs) et La Réunion (carrés blanc), d'après Pellegrino (2004).

En effet, on peut observer sur la Figure 41 que les valeurs mesurées en Guadeloupe sont comprises entre 10 et 25 pour le Brix, 15 et 50 pour le SPAD. A La Réunion, les mesures sont de 15 au maximum pour le Brix et de 36 au minimum pour le SPAD. Cela traduit les différents états de la canne, principalement dus aux conditions hydriques très contrastées entre La Réunion et la Guadeloupe, cette dernière étant particulièrement sèche. Moins il y a d'eau disponible pour la canne, plus cela entraîne une faible teneur en azote dans les feuilles, favorisant la maturation : la synthèse et le stockage du saccharose prédominent sur son transport et son utilisation pour la croissance de la canne.

Il semblerait donc bien que la teneur en eau et le taux d'azote des feuilles aient un rôle important dans le phénomène de maturation. Nos résultats ne permettent pas la compréhension totale du phénomène mais mettent en évidence certaines tendances. Lors de la phase de maturation, le taux d'azote et la teneur en eau relative peuvent être utilisés pour appréhender l'état de maturité des cannes. Ces deux paramètres étant corrélés à la valeur de

SPAD, elle sera utilisée comme indicateur de richesse pour des cannes en phase de maturation. Il semble difficile au vu de nos résultats de faire une estimation quantitative de la richesse des cannes en sucre par la seule mesure de la valeur de SPAD, couleur des feuilles. Cependant, une approche relativiste apparaît envisageable. En effet, la richesse en sucre des cannes est estimable de manière relative, traduisant un état de richesse potentiellement supérieur d'une parcelle par rapport à une autre.

3.1.2 Analyse des facteurs de production

Nous avons également étudié les facteurs climatiques qui ont un effet sur la production finale, soient le rendement en canne et le rendement en sucre. Cette analyse a été possible sur les deux exploitations de la zone d'étude du nord-est, exploitations de M. Caruel et M. Barau.

3.1.2.1 *Elaboration du rendement canne*

Les facteurs analysés sont la durée du cycle, la somme des degrés jours accumulés durant le cycle, la pluviométrie et l'ensoleillement. Le jeu de données nous a permis de suivre l'évolution du rendement sur deux années, 2002 et 2003.

- **Influence de la durée du cycle sur le rendement canne final**

Les représentations graphiques (Figure 42 et Figure 43) indiquent qu'il n'y a aucune relation entre le rendement final et la durée du cycle ; ceci est observé chez les deux exploitants et pour les deux années.

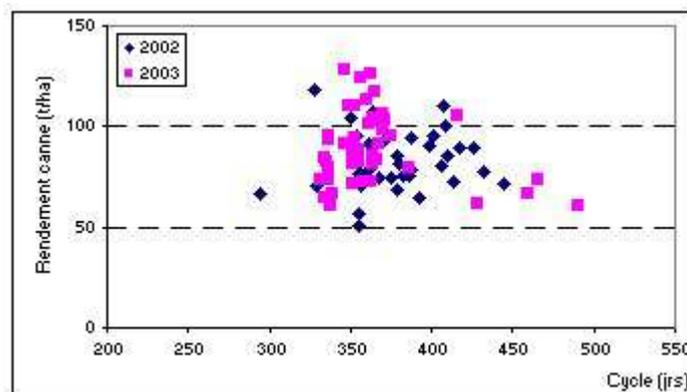


Figure 42. Relation entre le rendement canne final et la durée du cycle pour les parcelles de l'exploitation de M. Barau, cycle cultural 2002 et 2003.

Ce résultat démontre bien que la durée du cycle d'une parcelle n'est pas le facteur déterminant dans le rendement et par conséquent, que d'autres paramètres sont à prendre en compte dans la compréhension de l'élaboration de la biomasse.

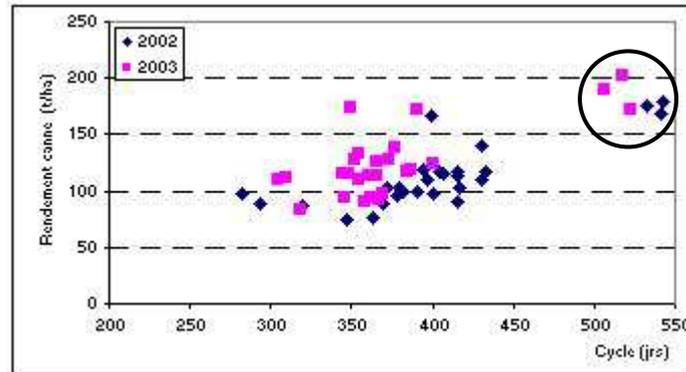


Figure 43. Relation entre le rendement canne final et la durée du cycle pour les parcelles de l'exploitation de M. Caruel, cycle cultural 2002 et 2003 (les points encadrés représentent des replantations, cycle d'un an et demi).

On remarque sur les graphiques (Figure 42 et Figure 43) que les rendements sont supérieurs en 2003 qu'en 2002 pour les deux exploitants.

Dans la suite de notre étude des facteurs de production, nous analyserons uniquement les données du cycle cultural 2002-2003 car les données météorologiques pour le cycle 2001-2002 ne sont pas disponibles. Afin d'estimer l'importance relative de chacun des facteurs sur l'élaboration du rendement final, nous calculerons le coefficient de détermination (R^2) qui existe entre le facteur étudié et le rendement final pour les 31 parcelles observées. En comparant les coefficients de détermination obtenus pour chaque paramètre, nous pourrions déterminer le plus influent sur l'élaboration du rendement final.

- **Influence de la température sur le rendement canne final**

Pour étudier l'influence de la température sur l'élaboration du rendement final, nous allons comparer le cumul des degrés jours durant le cycle avec le rendement final observé pour chaque parcelle.

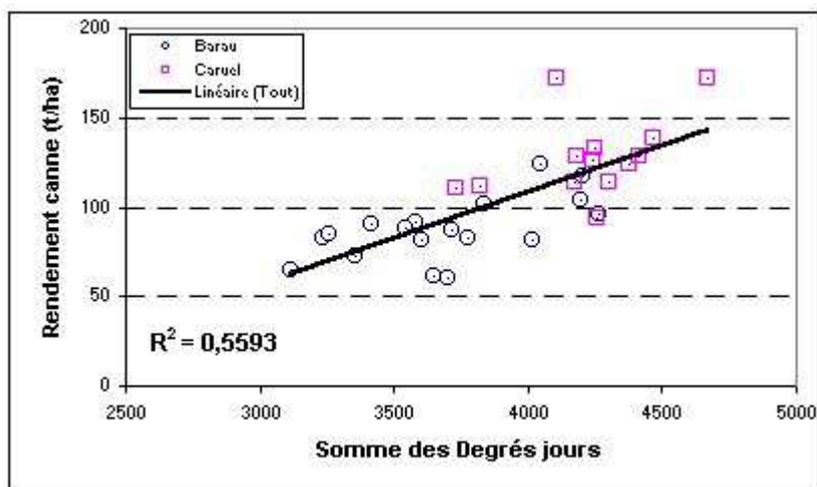


Figure 44. Relation entre le rendement canne final et la somme des degrés jours accumulés durant le cycle cultural 2003. Chaque point représente une parcelle.

L'influence de la température sur le rendement final est plus importante que celle de la durée du cycle cultural ; une relation linéaire peut traduire l'influence de la température. On remarque également que plus la somme des degrés jours accumulés durant le cycle est grande, plus le rendement est important (Figure 44).

La seule différence notable entre ces deux exploitations est l'altitude. En effet, l'exploitation de M. Caruel est située dans une zone dont les altitudes sont inférieures à 100 mètres alors que les parcelles de l'exploitation de M. Barau sont localisées entre 400 et 700 mètres d'altitude.

Traditionnellement, les parcelles de canne situées dans les hauteurs de l'île de La Réunion ont des cycles plus long (jusqu'à un an et demi) de manière à compenser cette perte de degrés jours due à l'altitude. Dans le cas de l'exploitation de M. Barau, la durée des cycles culturaux est quasiment la même que pour M. Caruel, entre 300 et 550 jours (Figure 42 et Figure 43). Ce qui a pour conséquence que les rendements observés chez M. Barau sont plus faibles que chez M. Caruel.

- **Influence des précipitations sur le rendement canne final**

A l'île de La Réunion, contrairement à la température, la pluviométrie augmente avec l'altitude. On retrouve une différence significative entre les précipitations reçues par les deux exploitations. Le coefficient de détermination entre le rendement final en canne et les précipitations ne sera pas calculé car la dispersion des points entre les deux exploitants (Figure 45) n'exprime aucune relation (deux groupes distincts).

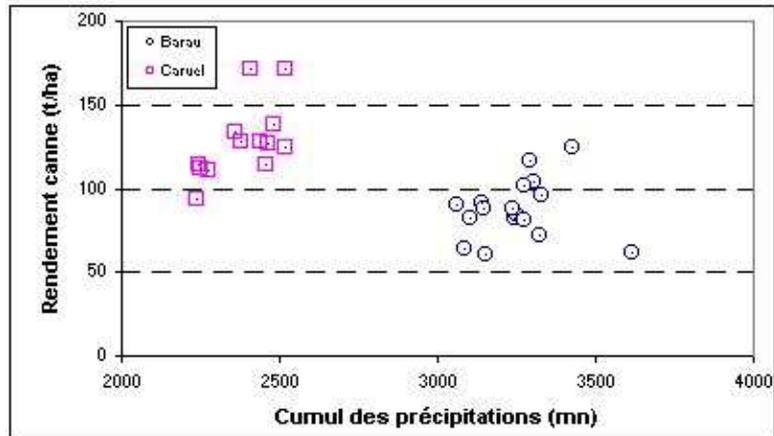


Figure 45. Relation entre le rendement final et le cumul des précipitations durant le cycle culturel 2003, chaque point représente une parcelle.

Si l'on considère uniquement le facteur précipitation, il semblerait, au vu de ces résultats, que le rendement est inversement proportionnel à la quantité d'eau reçue durant le cycle (Figure 45). Cela ne semble pas logique à première vue. Si l'on considère simultanément le facteur température et le facteur précipitation, l'effet de la température semble être prédominant sur l'élaboration du rendement final par rapport aux précipitations. Ceci peut s'expliquer par les fortes précipitations rencontrées dans l'est de l'île : cette zone se trouve en conditions hydriques non limitantes.

3.1.2.2 *Elaboration du rendement Sucre*

Concernant l'analyse de l'élaboration du rendement sucre, nous avons pu uniquement travailler sur les données de l'exploitation de M. Barau, les données de richesse de M. Caruel n'étant pas disponibles.

Les facteurs analysés sont la durée du cycle, la somme des degrés jours accumulés durant le cycle, la pluviométrie et l'ensoleillement. Le jeu de données nous a permis de suivre l'évolution du rendement sucre en fonction du nombre de jours du cycle sur deux années, 2002 et 2003. En ce qui concerne les trois facteurs climatiques, notre analyse se portera sur l'année 2003.

- **Influence de la durée du cycle sur le rendement sucre final :**

On représente (Figure 46) la relation entre la richesse saccharine, le rendement sucre et durée du cycle cultural.

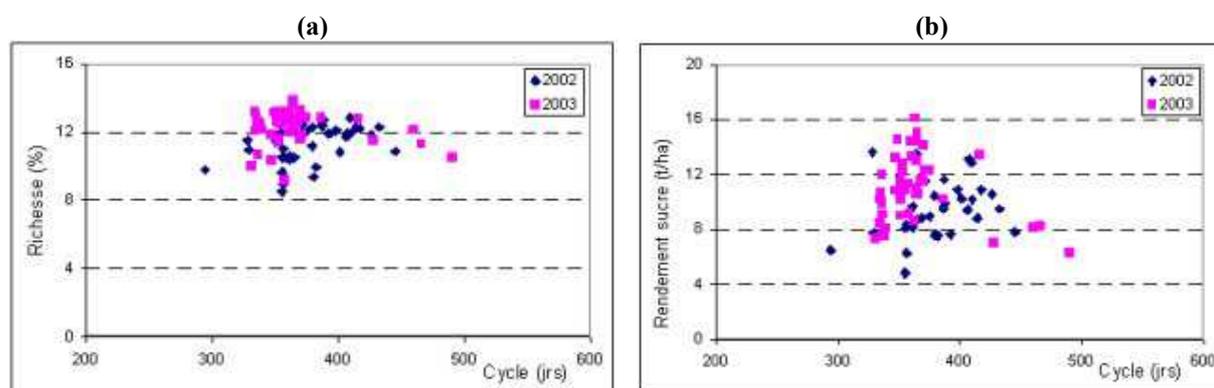


Figure 46. Relation entre la richesse saccharine (a), le rendement sucre (b) et la durée du cycle pour les parcelles de l'exploitation de M. Barau, cycles culturaux 2002 et 2003.

Comme pour le rendement canne, le rendement sucre observé sur l'exploitation de M. Barau pour l'année 2003 est supérieur à l'année 2002 (Figure 46). On remarque également qu'aucune tendance ou relation entre la richesse en sucre, le rendement canne et la durée du cycle n'apparaît clairement.

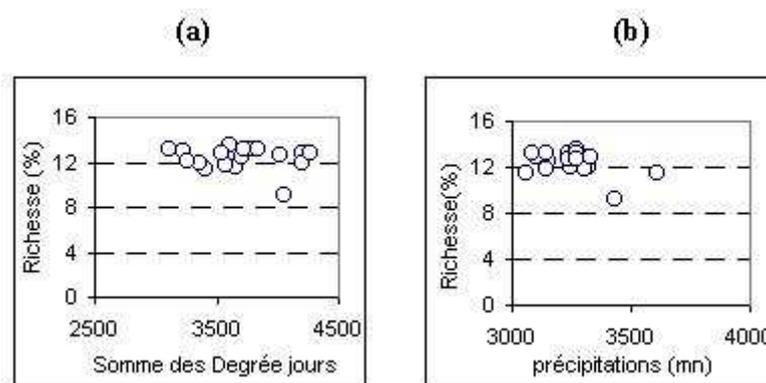


Figure 47. Relation entre la richesse saccharine et le cumul des degrés jours (a), les précipitations (b).

La Figure 47 met bien en évidence le fait qu'aucune relation n'existe entre le rendement en sucre final et les conditions climatiques à l'échelle d'une exploitation. On remarque également que l'amplitude des valeurs est faible, ce qui signifie que les parcelles ont

quasiment toutes la même richesse saccharine, contrairement au rendement en canne qui présente une plus grande variabilité en fonction des parcelles (Figure 48).

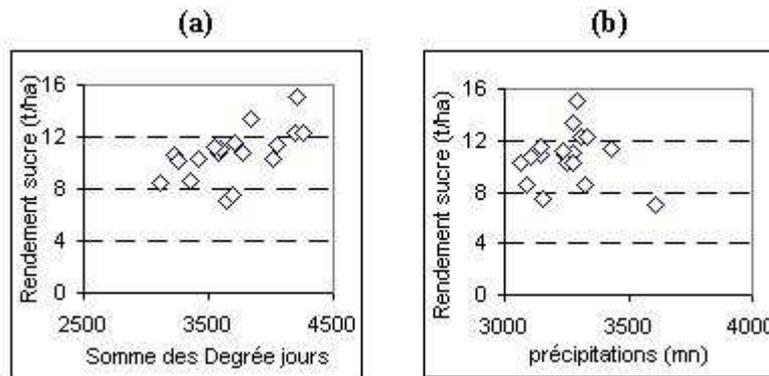


Figure 48. Relation entre le rendement sucre final et le cumul des degrés jours (a), les précipitations (b).

De manière similaire au rendement canne, le rendement sucre final semble avoir une relation principalement avec la somme des degrés jours. Rappelons que le rendement sucre est égal au produit du rendement canne multiplié par la richesse.

3.1.3 Analyse de l'évolution temporelle du signal radiométrique

Dans cette partie, nous allons étudier la réponse spectrale spécifique aux différents états de surface du couvert d'une parcelle de canne à sucre à savoir : le sol nu visible lors du labour pour une plantation, canne plantée avec un couvert fermé et le paillis observable après la récolte.

A La Réunion, les parcelles de canne ne sont pas brûlées lorsqu'elles sont coupées. Elles sont recouvertes de paillis et la disposition de ce paillis est alors perçue par les capteurs de télédétection. Si la parcelle est replantée, le travail du sol affecte la réponse spectrale de la parcelle.

On peut ainsi observer trois états de surface caractéristiques de la culture de la canne à La Réunion (sol nu, couvert fermé et paillis) qui induisent trois réponses spectrales différentes. Afin d'analyser ces réponses, nous avons utilisé les mesures faites par les capteurs dans cette étude : le Cimel, le CASI et SPOT. Le spectroradiomètre Cimel enregistre des longueurs d'ondes proches de celles enregistrées par SPOT excepté pour la bande XS4, moyen

infrarouge non disponible avec le Cimel. Le CASI quant à lui, apporte une information beaucoup plus fine quantitativement (nombre de longueurs d'onde) et de qualitativement (fenêtres spectrales plus fines).

3.1.3.1 Réponse spectrale en fonction de l'état du couvert

Nous présenterons les réponses spectrales spécifiques des trois états d'une parcelle de canne que l'on peut rencontrer simultanément à La Réunion (sol nu, couvert fermé et paillis). Le cycle de la canne démarre lors de la plantation ; notre premier état sera donc le sol nu, visible après le labour de la parcelle (Photographie 3).



**Photographie 3. Labour d'une parcelle de canne pour être replantée
(Source : JC Dagallier).**

Ensuite, une fois la canne plantée, on pourra observer le développement de la canne (Photographie 4) jusqu'à ce que le couvert soit fermé, vers 2000-2500 degrés jours (Photographie 5) correspondant à une période de quatre à six mois.



Photographie 4. Premier stade de développement de la canne après plantation (1 mois).



Photographie 5. Parcelle de canne avec un couvert quasiment fermé, 3 mois (a) et totalement fermé, 6 mois (b).

Le dernier état caractéristique se présente après la coupe de la canne. Que la coupe soit manuelle ou mécanique, la parcelle est recouverte de résidus de culture, le paillis (Photographie 6).



Photographie 6. Parcelle de canne après la coupe (mécanique) totalement recouverte de paillis.

Notre étude se fait en fonction du capteur utilisé pour mesurer le spectre de réflectance de chaque état.

Mesures Cimel : Durant la première expérimentation, nous avons couplé nos mesures de paramètres biophysiques descriptifs de l'état de la canne avec des mesures de réflectances à l'aide du Cimel (Figure 49). Ces mesures de réflectance ont été réalisées afin d'étudier les relations existant entre la réponse spectrale du couvert et les paramètres biologiques.

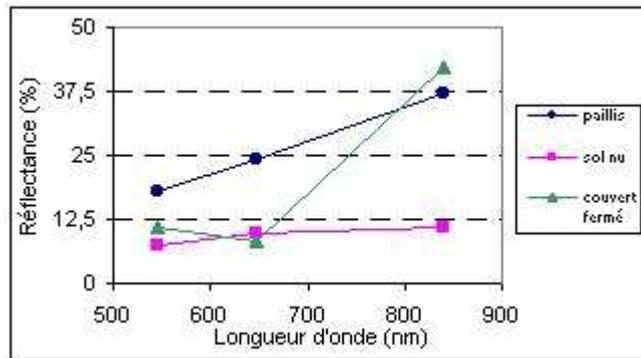


Figure 49. Spectres de réflectances caractéristiques des trois états de surface enregistrés à l'aide du Cimel CE 310.

La Figure 49 présente les spectres de réflectances des trois états d'une parcelle de canne enregistrés avec le Cimel. On constate que ces trois états ont des signatures spectrales différentes et caractéristiques. Ceci garantit une bonne discrimination spectrale des différents états sur une image multispectrale, même si elle n'est enregistrée que dans trois longueurs d'ondes.

Mesures CASI : La différence de signature spectrale entre ces trois états, remarquable sur trois bandes, est encore plus importante sur les 19 bandes enregistrées par le CASI (Figure 50).

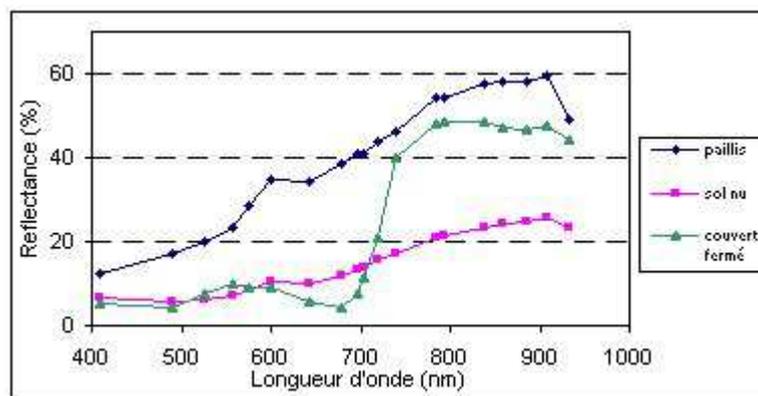


Figure 50. Signatures spectrales des trois états d'une parcelle de canne enregistrées à partir du CASI.

Comme pour les signatures spectrales enregistrées par le Cimel, les spectres de réflectances des trois états de surface enregistrés par le CASI (Figure 50) sont significativement différents entre eux. La discrimination des trois états est donc possible à partir d'une image CASI comme on peut le voir sur l'extrait de l'image CASI (Figure 51).

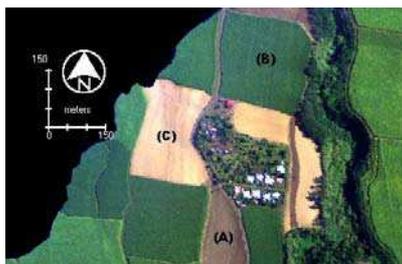


Figure 51. Extrait d'une image CASI en composition colorée vraies couleurs (7,4,1) présentant les trois états d'une parcelle de canne : sol nu (A), couvert de canne fermé (B) et paillis (C).

Mesures SPOT : Les images CASI ont été acquises entre le 21 et le 22 septembre 2002. Nous avons également une image SPOT 5 acquise à la même date (22 septembre 2002) ; nous allons donc pouvoir comparer la même zone sur les deux images (Figure 51 et Figure 52).

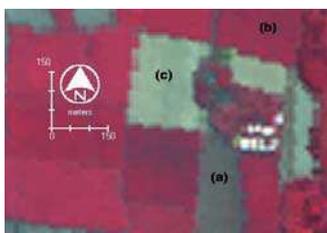


Figure 52. Extrait d'une image SPOT 5 en composition colorée fausses couleurs (xs3,xs2,xs1) présentant les trois états d'une parcelle de canne : sol nu (A), couvert de canne fermé (B) et paillis (C).

Comme sur l'image CASI, on constate que même visuellement (Figure 52) les trois états sont différenciables sur une image SPOT. On peut confirmer la différence de ces trois états par l'observation des signatures spectrales extraites de l'image SPOT (Figure 53).

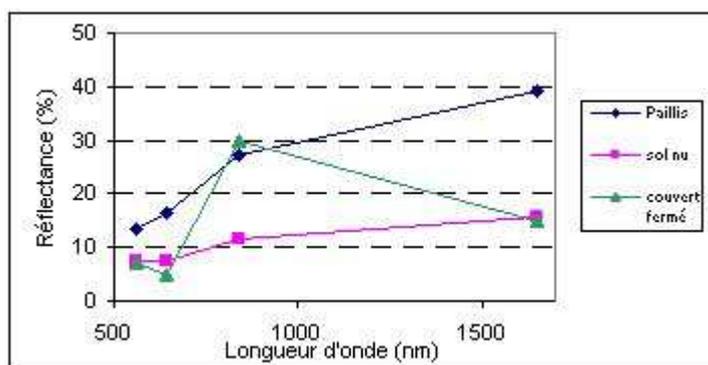


Figure 53. Signatures spectrales des trois états d'une parcelle de canne enregistrés à partir de SPOT 4&5.

L'analyse des spectres de réflectances confirme bien la possibilité de discriminer les trois états suivis à partir de la radiométrie enregistrée par les capteurs HRVIR, HRG de SPOT 4&5.

Globalement, les trois capteurs utilisés (Cimel, CASI et SPOT) nous apportent une information importante sur la discrimination des états de surface de la canne. La possibilité de distinguer ces trois états par leur réponse spectrale va nous permettre de suivre les changements entre ces états. On pourra déterminer le moment et le lieu de ces changements.

Cependant des états de surface intermédiaires à ceux précédemment cités existent. Ces transitions peuvent durer plusieurs mois, en relation avec les températures et les précipitations, durant lesquels le signal radiométrique de la parcelle va être mixte. La réflectance de la parcelle sera composée de celle d'un paillis et d'un couvert fermé ou d'un paillis et de sol nu.

Notre analyse va maintenant porter sur l'évolution des réponses spectrales au cours du cycle annuel de la canne. En effet, il est nécessaire pour la suite de notre étude de savoir comment elle évolue en fonction des changements d'état de la canne correspondant au développement progressif du couvert végétal jusqu'à sa fermeture.

Nous allons, dans un premier temps, reconstituer l'évolution temporelle des réflectances enregistrées par le Cimel en fonction du stade de développement du couvert. Nous verrons également l'évolution de certains indices de végétation générés à partir des mesures de réflectances.

Dans un deuxième temps, nous utiliserons les images SPOT 4&5 de la série temporelle pour suivre l'évolution de la radiométrie au cours du cycle de la canne.

3.1.3.2 Le radiomètre CIMEL

Nous présentons ici les résultats obtenus pour les deux variétés R570 et R579 dans la zone nord-est, sur les exploitations de M. Caruel et M. Barau lors de la première expérimentation. Les données mesurées par le Cimel nous permettent de reconstituer le cycle cultural.

- **Evolution temporelle des réflectances au cours du cycle**

Les figures (Figure 54, Figure 55 et Figure 56) représentent l'évolution de la réflectance du couvert dans les bandes spectrales du vert, du rouge et du proche infrarouge (pIR). L'évolution des réflectances est observée en fonction de la somme des degrés jours accumulés par la plante depuis sa plantation ou sa coupe précédente.

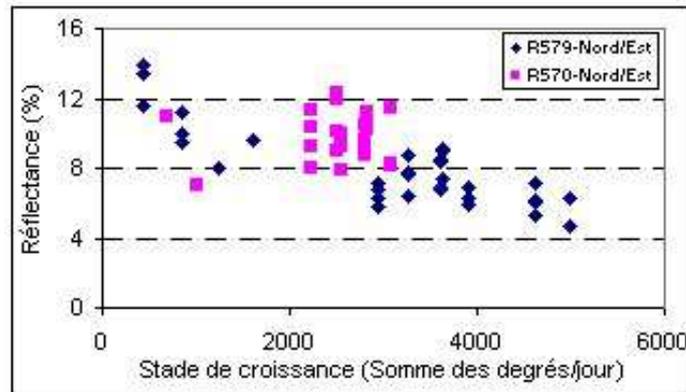


Figure 54. Evolution de la réflectance d'une parcelle de canne dans le vert enregistrée par le Cimel.

L'évolution de la réflectance dans le vert (Figure 54) décroît au cours du cycle. On peut décrire deux phases : de 0 à 1500 degrés jours (0 à 3 mois), caractérisée par une diminution plus rapide de la réflectance dans le vert que pour la deuxième phase, de 1500 jusqu'à la fin du cycle.

La première phase correspond à l'implantation du couvert végétal après la coupe. Les premières valeurs de réflectance sont aux alentours de 15%, et correspondent à la réflectance du paillis. Ensuite le paillis se dégrade, se minéralise et le taux de couverture augmente jusqu'à ce que le couvert soit fermé, caractérisant la fin de la première phase (1500-2000 degrés jours, 4 à 6 mois). Cette diminution de réflectance correspond au changement d'état de surface de paillis à couvert fermé.

Lors de la deuxième phase, la diminution de réflectance dans le vert s'explique par le changement de couleur des feuilles du couvert dû à la maturation et à la sénescence des feuilles.

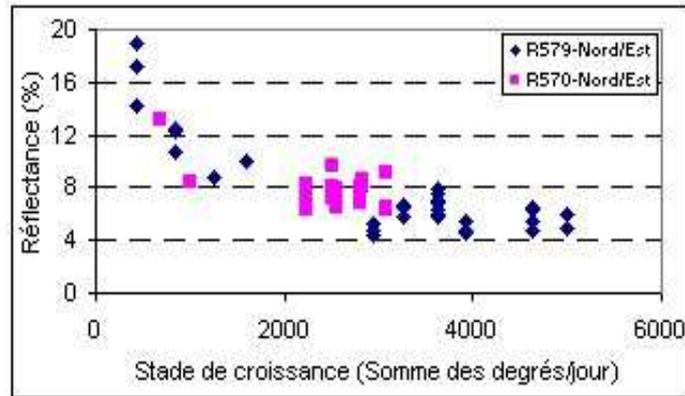


Figure 55. Evolution de la réflectance d'une parcelle de canne dans le rouge enregistrée par le Cimel.

L'évolution de la réflectance dans le rouge (Figure 55) décroît nettement au cours du cycle. Elle chute brutalement pendant les premiers stades du développement du couvert (jusqu'à 2000 degrés jours ; 4 mois), puis se stabilise autour d'une valeur de 6 %. Cette forte diminution de la réflectance dans le rouge peut s'expliquer de la même manière que pour la réflectance dans le vert, par le passage de l'état de paillis (20% de réflectance dans le rouge) à l'état de couvert fermé (6% de réflectance dans le rouge). Cette évolution est caractéristique de l'installation d'un couvert végétal puisque celui-ci absorbe le rayonnement dans le rouge et que la surface foliaire augmente pour ensuite se stabiliser autour de 2000 – 2500 degrés jour.

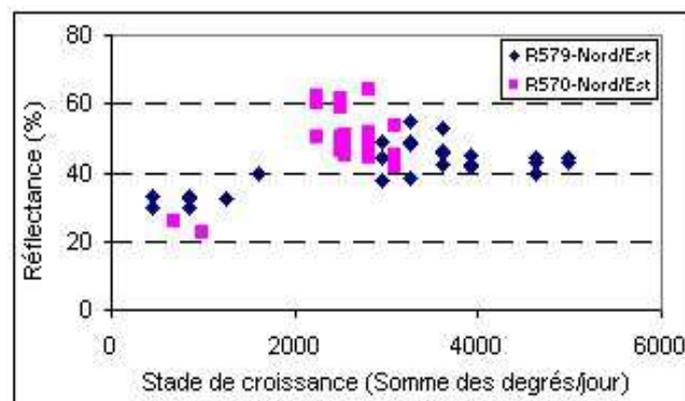


Figure 56. Evolution de la réflectance d'un couvert fermé dans le pIR enregistrée par le Cimel.

Enfin, l'évolution de la réflectance dans le proche infrarouge (Figure 56) augmente au fur et à mesure que le couvert s'installe puis se stabilise autour de 45 %. Cette évolution est inverse à celle observée dans le rouge puisque la végétation réfléchit plus le rayonnement dans le pIR que le paillis.

Les réflectances dans le rouge et le proche infrarouge se stabilisent au-delà de 2000–2500 degrés jours comme le LAI (Figure 34).

- **Observation de l'évolution des indices de végétation au cours du cycle**

Les indices de végétation, notamment les ratios, sont sensibles au changement d'état du couvert (voir annexe 5). Le calcul de ces indices à partir des réflectances mesurées le long du cycle annuel nous permet d'observer leur évolution.

C'est ainsi que pour étudier l'évolution temporelle des différents indices de végétation générés à partir des réflectances mesurées avec le Cimel, nous utilisons les données des exploitations du nord-est, pour les deux variétés confondues. Les valeurs de réflectance sont moyennées à l'échelle de la parcelle avant de calculer l'indice de végétation.

L'indice RVI :
$$\frac{\text{Réflectance_pIR}}{\text{Réflectance_Rouge}}$$

L'évolution du RVI calculé à partir des réflectances dans le rouge et le proche infrarouge est représentée en Figure 57a.

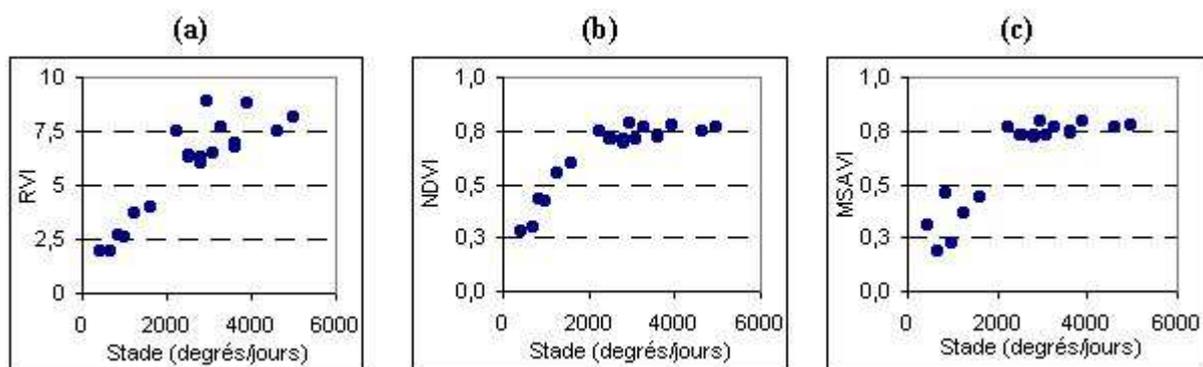


Figure 57. Evolution des indices de végétation calculés à partir des réflectances mesurées au Cimel au cours du cycle de la canne.

Au début du cycle de croissance, le RVI évolue de manière linéaire et croissante. La distribution des points est plus aléatoire lorsque le RVI atteint la valeur 6. Au même titre que le LAI, le RVI semble saturer à partir de 2000-2500 degrés/jour. Il semble être sensible à la surface foliaire pendant la première phase de développement, jusqu'à 2500 degrés/jour. Après

ce stade, alors que le LAI atteint une valeur plafond, les valeurs de RVI sont très dispersées et ne sont pas représentatives des valeurs de LAI.

$$\underline{\text{L'indice NDVI}} : \frac{(\text{Réflectance_pIR} - \text{Réflectance_Rouge})}{(\text{Réflectance_pIR} + \text{Réflectance_Rouge})}$$

L'évolution des valeurs du NDVI (Tucker, 1979) présente deux phases bien distinctes. L'évolution du NDVI semble reproduire l'évolution structurelle du couvert végétal de la canne à sucre (Figure 57b). Au début, le couvert végétal s'installe, le LAI progresse et le NDVI traduit cette tendance.

Cependant, une fois la progression de la couverture foliaire arrivée à terme, le NDVI sature autour d'une valeur légèrement inférieure à 0,8. Cette saturation intervient approximativement au même stade de stabilisation que le LAI. On peut en conclure que le NDVI est sensible à la surface foliaire de la canne à sucre.

$$\underline{\text{L'indice MSAVI}} : \frac{(\text{Réflectance_pIR} - \text{Réflectance_Rouge})}{[(\text{Réflectance_pIR} + \text{Réflectance_Rouge}) + L]} \times (1 + L)$$

avec $L = 1 - 2 \alpha \text{NDVI} \cdot \text{WDVI}$;

où α est la pente de la droite du sol « *soil line* », établie sur le terrain et

$\text{WDVI} = \text{Réflectance pIR} - \alpha \cdot \text{Réflectance Rouge}$.

L'indice WDVI (Weighted Difference Vegetation Index) a été développé lors de recherches antérieures par Richardson et Wiegand (1977).

L'expression de l'indice MSAVI (Qi *et al.*, 1994) fait intervenir un facteur L lié aux conditions locales et qui permet de minimiser la contribution spectrale du sol. Cette contribution est importante lors de la phase d'implantation de la culture, après une plantation. Mais après la coupe, le sol n'est pas visible car il est recouvert de paillis. Nous allons donc calculer le facteur L pour minimiser la contribution spectrale du paillis.

Les points d'une droite de sol correspondent à des mesures de réflectance dans le rouge et le pIR. Nous avons fait de même pour le paillis avec des mesures radiométriques dans le rouge et le proche infrarouge enregistrées par le Cimel (Figure 58).

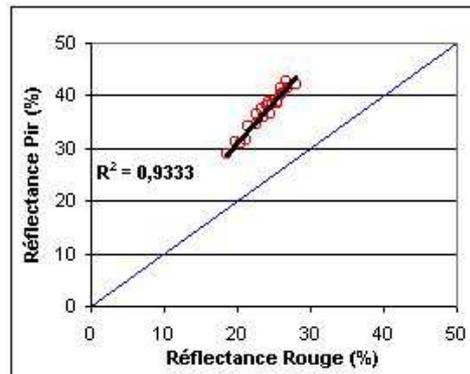


Figure 58. Représentation de la droite du paillis en fonction de la réflectance dans le rouge et le proche infrarouge mesurée avec le Cimel.

La pente obtenue est égale à 1,5489. Cette valeur est utilisée pour calculer les valeurs de MSAVI.

Tout comme le RVI et le NDVI, le MSAVI semble être sensible au développement de la surface foliaire du couvert végétal (Figure 57c). Nous utiliserons ces trois indices pour établir les relations qui existent entre les paramètres descriptifs de l'état du couvert et les indices de végétations (calculés à partir des réflectances mesurées avec le Cimel).

3.1.3.3 Les capteurs HRV et HRG de SPOT4&5

Les résultats présentés ici ont été obtenus à partir des valeurs de réflectance corrigées des effets dus aux capteurs HRV et HRG (cf. inter-étalonnage 2.1.11.2).

- **Evolution temporelle des réflectances SPOT 4&5 et du NDVI au cours du cycle**

Afin de suivre l'évolution temporelle des réflectances et de l'indice de végétation NDVI en fonction du nombre de jour après la coupe, nous avons extrait les réflectances dans le vert, le rouge, le proche infrarouge et le moyen infrarouge de quatorze images SPOT 4&5 de la série de 2002-2003. Pour cette analyse, nous avons sélectionné les parcelles en repousse des

exploitations Barau et Caruel, cycle cultural 2002-2003. Les parcelles sont suivies dès la fin de la coupe 2002 jusqu'à 45 jours avant la coupe 2003. Chaque point représente la réflectance d'une parcelle à une date précise. La liste des 59 parcelles utilisées est disponible en annexe 14. Nous allons détailler les signatures spectrales enregistrées dans chacune des bandes afin d'observer leur évolution. Nous verrons dans un deuxième temps l'évolution de l'indice de végétation NDVI calculé à partir des bandes SPOT 4&5.

La Figure 59 présente l'évolution des réflectances dans le vert mesurées par SPOT 4&5 au cours du cycle de 59 parcelles, variétés R570 et R579. L'évolution de la réflectance est analysée en fonction du nombre de jours après la coupe 2002.

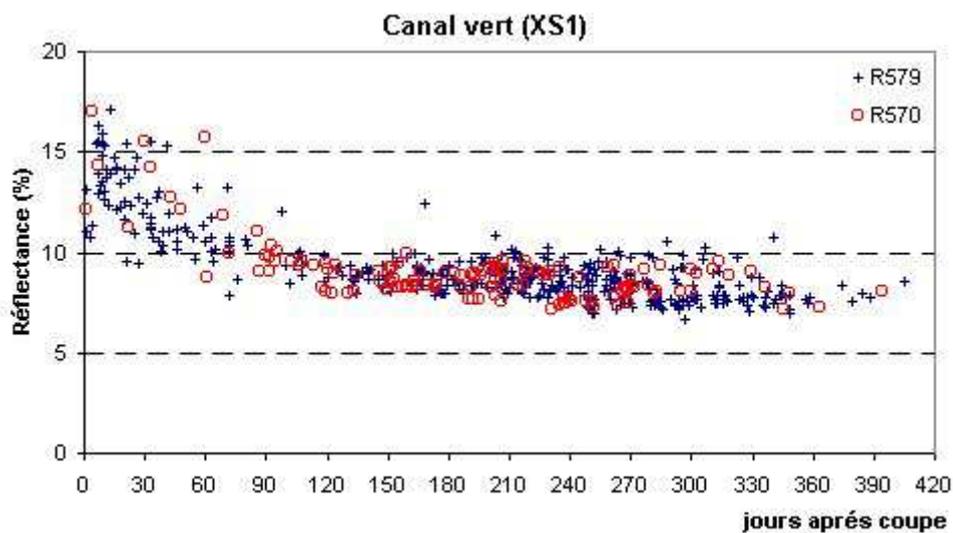


Figure 59. Evolution de la réflectance dans le vert (XS1) enregistrée par SPOT 4&5 de 59 parcelles de canne en repousse, variétés R570 et R579, cycle cultural 2002-2003.

La tendance générale présente une diminution de la réflectance dans le vert au cours du cycle de la canne. La réflectance dans le vert (XS1) a une valeur de 15 % en début de cycle et décroît progressivement jusqu'à quatre mois après la coupe pour se stabiliser, autour d'une valeur de 9%.

La Figure 60 présentant l'évolution des réflectances enregistrées dans le rouge (XS2) par SPOT 4&5 au cours du cycle des 59 parcelles.

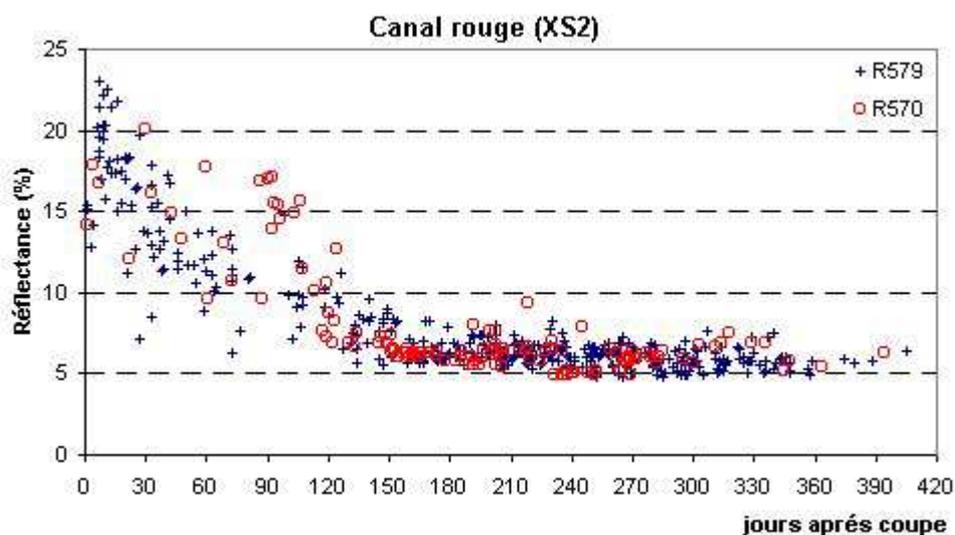


Figure 60. Evolution de la réflectance dans le rouge (XS2) enregistrée par SPOT 4&5 de 59 parcelles de canne en repousse, variétés R570 et R579, cycle cultural 2002-2003.

Après la coupe, la réflectance dans le rouge (XS2) diminue tout au long du cycle. Elle est égale à 20% en début de cycle. Une diminution progressive jusqu'à quatre mois après la coupe est observable. Les valeurs de réflectance mesurées se stabilisent ensuite autour d'une valeur de 6%.

On remarque une similitude entre l'évolution des réflectances dans le rouge et dans le vert, longueur d'ondes correspondant à la partie visible du spectre solaire (Figure 59 et Figure 60). En effet, les réflectances diminuent au cours du cycle. Cependant, une différence est à noter concernant la valeur où se stabilise la réflectance. Pour le vert, elle se stabilise autour d'une valeur égale à 9% contre 6% dans le rouge. Une fois le couvert végétal installé, il absorbe plus de rayonnement solaire incident dans le rouge que dans le vert, ce qui est caractéristique d'une activité photosynthétique attribuée d'après Jensen (2000) aux pics d'absorption des chlorophylles a et b.

Nous continuons avec la Figure 61 montrant l'évolution des réflectances dans le proche infrarouge (XS3) mesurées par SPOT 4&5 pour les 59 parcelles.

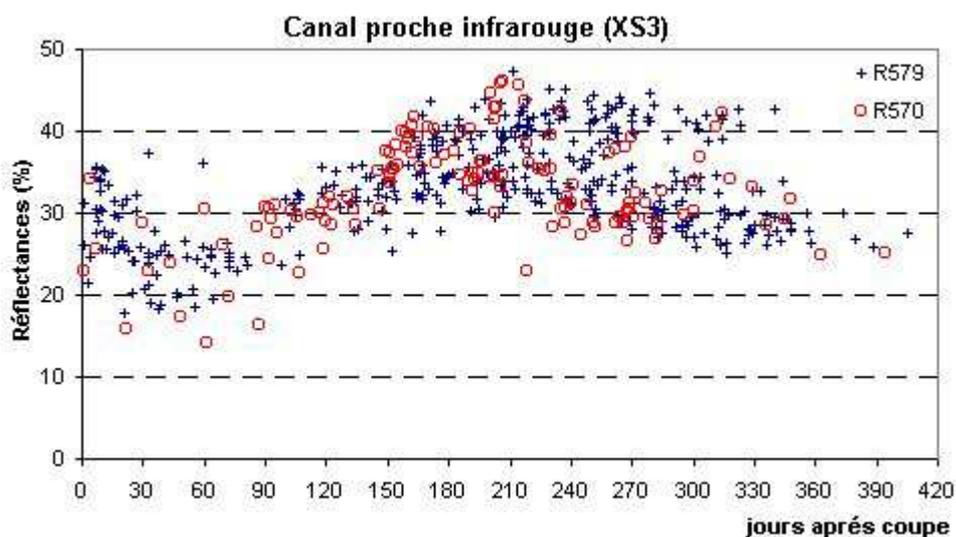


Figure 61. Evolution de la réflectance dans le proche infrarouge (XS3) enregistrée par SPOT 4&5 de 59 parcelles de canne en repousse, variétés R570 et R579, cycle culturel 2002-2003.

On distingue trois phases dans l'évolution des réflectances du proche infrarouge (XS3) au cours du cycle de la canne. De la coupe à 60 jours après la coupe, les réflectances dans le proche infrarouge diminuent passant d'une valeur de 35% à 20%. On remarque que ce phénomène de forte réflectance en début de cycle est toujours dû à la présence de paillis après la coupe. La diminution de la réflectance dans le proche infrarouge est, quant à elle, une conséquence de la dégradation progressive du paillis qui se minéralise. De 60 à 200 jours après la coupe, la réflectance dans le proche infrarouge augmente de manière constante (de 20% à 40%) traduisant la mise en place de la culture par le développement foliaire. Après 200 jours, la réflectance dans le proche infrarouge diminue, conséquence de la maturité de la canne. En effet, lors de cette phase de maturation, le couvert végétal sèche et la surface foliaire peut diminuer.

Pour finir, l'évolution de la réflectance dans le moyen infrarouge (XS4) enregistrée par SPOT 4&5 au cours du cycle des 59 parcelles de canne est présentée en Figure 62.

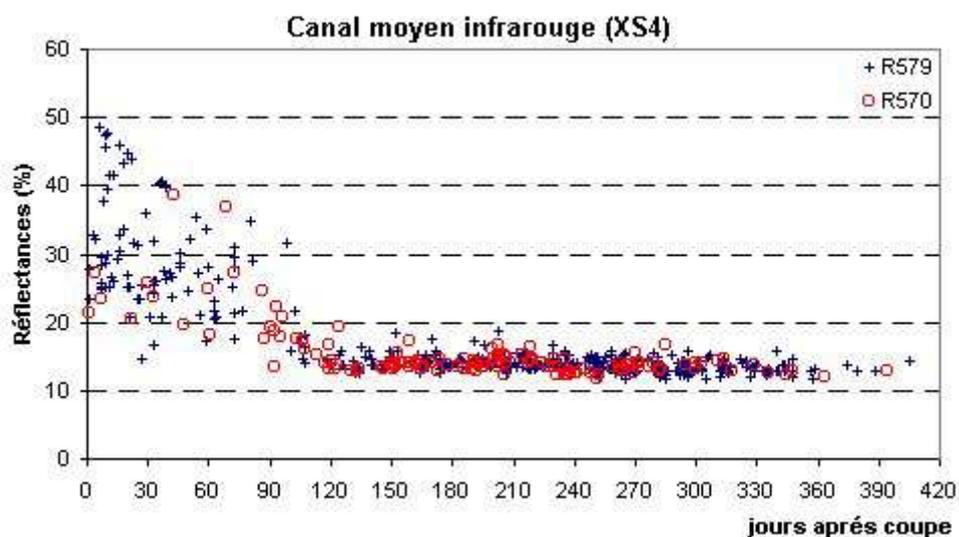


Figure 62. Evolution de la réflectance dans le moyen infrarouge (XS4) enregistrée par SPOT 4&5 de 59 parcelles de canne en repousse, variétés R570 et R579, cycle cultural 2002-2003.

Globalement, la réflectance dans le moyen infrarouge (XS4) diminue de la coupe (35%) jusqu'à 120 jours après la coupe (15%), correspondant aux quatre premiers mois du cycle, phase d'installation du couvert. Ensuite, la réflectance dans le moyen infrarouge est stable autour d'une valeur égale à 15% jusqu'à la fin du cycle.

On constate que pour les quatre réflectances (dans le vert, le rouge, le proche infrarouge et le moyen infrarouge) les évolutions au cours du développement de la canne entre les deux variétés suivies, la R570 et R579 sont comparables.

Comme nous l'avons vu, l'évolution de la réflectance est en relation avec le changement d'état des parcelles, de la signature spectrale d'un paillis après la récolte à celle d'un couvert fermé quatre mois plus tard. On retrouve cette dynamique sur la totalité du spectre mesuré pour chacun des deux états (paillis et couvert fermé) présentés à la Figure 63.

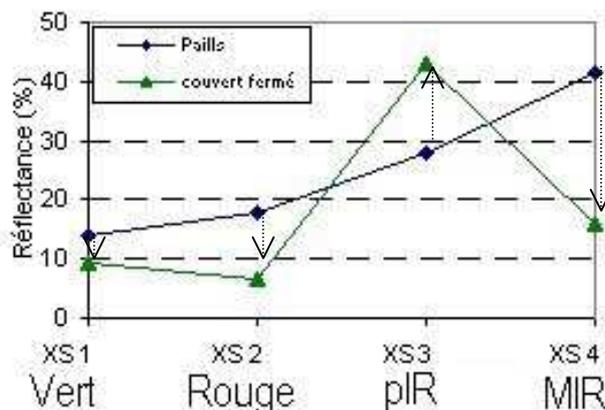


Figure 63. Signatures spectrales enregistrées par SPOT 4&5 du paillis et d'un couvert fermé d'une parcelle de canne à sucre.

Dans la suite de notre analyse de la radiométrie d'une parcelle de canne, nous passons maintenant à l'étude de l'évolution de l'indice de végétation NDVI calculé à partir des réflectances SPOT 4&5. Les deux variétés seront confondues. On rappelle que l'indice de végétation NDVI peut être calculé à partir des réflectances enregistrées par SPOT 4&5 suivant la formule :

$$NDVI = \frac{(XS3 - XS2)}{(XS3 + XS2)}$$

La Figure 64 représente l'évolution du NDVI pour les 59 parcelles en fonction du nombre de jours après la coupe, variétés confondues.

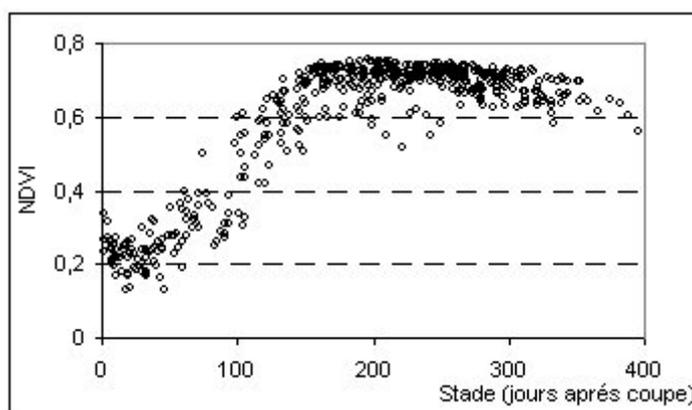


Figure 64. Evolution du NDVI calculé à partir des réflectances SPOT 4&5 pour 59 parcelles en fonction du nombre de jours après la coupe, variétés R570 et R579 confondues, cycle cultural 2002-2003.

Cette évolution de NDVI sont caractéristiques du développement d'un couvert végétal, de la phase de croissance à la stabilisation (Figure 64) autour d'une valeur de NDVI SPOT égale à 0,75.

On peut également représenter l'évolution du NDVI en fonction des dates d'images et non plus en fonction du nombre de jours après la coupe. Etant donné qu'à La Réunion, la coupe de la canne est étalée sur six mois, il est intéressant de suivre l'évolution des indices de végétation avec une échelle en fonction de la date d'acquisition de l'image SPOT 4&5 au lieu du nombre de jours après la coupe. Nous proposons maintenant d'observer l'évolution du NDVI des 59 parcelles en fonction de la date des images à laquelle les réflectances ont été mesurées (Figure 65). La Réunion est soumise à un climat tropical, avec une saison chaude et humide entre les mois de novembre et mars. Durant cette période, les acquisitions d'images SPOT 4&5 sur La Réunion sont par conséquent quasiment inexistantes.

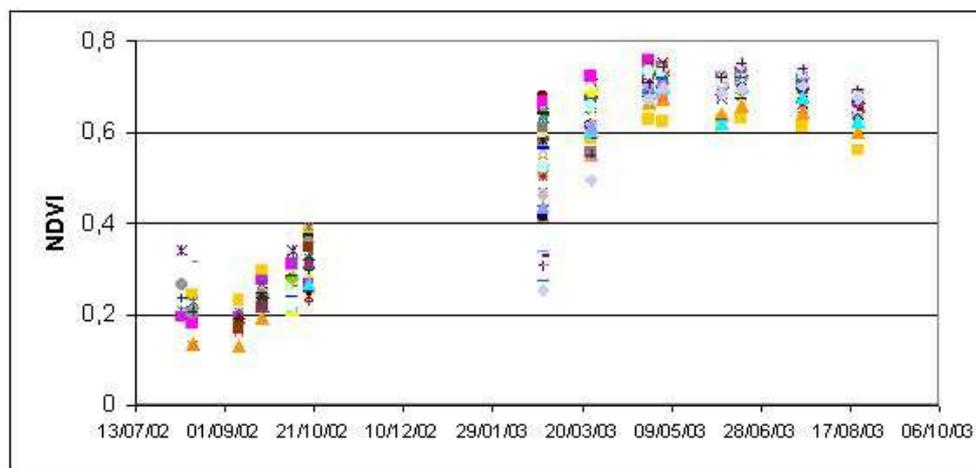


Figure 65. Evolution du NDVI de 59 parcelles au cours du cycle cultural 2002-2003, variétés R570 et R579 confondues.

On observe une augmentation du NDVI, correspondant à la phase de croissance et au développement de la surface foliaire et une diminution du NDVI, correspondant à la phase de sénescence du couvert lors de la maturation (Figure 65). Cette représentation par date d'acquisition d'image nous apporte une information intéressante malgré le manque de données (Figure 65). En effet, les 59 parcelles que nous avons représentées ont des dates de coupe 2002 différentes (Annexe 14). On constate que, malgré cela, les profils NDVI sont comparables avec un maximum atteint quasiment au même moment. Cela signifie que des parcelles de canne auront le même développement qu'elles soient coupées en début ou en fin de campagne. Ceci peut être expliqué par les facteurs d'élaboration du rendement. En effet, en début de campagne, les températures sont relativement basses, aux alentours de 20°C, alors qu'en fin de campagne, elles sont plus élevées, aux environs de 30°C. Cette disparité thermique va permettre une « égalisation » des cycles. Les parcelles coupées en début de campagne vont avoir des conditions de reprise plus difficiles que celles coupées en fin de

campagne. Un autre facteur expliquant ce phénomène est l'état des réserves hydriques du sol. Il influe dans le même sens que les températures, c'est à dire que le climat plus sec en début qu'en fin de campagne accentue les difficultés pour la reprise du développement de la canne. Malgré l'étalement de la coupe, les cycles de développement de la canne se normalisent et les écarts se combrent pour atteindre leur maximum de développement, en terme d'indice de végétation, quasiment en même temps. Ce maximum est atteint au mois de mai, quelques semaines avant le début de la campagne de coupe.

Lors de notre analyse de l'évolution radiométrique d'une parcelle de canne, nous avons choisi des parcelles de canne toutes au même stade cultural soit en repousse, de manière à observer une évolution des réflectances comparable. Nous venons de suivre l'évolution du NDVI pour les parcelles de canne en repousses. En conséquence, le suivi de l'évolution du NDVI peut permettre de différencier les plantations des repousses car l'évolution de la réponse spectrale d'une plantation est différentes de celle d'une repousse. En effet, pour une plantation, le premier état de surface qui sera visible sera le sol nu alors que dans le cas d'une repousse c'est du paillis. Pour cela, il est nécessaire de suivre l'évolution du NDVI sur l'intégralité du cycle de croissance comme l'illustre la Figure 66.

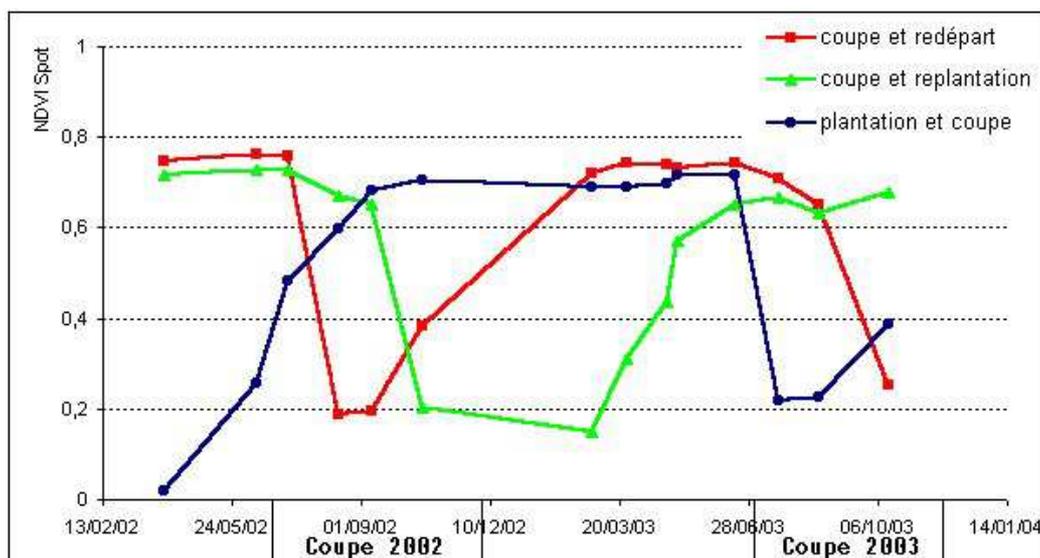


Figure 66. Evolution temporelle de la valeur du NDVI SPOT 4&5 parcellaire pour une plantation, une coupe suivie de la repousse et d'une coupe suivie d'une plantation, La Réunion 2002-2003.

On remarque que ces trois parcelles de canne ont des profils NDVI différents et caractéristiques. L'aspect multi-temporel des séries d'images SPOT 4&5 apporte une information supplémentaire en plus de la réponse spectrale d'une parcelle. Le suivi multi-

temporel de la valeur d'indice de végétation parcellaire permet alors la différenciation entre une parcelle de canne en repousse après la coupe et une parcelle replantée (Figure 66). Un suivi multi-temporel à partir d'images SPOT 4&5 permettrait ainsi chaque année d'identifier les parcelles qui sont coupées et replantées.

L'utilisation du multi-temporel est particulièrement intéressante pour suivre l'évolution de la sole cannière réunionnaise en raison de la superposition des cycles de croissance différents, induite par les pratiques culturales.

Téledétection et paramètres biochimiques

Nous nous intéresserons aux relations entre les réflectances d'un couvert et les paramètres biochimiques descriptifs de son état.

3.1.4 Analyse des relations entre réflectances Cimel et paramètres biochimiques

L'analyse des relations entre les réflectances enregistrées par le Cimel et les paramètres biochimiques nous a amené à établir deux fonctions de transfert.

3.1.4.1 *Fonctions de transfert pour le LAI*

L'évolution du LAI est liée aux réflectances dans le rouge et le pIR (cf. Figure 67).

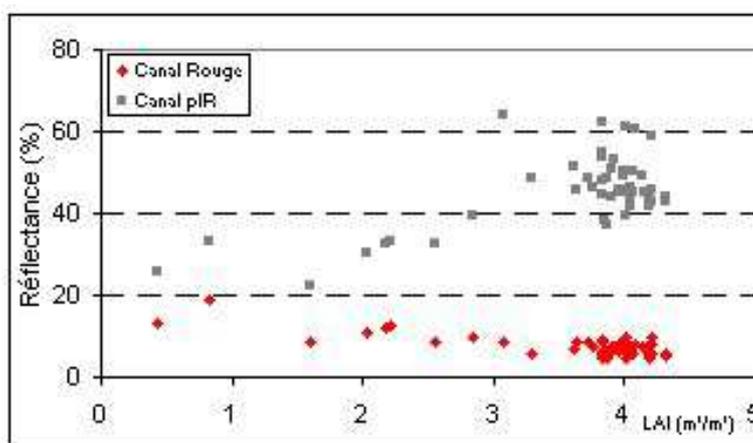


Figure 67. Evolution de la réflectance dans le rouge et proche infrarouge enregistrée par le Cimel en fonction de la surface foliaire (LAI).

On remarque que les mesures de réflectance saturent plus vite dans le rouge que dans le pIR et qu'une légère diminution de la réflectance dans le pIR est perceptible lorsque le LAI se stabilise en fin de cycle.

Etant donné la bonne corrélation entre le LAI et les indices de végétation pendant la phase de croissance de la canne, nous avons cherché à établir des fonctions de transfert entre les indices de végétation et le LAI pour cette période. L'objectif des fonctions de transfert, établies à l'aide des réflectances Cimel, est d'identifier les indices ou les bandes spectrales sensibles aux paramètres à estimer, à partir des réflectances satellitaires. Nous effectuerons des régressions

linéaires en tenant compte des mesures inférieures à 2500 degrés/jour durant la période d'installation du couvert, avant saturation du signal (Figure 68).

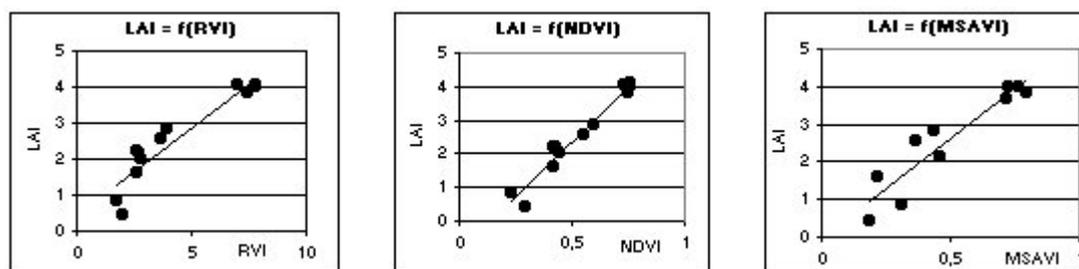


Figure 68. Relation entre le LAI et les trois indices de végétation calculés à partir des réflectances Cimel pour les stades de croissance < 2500 degrés/jour.

La qualité de la régression linéaire peut être évaluée par la valeur du coefficient de détermination (R^2) et le calcul de la RMSE.

Tableau 16. Résultats des relations obtenues entre les indices de végétation calculés à partir du Cimel et la surface foliaire de la canne.

	Equation	R^2	RMSE (m^2/m^2)	Erreur (%)	n
RVI	$LAI=0,4841 * RVI + 0,4439$	0,87	0,42	11	10
NDVI	$LAI=6,5852 * NDVI + 0,9478$	0,95	0,25	7	10
MSAVI	$LAI=5,4335 * MSAVI - 0,0818$	0,90	0,37	10	10

Au vu des résultats (Tableau 16), l'indice de végétation NDVI semble être le plus adapté pour l'estimation de la surface foliaire à partir des données radiométriques Cimel. Les autres indices donnent des bons résultats également, confirmant la sensibilité des bandes spectrales enregistrées par le Cimel à l'évolution de la structure du couvert.

Toutes ces fonctions de transfert, basées sur des indices de végétation, sont établies directement à partir des données radiométriques mesurées sur le terrain lors du suivi temporel de l'implantation du couvert. Bien que les coefficients de régression soient significatifs, il faut noter que les fonctions de transfert obtenues sont issues de régressions linéaires réalisées sur un nombre de points limités et en faisant abstraction du facteur variétal. Dans l'optique d'une étude des tendances existant entre les paramètres biophysiques suivis et réflectances mesurées, ces résultats sont exploitables. Nous utiliserons le NDVI pour estimer la surface foliaire de la canne à sucre à partir des réflectances enregistrées par SPOT 4&5.

3.1.4.2 Fonction de transfert pour le SPAD

Rappelons que la mesure de SPAD (couleur des feuilles de la canne) renseigne, en fin de cycle, sur le degré de maturité de la culture. Son étude n'est donc intéressante qu'une fois le couvert végétal totalement installé, soit après de 2500 degrés jours ; en limitant ainsi les contributions spectrales du paillis ou du sol. A partir de nos mesures et pour des stades de croissance supérieurs à 2500 degrés jours, on remarque effectivement une évolution des réflectances des canaux vert et rouge enregistrées avec le Ciel en fonction des valeurs de SPAD mesurées in situ.

La Figure 69 nous montre que plus la valeur de SPAD est faible plus les réflectances dans le vert et le rouge sont élevées.

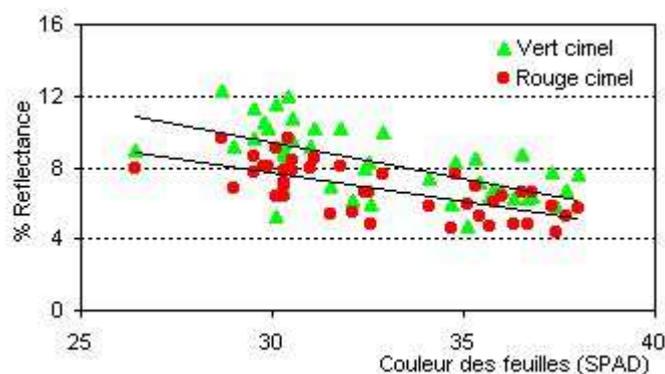


Figure 69. Evolution de la réflectance enregistrée avec le Ciel dans le vert et le rouge en fonction des valeurs de SPAD, pour les stades de croissance supérieurs à 2500 degrés jours.

Les régressions linéaires qui lient les valeurs de SPAD aux réflectances du vert et du rouge présentent respectivement les coefficients de détermination (R^2) égaux à 0,40 et 0,48 pour 42 observations. Ces derniers sont significatifs avec un niveau de probabilité supérieur à 0,001 pour les deux relations linéaires.

Nous cherchons à présent à établir une relation entre les valeurs de SPAD et les réflectances mesurées dans le but de détecter un changement du comportement spectral de la canne à sucre à l'approche de la maturité. Parmi toutes les relations étudiées entre les valeurs de SPAD et les combinaisons de réflectances (indices, combinaisons multilinéaires et/ou polynomiales), le NDVI se présente comme étant le plus lié à l'évolution du taux d'azote. En exprimant les

valeurs de SPAD en fonction du NDVI, nous obtenons la distribution présentée à la Figure 70.

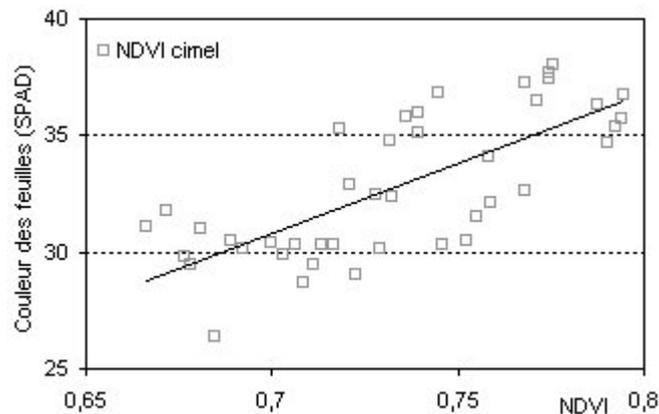


Figure 70. Relation entre les valeurs de SPAD et le NDVI calculé à partir des réflectances enregistrées avec le Cimel, pour les stades de croissance supérieurs à 2500 degrés jours.

L'expression de la relation linéaire s'écrit :

$$\text{SPAD} = 60,104 \times \text{NDVI}_{\text{Cimel}} - 11,291$$

avec $R^2 = 0,5396$, $\text{RMSE} = 2,1$ et $n = 42$

Compte tenu des variations des valeurs des valeurs de SPAD (de 26,4 à 38), la RMSE nous montre que l'erreur relative admise par cette fonction est de plus ou moins 18 %. Il est à noter que l'indice pigmentaire Vert/Rouge n'apporte pas de résultats intéressants.

Les résultats semblent limités par la résolution spectrale du Cimel CE-310. En effet, ce radiomètre de terrain possède seulement 3 bandes spectrales qui sont relativement larges (supérieur à 65 nm).

3.1.5 Analyse multitemporelle

Notre analyse des relations entre radiométrie Cimel et paramètres biologiques nous a montré que les réflectances dans le rouge et le proche infrarouge étaient sensibles aux changements d'états du couvert concernant la surface foliaire et le taux d'azote dans les feuilles.

L'utilisation des mesures terrain des trois expérimentations nous a permis d'avoir 65 observations de LAI et de taux d'azote, à l'échelle parcellaire. La programmation intensive et

systématique d'image SPOT 4&5 sur La Réunion dans le cadre du projet [ISLE Reunion](#) nous a permis de constituer une série temporelle d'images pour comparer les mesures terrain de surfaces foliaires aux réflectances enregistrées par SPOT 4&5. Douze images SPOT 4&5 ont été utilisées pour comparer la réponse radiométrique des parcelles de canne aux surfaces foliaires et aux taux d'azote mesurés. Les réflectances ont été inter-étalonnées pour pouvoir être comparées car elles sont enregistrées par différents satellites (SPOT 4&5). L'analyse de l'évolution des réflectances SPOT en fonction du LAI et des valeurs de SPAD a nécessité l'interpolation de certaines valeurs de réflectances. Les mesures de réflectances correspondantes aux dates de mesure se situant entre deux dates d'images (40 jours maximum) ont été interpolées en considérant une évolution linéaire entre ces deux dates. Les différentes images utilisées ainsi que le détail des réflectances interpolées sont disponibles en annexe 17.

3.1.5.1 Estimation de la surface foliaire

On remarque que les mesures sont assez bien réparties sur la gamme des valeurs que l'on cherche à estimer (LAI de 0 à 8). La réflectance dans le proche infrarouge est la plus sensible à l'augmentation du LAI (Figure 71).

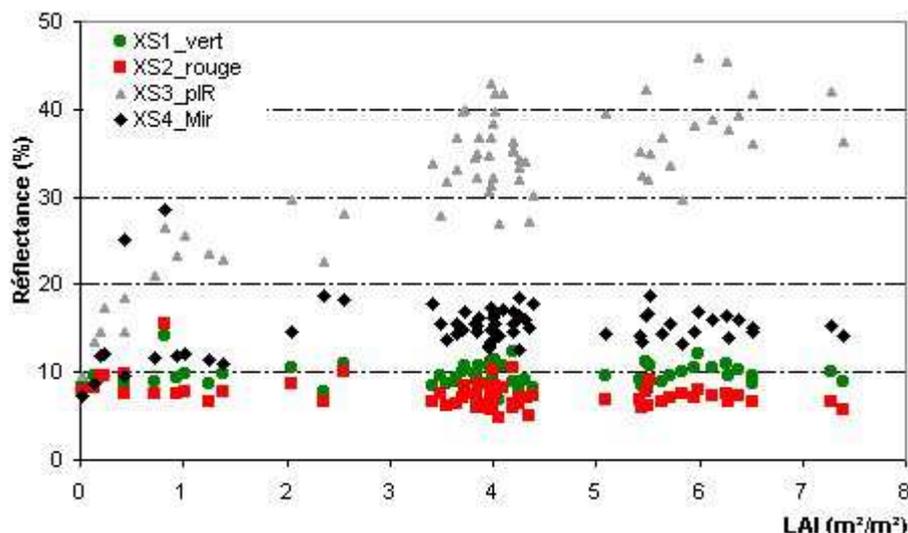


Figure 71. Relation entre la surface foliaire de la canne et les réflectances SPOT 4&5 (65 points).

L'évolution du NDVI en fonction du LAI traduit une tendance exponentielle (Figure 72). On remarque que le résultat permet l'estimation du LAI par le NDVI calculé à partir des

réflectances SPOT4&5 avec un coefficient de détermination (R^2) égal à 0,86 et une erreur (RMSE) égale à 1,16. L'erreur relative sur l'estimation du LAI est de 15,8%.

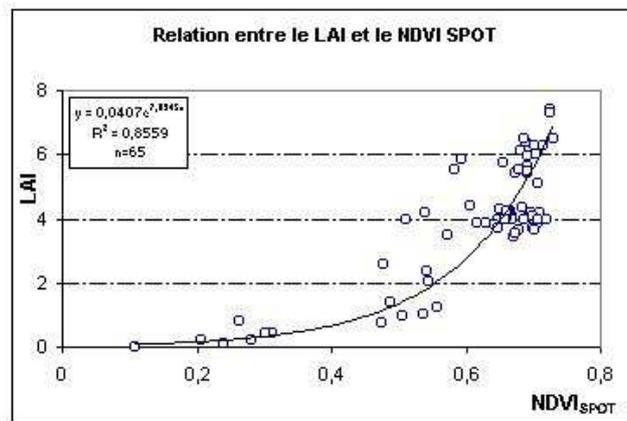


Figure 72. Relation entre le NDVI calculé à partir des réflectances SPOT et la surface foliaire d'un couvert de canne mesurée au champ (65 points).

La relation s'exprime suivant la formule :

$$\text{LAI} = 0,0407 \times \text{EXP}(7,0345 \times \text{NDVI}_{\text{Spot}})$$

Équation 1

Elle sera utilisée pour obtenir des cartes thématiques de valeurs de LAI générées à partir d'images SPOT 4&5.

3.1.5.2 Suivi de la biomasse fraîche

L'évolution du NDVI parcellaire peut être utilisé pour extraire des indicateurs. Deux fonctions logistiques représentant respectivement les phases de croissance et de sénescence peuvent être utilisées pour ajuster les évolutions du NDVI (Clevers *et al.*, 2002).

$$\text{NDVI}(t) = M * (\text{CROIS}(t) - \text{SEN}(t))$$

Équation 2

avec : $\text{CROIS}(t) = 1 / (1 + \exp(-a * (t - t_i)))$ et $\text{SEN}(t) = 1 / (1 + \exp(-b * (t - t_s)))$

où t est le temps en jours depuis la coupe précédente et M , a , b , t_i et t_s les paramètres représentant respectivement le maximum de la logistique, les pentes aux points d'inflexion de CROIS et de SEN et les temps à ces points d'inflexion.

La relation entre le maximum et l'intégrale du NDVI au cours du cycle de la canne et le rendement canne final a été étudiée sur 59 parcelles des exploitations Barau et Caruel pour le cycle cultural 2002-2003 (Annexe 14). Les ajustements obtenus pour chacune des parcelles en repousse et les paramètres associés sont représentés en annexe 16.

L'intégrale de l'ajustement est calculée pour l'ensemble du cycle cultural (Figure 73). Le maximum du NDVI est également extrait, fourni par l'ajustement (Figure 73).

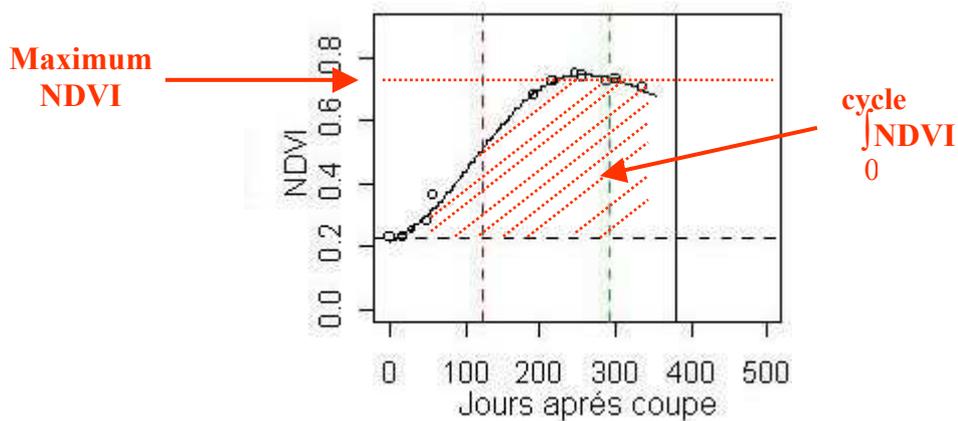


Figure 73. Indicateurs calculés pour chaque parcelle à partir des ajustements de NDVI au cours du cycle cultural : intégrale du NDVI et maximum de NDVI

Les résultats sont présentés (Figure 74) pour la relation obtenue entre le maximum de NDVI ajusté et le rendement canne.

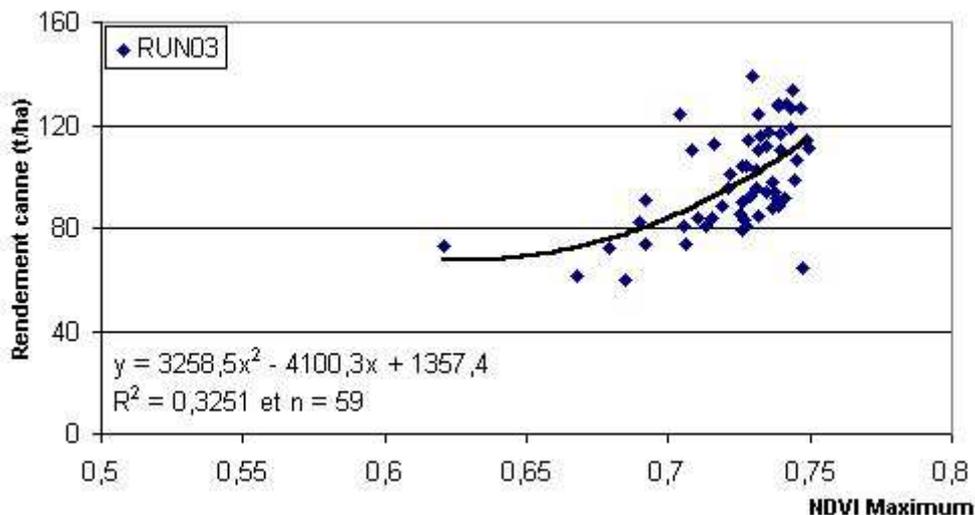


Figure 74. Relation entre le maximum de NDVI et le rendement en canne, exploitation Barau et Caurel, cycle cultural 2002-2003.

Le résultat indique que la relation obtenue à partir du maximum de NDVI exprime 33% de la variabilité des rendements canne observés. Le manque de relation dans nos données peut s'expliquer en partie par une distribution trop faible des valeurs de rendement et d'indice NDVI. Concernant la relation entre l'intégrale du NDVI au cours du cycle et le rendement canne final, nous n'avons pu calculer les valeurs de l'intégrale que pour 29 parcelles sur les 59 initiales. Le logiciel R nous a sorti des valeurs non utilisables (NA). La Figure 75 présente la relation obtenue entre l'intégrale de l'indice de végétation NDVI et le rendement canne final.

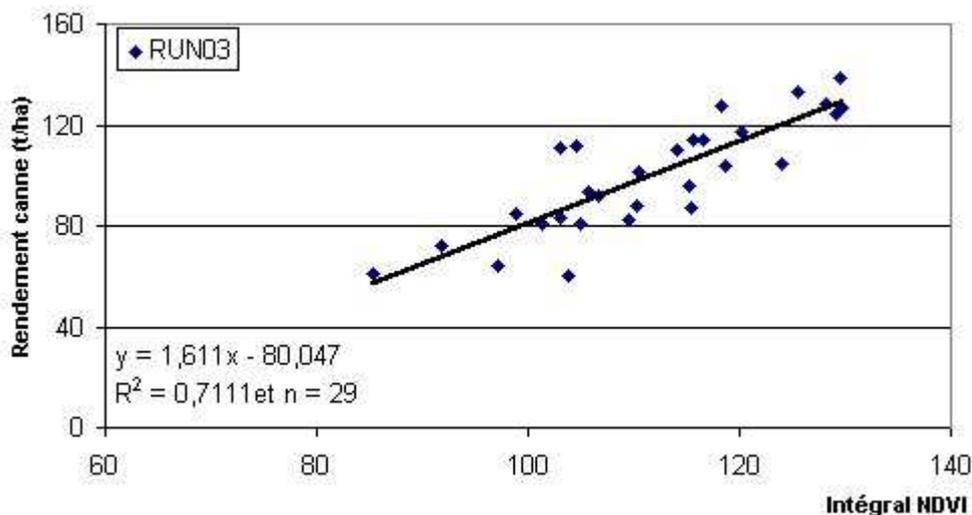


Figure 75. Relation entre l'intégrale de l'indice de végétation NDVI au cours du cycle et le rendement canne final, exploitation Barau et Caurel, cycle culturel 2002-2003.

On constate que la relation établie à partir de l'intégrale du NDVI exprime 71% de la variabilité des rendements canne observés. Cependant, le nombre restreint de points entre le rendement canne et l'intégrale du NDVI ne nous permet pas d'utiliser cette relation.

Dans le cadre du projet SUCRETTE, nos données (valeurs de réflectance SPOT et valeurs de rendement canne) ont été mises en commun avec des données, issues de protocoles comparables, mesurées à la Guadeloupe en 2003 (97 parcelles) et 2004 (37 parcelles).

La mise en commun de ces données a permis d'établir une relation entre le maximum et l'intégrale de NDVI et les valeurs de rendement canne. La Figure 76 présente les résultats obtenus pour la relation entre le rendement canne et le maximum de NDVI.

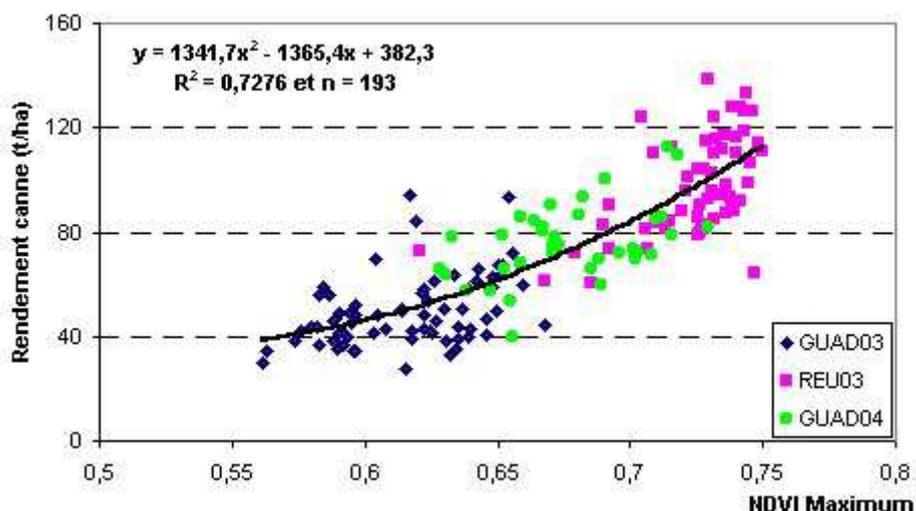


Figure 76. Relation entre le maximum de NDVI calculé à partir des réflectances enregistrées par SPOT 4&5 et le rendement final en canne pour La Réunion et la Guadeloupe, cycles culturels 2003, 2004 (Bégué, 2005).

Les résultats obtenus nous indiquent que l'estimation du rendement canne peut être faite par l'utilisation du maximum de NDVI avec une RMSE égale à 13,65 t/ha. En effet, la relation établie à partir du maximum de NDVI exprime 73% de la variabilité des rendements canne observés.

La Figure 77 présente les résultats obtenues entre l'intégrale du NDVI au cours du cycle et le rendement canne final.

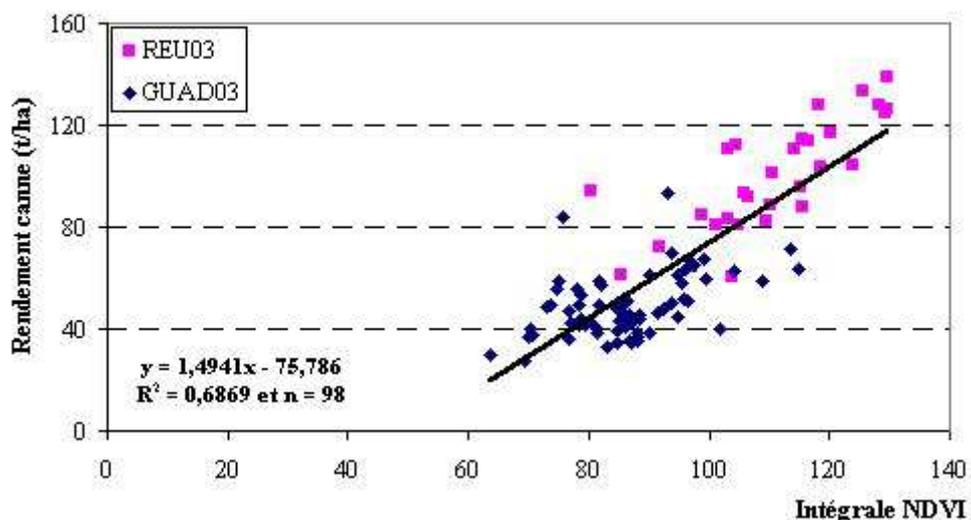


Figure 77. Relation entre l'intégrale de NDVI calculé à partir des réflectances enregistrées par SPOT 4&5 et le rendement final en canne pour La Réunion et la Guadeloupe, cycles culturels 2003.

En ce qui concerne l'intégrale du NDVI, la RMSE est légèrement supérieure à celle obtenue pour le maximum de NDVI : elle est égale à 14,33 t/ha et la relation établie exprime 69% de la variabilité des rendements canne observés.

Les relations obtenues entre le maximum et l'intégrale de NDVI durant le cycle de la canne, sur l'intégralité du jeu de données (La Réunion et la Guadeloupe), peuvent être appliquées à La Réunion car les mesures sont issues de protocoles similaires (Bégué, 2005). Nous choisirons d'utiliser la relation (maximum NDVI et rendement canne) pour établir des cartes de rendement potentiel à partir d'images SPOT 4&5 acquises au moment où les parcelles sont au maximum de leur développement, avant la coupe au mois de mai (Figure 65). En effet, on a besoin d'une seule image (au maximum du développement) pour appliquer la relation obtenue entre le maximum de NDVI et le rendement canne, alors qu'une série temporelle de plusieurs images est nécessaire pour le calcul de l'intégrale du NDVI.

Le rendement potentiel (t/ha) s'exprime en fonction de la valeur de NDVI maximum avant la coupe par la relation suivante :

$$\text{RDT Canne} = 1341,7 \times \text{NDVI}_{\text{Spot}}^2 - 1365,4 \times \text{NDVI}_{\text{Spot}} + 382,3$$

Équation 3

3.1.5.3 Estimation de la valeur de SPAD

Pour analyser les relations entre les valeurs de SPAD et les réflectances SPOT nous avons pris en compte les parcelles dont le stade de développement est supérieur à 2500 degrés jour. Notre jeu de données ne met en évidence aucune relation entre les valeurs de SPAD et les réflectances mesurées à partir des images SPOT 4&5 (Figure 78), contrairement aux mesures faites avec le radiomètre Cimel (Figure 69).

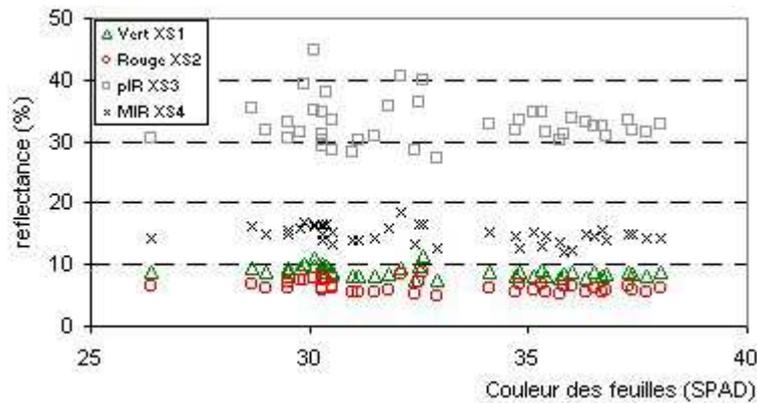


Figure 78. Relation entre les réflectances enregistrées par SPOT 4&5 et les valeurs de SPAD mesurées au champ.

Les réflectances SPOT 4&5 semblent être moins sensibles aux changements d'état du couvert, concernant les valeurs de SPAD (Figure 78). L'indice de végétation NDVI, calculé à partir des réflectances mesurées par SPOT 4&5, met en évidence une faible relation avec les valeurs de SPAD et le NDVI (Figure 79).

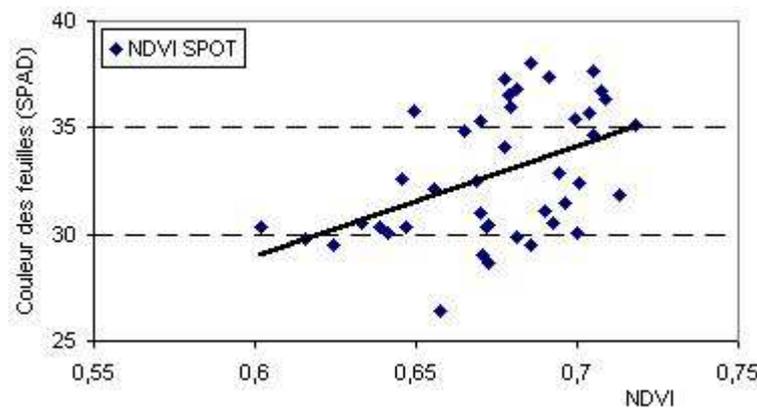


Figure 79. Relation entre les valeurs de SPAD et le NDVI calculé à partir des réflectances SPOT 4&5.

Cependant, notre jeu de données ne permet pas de conclure car il ne couvre pas toute l'amplitude des valeurs de SPAD nécessaire à l'établissement d'une relation.

3.1.6 Analyse hyperspectrale

Pour extraire l'information des images hyperspectrales CASI, nous avons utilisé deux méthodes.

La première méthode est basée sur le calcul d'indices de végétation à partir des bandes spectrales adaptées aux variables biophysiques suivies. L'indice choisi estime la variable avec l'erreur (RMSE) la plus faible.

Une deuxième méthode consiste à établir une relation multilinéaire (utilisant plusieurs bandes spectrales CASI) pour estimer les variables biophysiques suivies. Les bandes sont choisies en fonction de la valeur du coefficient de détermination (R^2) existant entre les bandes spectrales CASI et les variables biophysiques à estimer.

La méthode apportant les meilleurs résultats sera utilisée comme fonction de transfert pour générer les cartes des variables biophysiques suivies.

3.1.6.1 Les indices de végétation

Nous avons considéré des indices de végétation spécifiquement développés pour estimer la teneur en pigment d'un couvert végétal afin d'établir les relations qui existent entre les réflectances CASI et la teneur en azote ou les mesures de SPAD réalisées sur les couverts de canne durant la deuxième expérimentation. Pour le LAI ou la biomasse fraîche, des indices sensibles à la structure du couvert sont utilisés. On présente dans le Tableau 17 la liste des indices utilisés pour estimer le LAI, la biomasse, la teneur en azote des feuilles et la valeur de SPAD à l'échelle du couvert.

Tableau 17. Indices de végétation calculés à partir des réflectances mesurées par le CASI pour l'estimation des variables biophysiques descriptives de l'état du couvert de la canne.

Paramètres de structure du couvert végétal : Surface foliaire, biomasse	Paramètres descriptifs de l'état biochimique : teneur en azote, SPAD
NDVI, RDVI, MSR, SAVI, MSAVI, SARVI, MCARI, TVI, TVI1	SRPI, PRI, NPCI, SR, Lich, Vogel1, Vogel2

La formulation des indices de végétation est donnée en annexe 10. Pour mesurer l'efficacité des indices de végétation afin d'estimer les variables descriptives de l'état du couvert, nous avons calculé le coefficient de détermination (R^2) ainsi que la RMSE obtenus par régression

linéaire (Figure 80 et Figure 81) entre les valeurs mesurées sur le terrain et les valeurs calculées avec l'indice. Les résultats obtenus pour les paramètres de structure et de composition biochimique du couvert sont respectivement donnés en Tableau 18 et Tableau 19.

Tableau 18. Coefficients de détermination et RMSE obtenus par régression linéaire entre les indices de végétation calculés à partir des réflectances enregistrées par le CASI et les paramètres structuraux du couvert de la canne (LAI et biomasse fraîche).

	indices	NDVI	RDVI	MSR	SAVI	MSAVI	SARVI	MCARI	TVI	TVI1
LAI (m ² /m ²)	R ²	0,1341	0,3355	0,1237	0,3367	0,3212	0,3849	0,3928	0,5878	0,3885
	RMSE	1,07	0,94	1,08	0,94	0,95	0,90	0,90	0,74	0,90
Biomasse (t/ha)	R ²	0,2160	0,3841	0,1949	0,3897	0,3824	0,4399	0,4957	0,5071	0,4131
	RMSE	18,75	16,63	18,96	16,56	16,66	15,91	15,29	14,95	16,25

Le TVI (*Triangular vegetation index*) est le plus performant pour estimer le LAI avec une erreur de 0,74 (R²=0,59). Pour le rendement canne (biomasse fraîche) ce même indice apparaît être le plus adapté avec une erreur de 14,95 t/ha (R²=0,51). Ces deux variables peuvent alors être estimées en utilisant la relation linéaire établie à partir de l'indice de végétation TVI dont la formule est :

$$TVI = 0.5[120(R_{739} - R_{557}) - 200(R_{679} - R_{557})]$$

où R_γ = réflectance à γ nm

La Figure 80 présente les relations linéaires obtenues entre la surface foliaire, la biomasse fraîche et l'indice de végétation TVI.

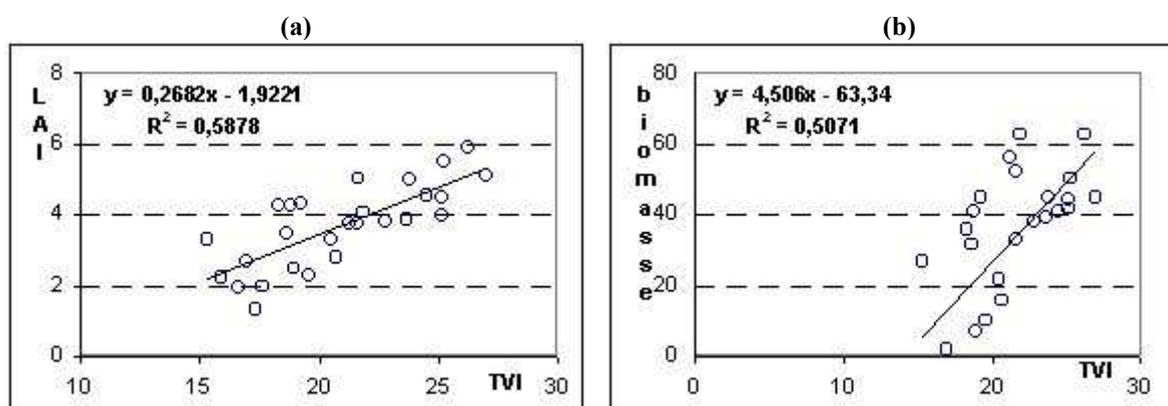


Figure 80. Relation entre le LAI (a), la biomasse fraîche (b) et l'indice de végétation TVI calculé à partir des réflectances enregistrées par le CASI.

Le LAI et la biomasse seront estimés en fonction du TVI par les relations linéaires suivantes :

$$\text{LAI} = 0,2682 \times \text{TVI} - 1,9221$$

et

$$\text{Biomasse} = 4,506 \times \text{TVI} - 63,34$$

Les résultats obtenus pour l'estimation du T_N et de la valeur de SPAD à partir des indices de végétation hyperspectraux sont présentés dans le Tableau 19.

Tableau 19. Coefficients de détermination et RMSE obtenus par régression linéaire entre les indices de végétation calculés à partir des réflectances enregistrées par le CASI et les paramètres descriptifs de l'état biochimique du couvert (T_N et SPAD).

	indices	SR	SRPI	PRI	NPCI	licht	Vogel1	Vogel2
N (g/kg) m.s.	R ²	0,0022	0,0728	0,4645	0,0898	0,0040	0,1014	0,0326
	RMSE	3,11	2,99	2,28	2,97	3,10	2,95	3,06
SPAD	R ²	0,0805	0,1221	0,5547	0,1420	0,0408	0,1640	0,1056
	RMSE	4,94	4,83	3,44	4,77	5,05	4,71	4,87

La meilleure estimation de la teneur en azote est faite en utilisant le PRI avec une erreur de 2,28 g/kg m.s. ($R^2=0,46$). Le PRI est également l'indice permettant d'estimer le SPAD avec l'erreur la plus faible égale à 3,44 unité SPAD ($R^2=0,55$).

La Figure 81 illustre la relation linéaire entre le T_N , le SPAD et l'indice PRI dont la formule est :

$$\text{PRI} = \frac{(R524 - R575)}{(R524 + R575)}$$

Comme pour le LAI et la biomasse, on doit s'assurer du type de relation existant entre les paramètres à estimer (T_N et SPAD) et l'indice le plus performant, le PRI (*Photochemical Reflectance Index*).

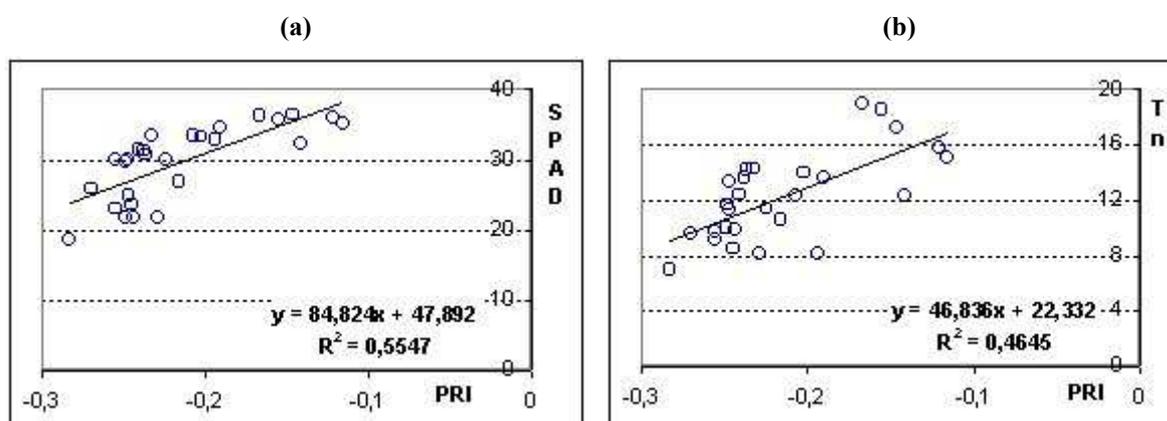


Figure 81. Relation entre le SPAD (a), le T_N (b) et l'indice de végétation PRI calculé à partir des réflectances enregistrées par le CASI.

La teneur en azote et le SPAD sont estimés à partir du PRI par les relations linéaires suivantes :

$$\text{SPAD} = 84,824 \times \text{PRI} + 47,892$$

et

$$\text{T}_N = 46,836 \times \text{PRI} + 22,332$$

3.1.6.2 Les régressions linéaires multiples

Il faut identifier les bandes spectrales sensibles pour chacun des paramètres biophysiques. Pour ce faire, on calcule le coefficient de détermination entre les réflectances des 19 bandes spectrales et chaque un des paramètres biophysiques descriptifs de l'état du couvert. Les coefficients de détermination sont représentés sur la Figure 82 pour le LAI et la biomasse (rendement canne) et en Figure 83 pour le SPAD et le T_N ainsi que la réflectance moyenne d'un couvert fermé de canne.

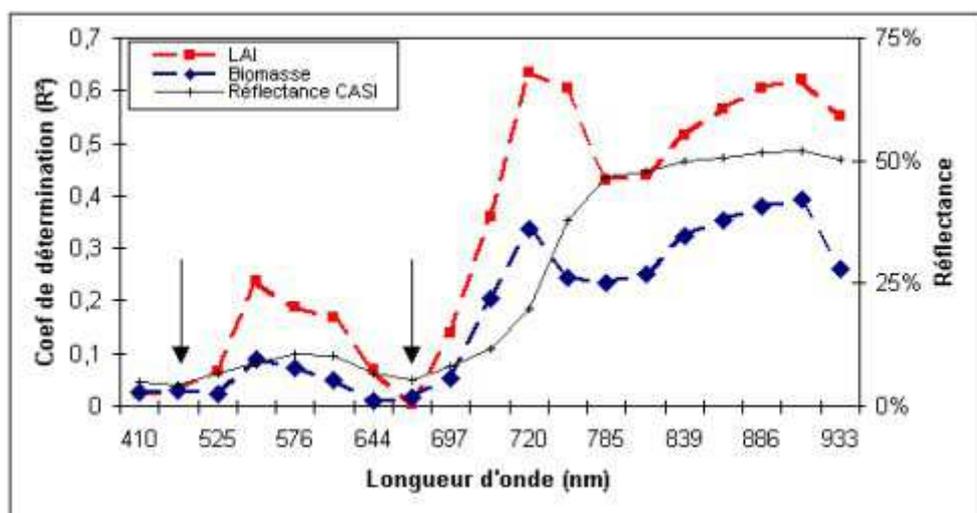


Figure 82. Coefficient de détermination par bande spectrale pour le LAI et la biomasse fraîche. La réflectance spectrale pour un couvert fermé de canne est également représentée pour mieux se repérer sur le spectre.

Le LAI et la biomasse, se comportent de manière similaire avec des maxima de corrélation obtenus pour les mêmes longueurs d'onde (Figure 82). On observe deux zones à faible corrélation ([450-520] et [630-690]) correspondant aux zones d'absorption des pigments foliaires chlorophylles *a* et *b*, beta-carotène.

Entre ces deux zones, on observe une zone à plus forte corrélation : il s'agit du « *green peak* », point de réflectance maximum dans le spectre visible. Ce point se situe aux alentours

de 550 nm, correspondant au vert. On constate à partir du deuxième pic d'absorption jusqu'au « *red hedge* » (720 nm) une augmentation de la corrélation entre les bandes spectrales et les variables biophysiques jusqu'à un maximum de corrélation obtenue pour la réflectance à 719 nm. La réflectance à 719 nm exprime 65% des variations du LAI observé: il s'agit de la bande la plus fortement corrélée. Après ce deuxième pic de corrélation, on remarque une légère diminution de la corrélation jusqu'à 800 nm puis un troisième pic apparaît aux alentours de 900 nm.

Globalement, on peut dire que les paramètres structuraux du couvert sont plus fortement corrélés aux réflectances dans le « *red hedge* » et le proche infrarouge que dans le visible.

Les valeurs de coefficient de détermination pour le T_N et SPAD (Figure 83) sont nettement inférieures à celles observées pour le LAI et la biomasse fraîche (Figure 82).

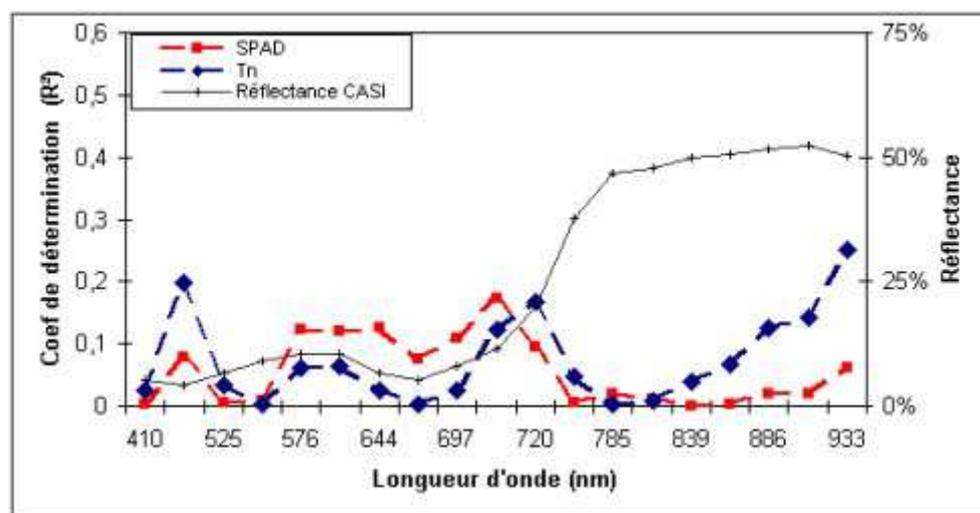


Figure 83. Coefficient de détermination par bande spectrale pour le T_N et le SPAD. La réflectance spectrale pour un couvert fermé de canne est également représentée pour mieux se repérer sur le spectre.

L'interprétation de ce corrélogramme est moins évidente que pour le LAI et la biomasse. Globalement, les longueurs d'ondes les plus corrélées au T_N et au SPAD se situent dans le visible, de 400 à 700 nm. On remarque tout de même une augmentation de la corrélation entre le taux d'azote et les bandes CASI dans le proche-infrarouge, supérieures à 800 nm (Figure 83).

La technique des corrélations nous permet d'identifier les bandes spectrales les plus sensibles à un paramètre biophysique donné. Nous allons formaliser les régressions linéaires multiples à partir des bandes les plus corrélées. La RMSE et le coefficient de détermination sont utilisés pour évaluer la qualité de l'estimation faite par les régressions linéaires multiples. La première régression linéaire sera basée sur une bande spectrale CASI. Si la relation ainsi obtenue permet une estimation satisfaisante, on ne rajoute pas de bande spectrale. Par contre, si l'estimation n'est pas assez précise, on rajoute à la relation la deuxième bande spectrale la plus corrélée au paramètre, et ainsi de suite jusqu'à ce que l'estimation soit acceptable ($R^2 > 0,7$). En conséquence on pourra obtenir une relation linéaire multiple composée de plusieurs bandes spectrales CASI. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 20.

Tableau 20. Bandes spectrales, coefficients de détermination et RMSE obtenus par régression linéaire multiple pour le LAI, le rendement canne, le T_N et la valeur de SPAD.

	Modèle linéaire "une bande"			Modèle linéaire "deux bandes"			Modèle linéaire "trois bandes"		
	Bandes (nm)	R ²	RMSE	Bandes (nm)	R ²	RMSE	Bandes (nm)	R ²	RMSE
LAI (m ² /m ²)	739	0,61	0,75	739 489	0,69	0,68	739 489 704	0,83	0,51
Rdt (t/ha)	908	0,36	20,72	908 410	0,42	20,22	908 410 739	0,55	18,24
SPAD	704	0,17	4,87	704 557	0,59	3,50	704 557 575	0,68	3,16
N (g/Kg) m.s.	886	0,13	3,02	886 784	0,65	1,95			

	Modèle linéaire "quatre bandes"			Modèle linéaire "cinq bandes"		
	Bandes (nm)	R ²	RMSE	Bandes (nm)	R ²	RMSE
LAI (m ² /m ²)						
Rdt (t/ha)	908 410 739 489	0,65	16,27	908 410 739 489 524	0,74	14,34
SPAD	704 557 575 600	0,78	2,70			
N (g/Kg) m.s.						

La Figure 84 permet une comparaison des deux méthodes en fonction du paramètre étudié. Pour les quatre variables, la méthode d'estimation par régression linéaire multiple donne un meilleur résultat que les différents indices testés (coefficient de détermination le plus élevé et RMSE la plus faible). Nous utiliserons les régressions linéaires multiples pour la cartographie des paramètres biophysiques descriptifs de l'état du couvert.

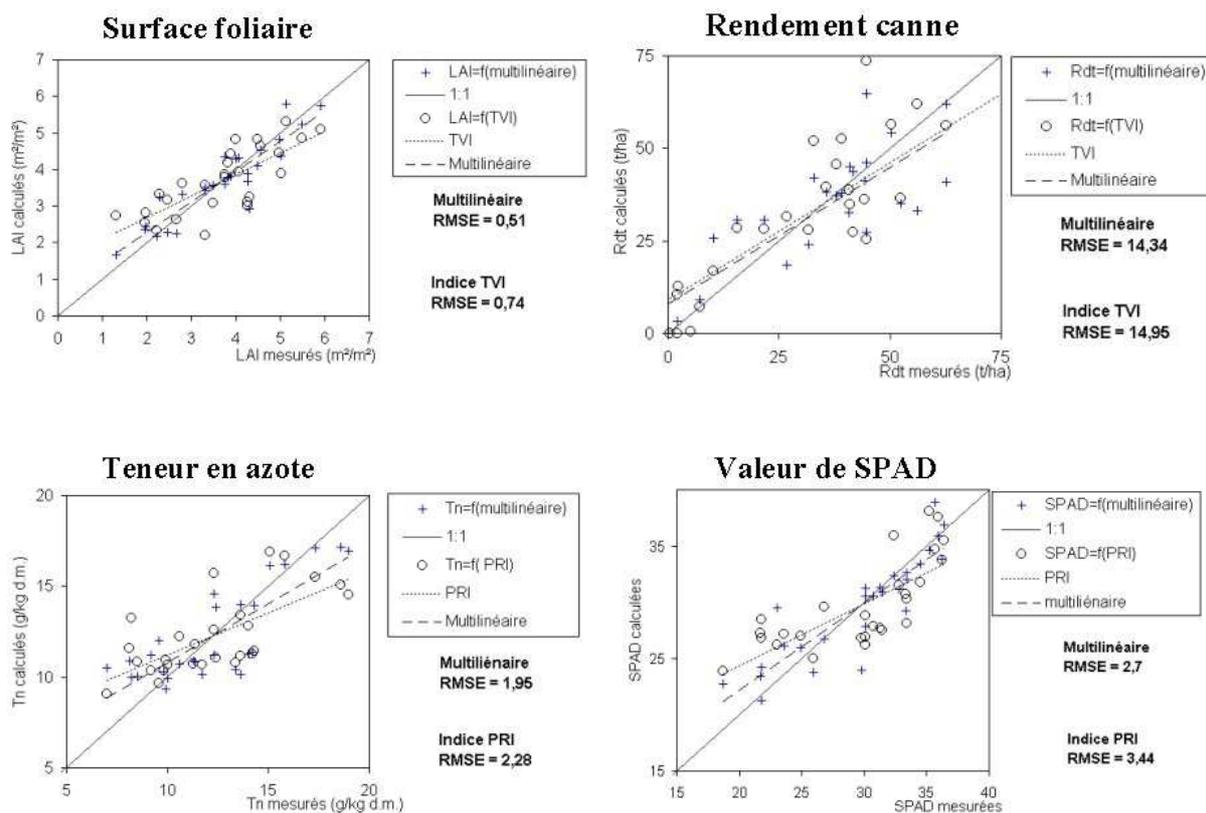


Figure 84. Comparaison des valeurs mesurées au champ (surface foliaire, rendement canne, T_N et SPAD) et calculées par les indices de végétation et par régression linéaire multiple à partir des réflectances CASI.

La formulation des régressions linéaires multiples permettant l'estimation des différents paramètres biophysiques descriptifs de l'état du couvert est présentée ci dessous :

$$\text{LAI} = 13,82 \times \mathbf{R}_{739} - 63,47 \times \mathbf{R}_{489} + 28,69 \times \mathbf{R}_{704} - 2,24$$

$$\text{Biomasse} = 397,66 \times \mathbf{R}_{908} + 1\,957,89 \times \mathbf{R}_{410} - 746,51 \times \mathbf{R}_{739} - 4\,103,56 \times \mathbf{R}_{489} + 2\,703,10 \times \mathbf{R}_{524} - 1,72$$

$$\text{T}_N = -69,62 \times \mathbf{R}_{886} + 67,83 \times \mathbf{R}_{784} + 16,59$$

$$\text{SPAD} = -541,56 \times \mathbf{R}_{704} + 796,20 \times \mathbf{R}_{557} - 634,06 \times \mathbf{R}_{575} + 484,60 \times \mathbf{R}_{600} + 37,12$$

Nous avons représenté les bandes CASI utilisées pour élaborer les régressions linéaires multiples pour chaque paramètre suivi (Figure 85), qui sont les bandes les plus corrélées aux variables biophysiques (voir partie Applications pour la filière).

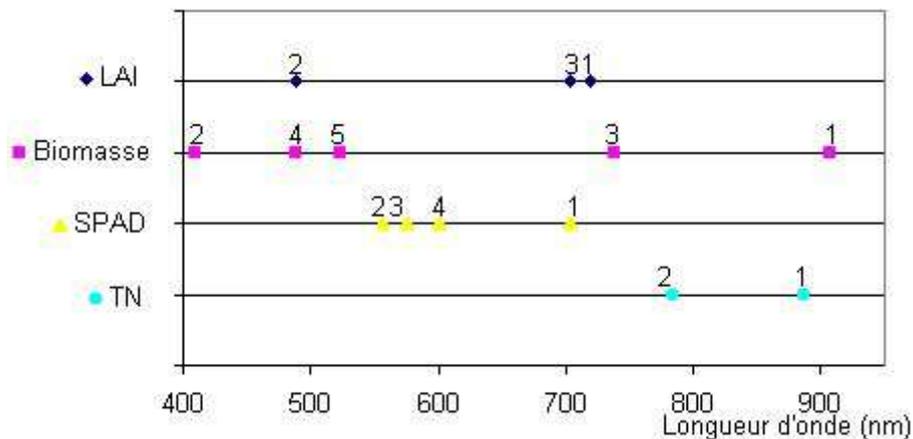


Figure 85. Sensibilité des bandes CASI aux différents paramètres descriptifs de l'état du couvert d'une parcelle de canne.

Les numéros permettent de classer les bandes en fonction du coefficient de détermination calculé entre les bandes spectrales CASI et chaque variable.

Les résultats obtenus avec les indices de végétation ou les régressions linéaires multiples nous permettent de dire qu'il est possible d'estimer les différentes variables biophysiques à partir des réflectances CASI. Contrairement aux réflectances enregistrés par SPOT, le CASI permet l'estimation aussi bien des paramètres structuraux que biochimiques. En effet, si pour la surface foliaire l'estimation est possible à partir des réflectances SPOT et CASI, il n'en est pas de même pour la valeur de SPAD, fortement corrélée à la teneur en azote des feuilles. Il semble plus difficile d'estimer une variable biochimique qu'une variable biophysique. Il est cohérent que des mesures plus fines telles que celles faites par le CASI (grand nombre de bandes et petite largeur des bandes) soient nécessaires pour estimer un tel facteur.

Téledétection et utilisation d'un modèle de production

Le modèle de production de la canne à sucre, Mosaicas (Martiné, 2003), est composé de deux modules dynamiques fonctionnant à un pas de temps journalier : un module de bilan hydrique et un module de croissance. Il est calé pour les conditions pédo-climatiques de La Réunion et pour la variété R570, cultivée en repousse sur des cycles maximum de 13 mois avec un écartement proche de 1,5 m. Les contraintes liées à l'alimentation minérale, à l'enherbement et aux maladies ou ravageurs ne sont pas prises en compte.

Le module de croissance simule l'indice foliaire (LAI) selon le formalisme 'big leaf' (Martiné, 2003). L'efficacité d'interception est calculée à partir du LAI et d'un coefficient d'extinction de la loi de Beer Lambert. Un coefficient de stress dû à la température et à deux coefficients de stress hydriques est calculé. Un seul stade phénologique exprimé en degrés jour intervient. Il s'agit de la levée ou apparition du LAI. Les autres stades phénologiques sont exprimés en fonction des niveaux de couverture ou de biomasse atteints.

La température, le stress hydrique et la phénologie influent sur la mise en place et la sénescence de l'indice foliaire, sur l'élaboration de la biomasse totale et sur la partition de biomasse de tiges usinables entre structure et saccharose. Le rang du cycle de récolte dans le cycle de culture n'est pas représenté de plus, les processus de sénescence des tiges usinables ne sont pas simulés.

3.1.7 Application/test du modèle Mosaicas sur nos sites d'études

Les simulations sont réalisées via la plate forme SIMULEX par Jean-François Martiné. Les simulations ont été faites pour 18 parcelles de l'exploitation Barau représentant une surface de 54,3 ha et 11 parcelles de l'exploitation Caruel représentant une surface de 65,3 ha ; la description des 29 parcelles utilisées dans cette analyse est disponible en Annexe 15. Les parcelles choisies sont toutes des repousses sur l'année culturale 2002-2003. Les simulations Mosaicas permettent d'obtenir des valeurs de rendement canne et de rendement sucre parcellaires. Nous pouvons comparer les sorties de Mosaicas avec les données réelles fournies par les exploitants.

Ceci n'est pas une validation du modèle mais un élément comparatif qui sera utilisé pour estimer l'apport du « forçage ». L'approche « forçage » consiste à estimer une variable d'entrée du modèle de fonctionnement ou à réactualiser une variable d'état simulée par le modèle à partir d'une valeur qui est dérivée de l'information satellitaire (Maas, 1988 ; Delécolle *et al.*, 1992 ; Moulin *et al.*, 1998).

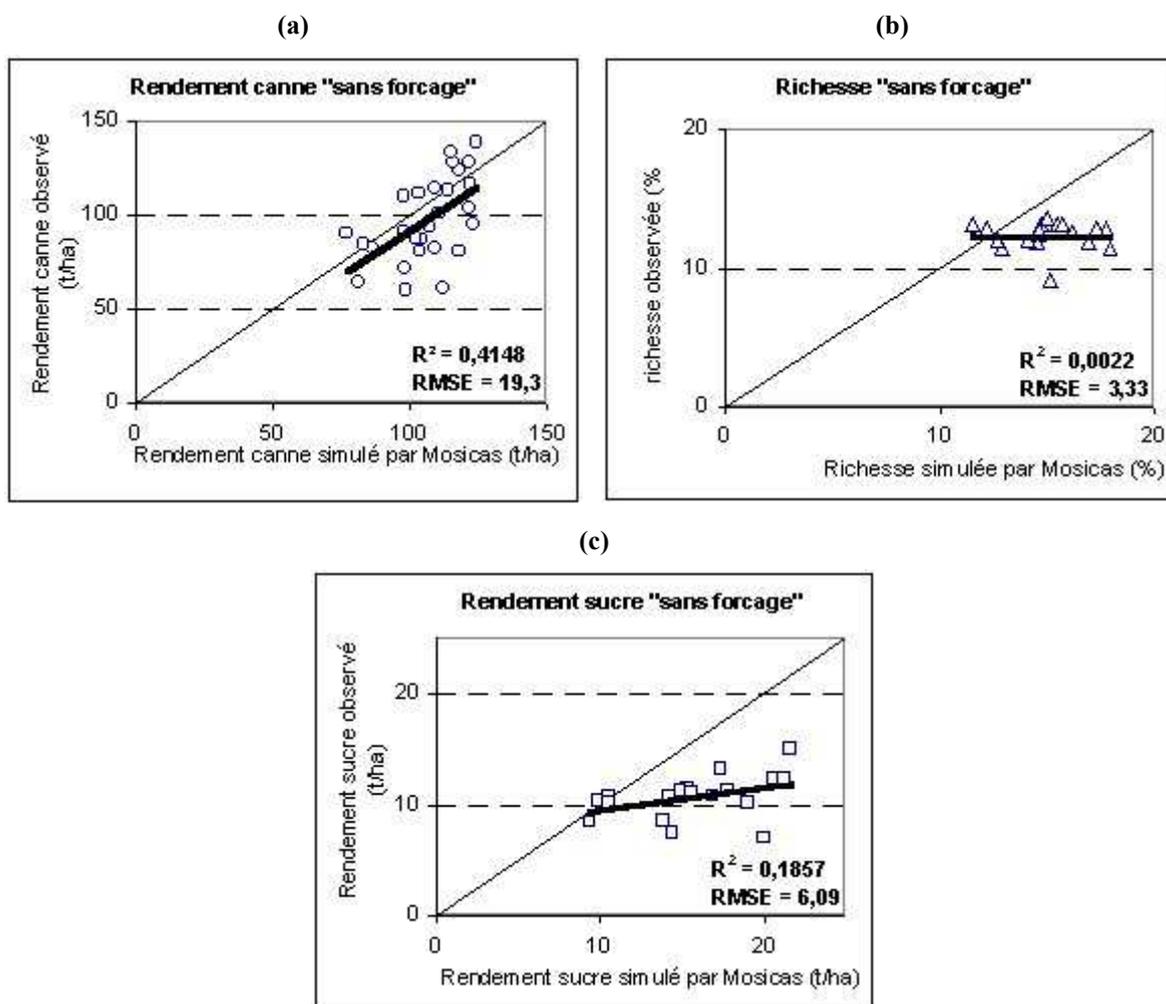


Figure 86. Comparaison entre les valeurs de rendement canne (a), de richesse (b) et de rendement sucre (c) simulés par Mosaicas et les valeurs observées, cycle cultural 2002-2003.

Le coefficient de détermination (R^2) de la relation linéaire entre le rendement canne observé et simulé indique que Mosaicas exprime 41,5 % de la variabilité du rendement canne observé. La RMSE entre l'observé et le simulé pour les 29 mesures de rendement canne est égale à 19,3 t/ha. Pour la richesse et le rendement sucre, les parcelles de l'exploitation de M. Caruel ne sont pas prises en compte car les données de richesse ne sont pas disponibles.

La richesse et le rendement sucre sont les facteurs de production les plus difficiles à estimer, même avec l'utilisation d'un modèle de croissance complexe, adapté aux conditions locales. En effet, les corrélations sont faibles entre les valeurs estimées et mesurées.

3.1.8 Intégration des données de télédétection dans le modèle

Le modèle Mosaic est « forcé » par les valeurs journalières du LAI déduites des ajustements du NDVI pour chaque parcelle et des paramètres de la régression obtenue entre le NDVI et le LAI (Equation 1, p. 120). Ces derniers sont déterminés à partir des évolutions du NDVI moyen parcellaire (Equation 2, p. 120), disponible en Annexe 16. La double fonction logistique permet d'obtenir des valeurs de NDVI parcellaire, au pas de temps journalier, tout en comblant les données manquantes (Figure 87).

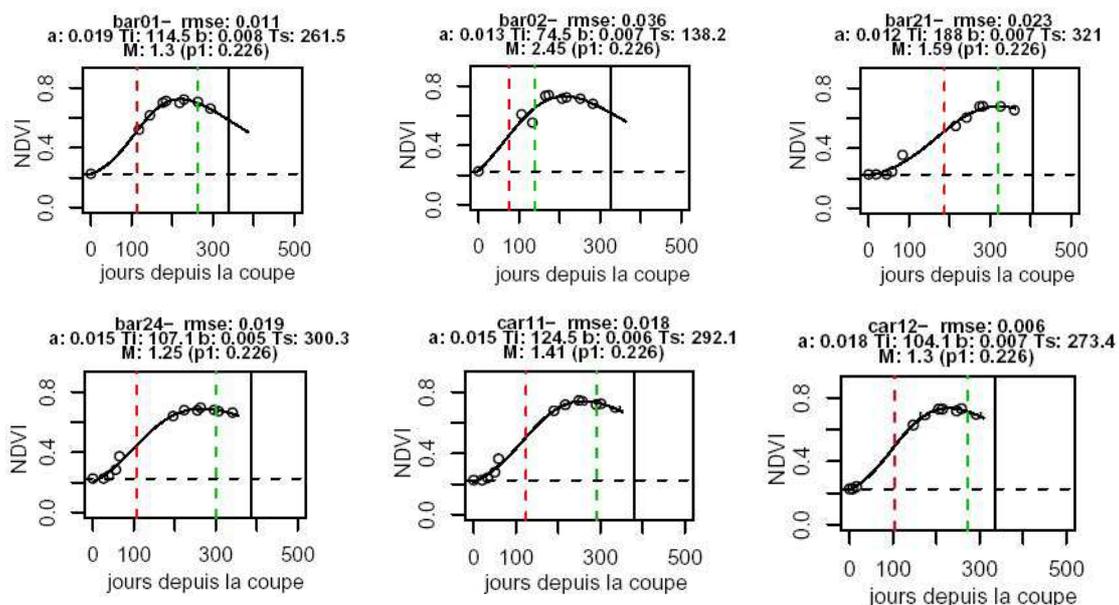


Figure 87. Courbes d'évolution du NDVI parcellaire et des valeurs de NDVI extraites des images SPOT 4&5.

Le LAI est déduit du NDVI en utilisant les paramètres de la relation établie entre le LAI et le NDVI (Figure 72). On peut ainsi fournir au modèle Mosaic des profils d'évolution de LAI parcellaire qui sont directement « injectés » dans le modèle à la place de la surface foliaire qu'il simule.

3.1.9 Comparaison des simulations avec et sans forçage

Pour tester l'apport de l'utilisation de la télédétection dans un modèle de croissance pour l'estimation de la production, on compare les rendements canne et sucre simulés par le modèle avec les données réelles. Il s'agit du même jeu de données que celui utilisé sans forçage en Figure 86.

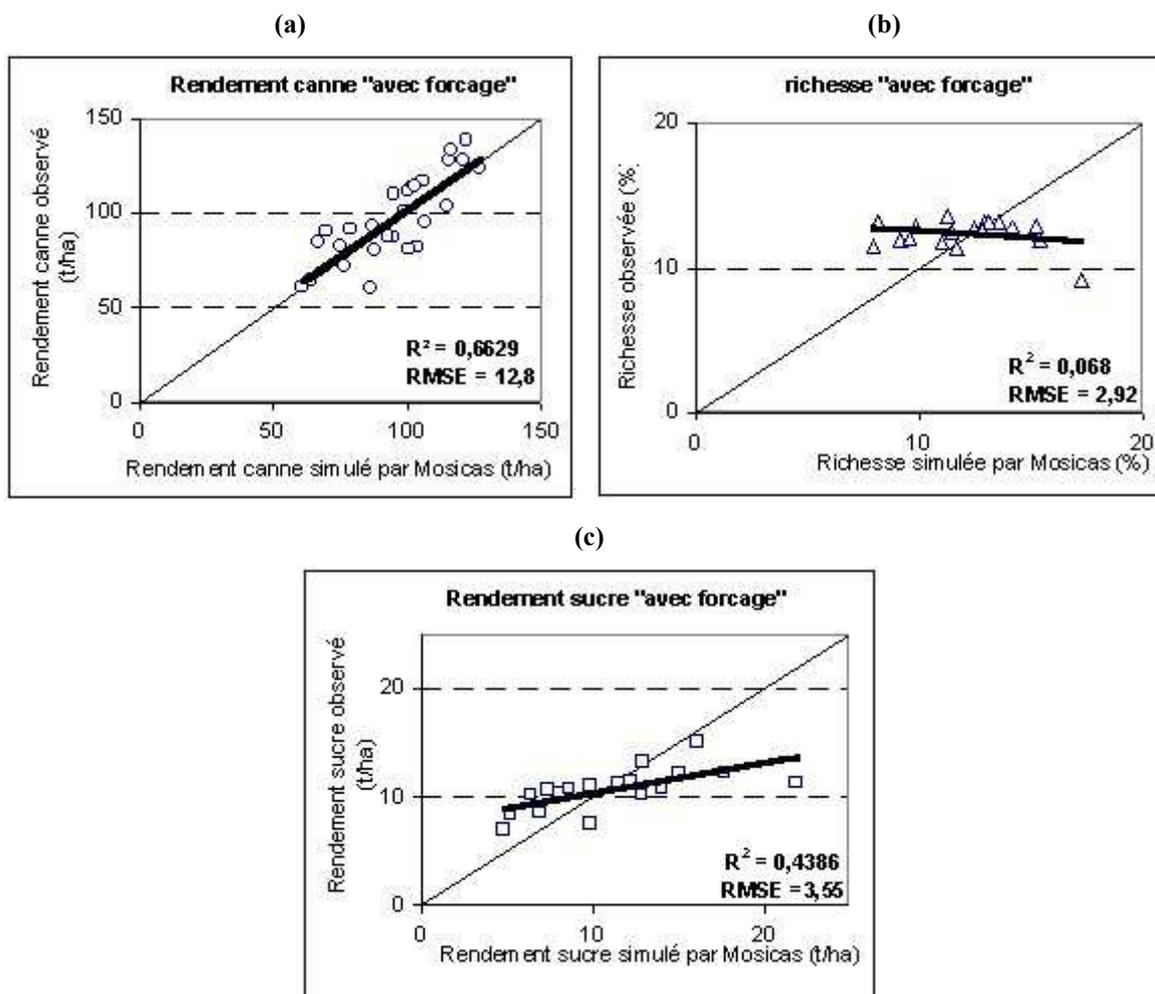


Figure 88. Comparaison entre les rendements canne (a), la richesse (b) et le rendement sucre (c) simulés par Mosaicas avec forçage du LAI estimé par télédétection et les valeurs observées, cycle cultural 2002-2003.

L'estimation du rendement canne est améliorée par l'utilisation du LAI estimé par télédétection : la RMSE est égale à 12,7 t/ha avec forçage au lieu de 19,3 t/ha sans forçage.

Avec le forçage du LAI, le modèle Mosaicas exprime 66,3 % de la variabilité dans les valeurs de rendement canne observées. L'erreur sur l'estimation du rendement sucre est également améliorée. En effet, l'erreur entre les valeurs de rendement sucre simulées et observées passe de 6,09 t/ha sans forçage à 3,55 t/ha avec forçage.

On peut représenter les rendements canne simulés par Mosicas avec forçage du LAI sous forme cartographique pour les deux exploitations (Figure 89).

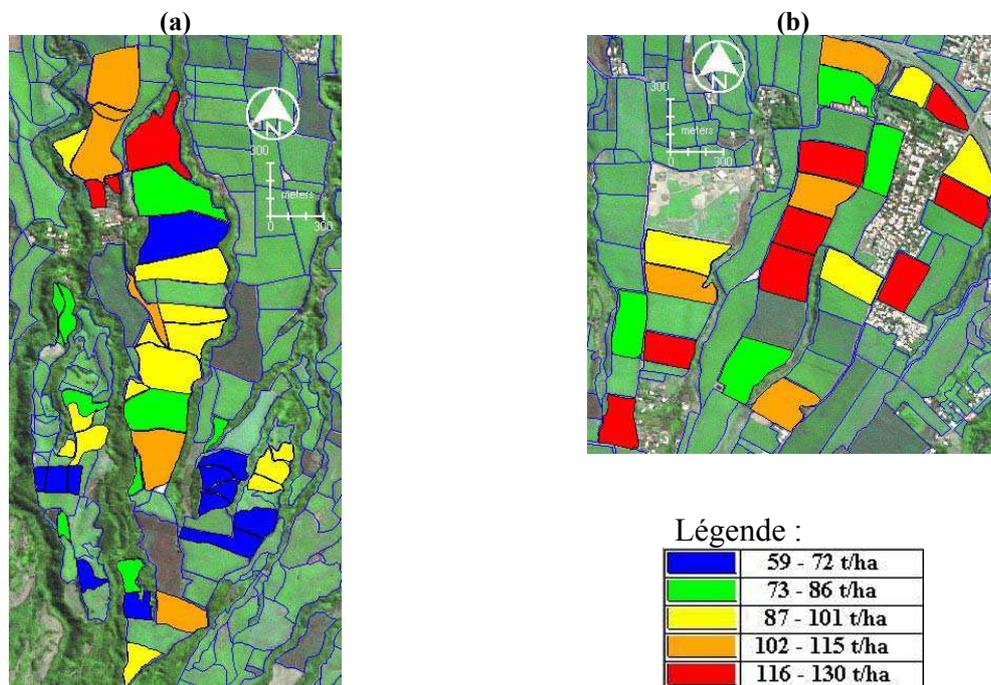


Figure 89. Cartes de rendements simulés par Mosicas avec forçage du LAI estimé par télédétection, pour les parcelles des exploitations Barau (a) et Caruel (b), cycle cultural 2002-2003.

Nous avons pu tester l'apport du couplage entre un modèle de croissance et les données de télédétection en utilisant la relation établie entre le LAI et le NDVI SPOT 4&5. Cette relation nous a permis d'extraire des profils d'évolution parcellaire de LAI à partir des profils d'évolution du NDVI. Les résultats nous permettent de dire que les estimations de production (surtout le rendement canne) faites par Mosicas sont améliorées par le forçage du LAI estimé par télédétection.

Discussion sur les principaux résultats

Au vu de nos résultats, nous abordons maintenant l'apport des informations multitemporelles et hyperspectrales à l'aide à la gestion de la sole cannière réunnionaise.

3.1.10 Apport de l'information multitemporelle SPOT 4&5

Concernant l'estimation des paramètres biologiques de la canne à sucre, il a été possible d'établir la relation entre le NDVI calculé à partir des réflectances SPOT 4&5 et la surface foliaire (en adéquation avec les tendances établies au moyen des mesures faites par le radiomètre de terrain Cimel). Par contre, la relation entre les réflectances enregistrées par les satellites SPOT 4&5 et la valeur de SPAD n'est pas apparue comme significative contrairement aux tendances établies avec le Cimel. On peut s'interroger sur le fait que les mesures de réflectance réalisées avec le Cimel au niveau de la canopée indiquent l'existence d'une relation entre les valeurs de NDVI et les valeurs de SPAD alors que les mesures de réflectance effectuées avec SPOT (dans les mêmes bandes) n'indiquent aucune relation. Les corrections atmosphériques n'ayant pas pu être faites sur la série temporelle d'images SPOT 4&5 (pas de données d'épaisseur optique disponibles), nous avons travaillé avec des réflectances au sommet de l'atmosphère alors que le Cimel mesure la réflectance au sommet de la canopée. Une autre explication peut venir de la faible amplitude des valeurs de SPAD mesurées. Il aurait été possible d'obtenir une plus grande amplitude des valeurs de SPAD en utilisant des essais aux champs contrastés en azote. La mise en place de tels essais n'a pas été possible.

En ce qui concerne l'apport du multitemporel à l'estimation du rendement canne, l'analyse de l'évolution du NDVI calculé à partir des réflectances enregistrées par les satellites SPOT 4&5 au cours du temps nous a permis d'établir des relations entre la biomasse fraîche (rendement canne) et le maximum ou l'intégrale du NDVI parcellaire au cours du cycle. Ces relations permettent l'estimation de la biomasse fraîche. Cependant, la méthode utilisant les valeurs du NDVI au maximum de développement est basée sur une relation avec des rendements mesurés lors de la récolte, plusieurs mois après l'acquisition de l'image ayant servi à son estimation. L'estimation du rendement canne faite par l'utilisation de la valeur de l'intégrale du NDVI a l'avantage d'être un suivi de l'état du développement au cours du cycle. Une limite apparaît quant au nombre d'images à utiliser pour calculer l'intégrale de la valeur du

NDVI. Des profils d'évolution temporelle de surface foliaire parcellaire ont pu être dérivés à partir de la série temporelle d'images SPOT 4&5 pour être utilisés dans le modèle de croissance Mosicas améliorant les estimations du rendement canne. Cette approche « couplage » entre modèle de production agro-météorologique et mesures satellitaires, pour l'estimation du rendement canne, est la méthode la plus précise. Cependant, sa mise en œuvre nécessite d'une part, des données météorologiques utilisées par le modèle de croissance et d'autre part, un nombre d'images suffisamment grand pour permettre de suivre l'évolution de la surface foliaire. Des recherches sont à mener sur le nombre d'images minimum permettant de caractériser l'évolution de la surface foliaire qui sera assimilée par le modèle.

Quant à l'apport à l'analyse thématique, les images multispectrales SPOT 4&5 permettent de distinguer de manière certaine, par leur résolution spatiale et spectrale, les trois états de surface d'une parcelle de canne : parcelle en sol nu (préparation d'une plantation), parcelle de canne plantée (couvert fermé) et parcelle récoltée (recouverte de paillis). Il est possible d'observer mensuellement l'évolution des différents états grâce à la fréquence d'acquisition d'images des satellites SPOT 4&5. Cette capacité multitemporelle est nécessaire pour le suivi des cycles de culture qui sont décalés à La Réunion en raison de l'étalement de la récolte sur six mois.

3.1.11 Apport de l'information hyperspectrale CASI

Les données hyperspectrales CASI ont permis d'estimer la surface foliaire, la biomasse fraîche, le taux d'azote foliaire ainsi que la valeur de SPAD par un couplage synchronisé entre l'acquisition des images et les mesures de terrain. L'estimation du taux d'azote ou de la valeur de SPAD d'un couvert de canne en phase de maturation permettrait le développement d'une application préconisant la date de coupe en fonction du degré de maturité de la parcelle.

Les données hyperspectrales CASI présentent un avantage majeur par rapport aux images satellites SPOT par leur richesse spectrale. De plus, la plate-forme aéroportée rend les acquisitions d'image indépendantes des conditions de nébulosités. Elles souffrent cependant en contre-partie de faiblesses géométriques et radiométriques qu'il n'est pas toujours aisé de corriger et celles-ci alourdissent fortement les traitements liés à l'exploitation des images, en particulier lorsqu'il s'agit de les utiliser sur une vaste zone d'étude. Le choix des bandes

spectrales d'acquisition doit être fait en fonction de la thématique abordée. L'utilisation d'un spectroradiomètre de terrain permet de choisir les bandes spectrales les plus adaptées pour l'acquisition des images CASI. L'estimation des paramètres de surface à partir des réflectances enregistrées par le CASI a été testée en utilisant deux méthodes : les indices de végétation et des régressions linéaires multiples. Les meilleures estimations sont obtenues en utilisant les régressions linéaires multiples.

4 APPLICATIONS POUR LA FILIERE

Les différents résultats que nous venons de vous présenter vont nous permettre de répondre aux besoins exprimés par les différents acteurs de la filière canne pour le suivi de la croissance, l'estimation de rendement et le suivi des coupes.

Le suivi des coupes et des replantations

Cette partie présente les deux méthodes utilisées pour estimer le taux d'avancement de la coupe à La Réunion en 2003. Le taux d'avancement est calculé à partir de traitements d'images satellites SPOT 4&5. Les méthodologies ont été appliquées (en temps quasi réel) et validées durant la campagne sucrière 2003.

La Figure 90 illustre les différentes évolutions observables lors du cycle cultural de la canne à sucre à La Réunion. Les photographies, placées sous les graphiques permettent de se rendre compte de la relation existant entre l'état du couvert et sa réponse radiométrique. Les traits en pointillés sur les courbes d'évolution des réflectances indiquent le moment de la coupe.

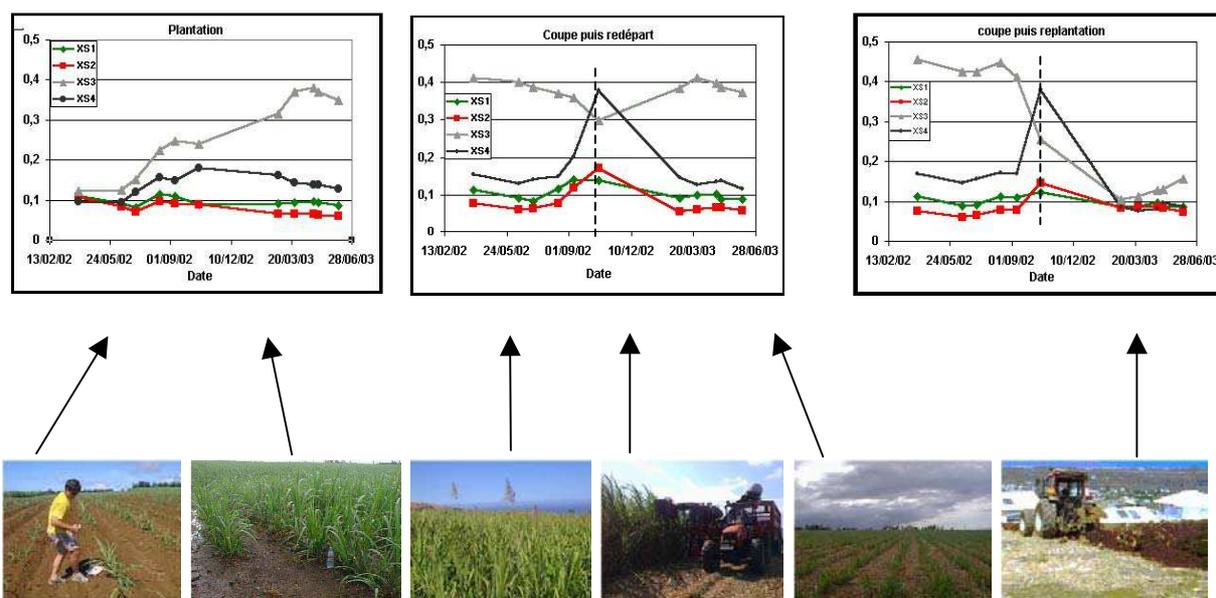


Figure 90. Evolution du signal radiométrique SPOT lors d'une plantation, d'une coupe et d'une reprise après coupe.

4.1.1 Développement méthodologique du suivi des coupes

Il est nécessaire dans un premier temps de faire une analyse comparative des différentes signatures spectrales correspondant aux états « non coupé » et « coupé, présence de paillis », afin d'identifier les bandes spectrales les plus sensibles à ces changements. Dans un deuxième temps, une analyse de l'évolution temporelle de la radiométrie permettra de choisir les dates ainsi que la fréquence d'acquisition des images afin de suivre la coupe de la canne durant les six mois de la campagne. La fréquence d'acquisition des images sera également adaptée en fonction des besoins des acteurs de la filière canne, en terme de suivi des coupes.

Enfin, il faudra développer deux méthodes permettant le suivi des coupes, avec et sans le parcellaire cannier :

- L'utilisation du parcellaire cannier permet d'appliquer le traitement d'image uniquement à la canne, sans trop de risque de confusion spectrale avec d'autres cultures.
- Sans parcellaire cannier, le traitement d'image va être appliqué à l'intégralité de l'île. Il doit toutefois permettre l'extraction de l'information (coupée ou non coupée) uniquement sur les surfaces plantées en canne.

4.1.1.1 Caractérisation spectrale de la coupe de la canne

Après la coupe, le paillis sur le sol est présent en grande quantité. Cependant, lors de la replantation, une troisième signature spectrale peut être observée, celle du sol nu. En effet, lors de replantation, la parcelle est labourée afin de pouvoir être replantée après la coupe.

Ces trois signatures spectrales sont différentes et caractéristiques. Elles sont présentées dans la Figure 53 (page 100). On remarque qu'il est possible sur une même image de faire la différence, grâce aux signatures spectrales, entre une parcelle de canne non coupée (couvert fermé), coupée (recouverte de paillis) et labourée (sol nu). Toutefois, des confusions spectrales peuvent apparaître. En effet, la signature spectrale d'une parcelle de canne non coupée peut être confondue avec un autre type de culture, comme par exemple le maraîchage, la forêt ou encore les jardins privés. De plus, une autre confusion peut apparaître entre une parcelle de canne coupée puis labourée et un sol nu fraîchement travaillé destiné à l'implantation d'un lotissement par exemple.

1. Une première méthode de classification multispectrale permet d'identifier ces trois états, à partir du moment où l'on dispose du parcellaire cannier, afin d'effectuer la classification uniquement à l'intérieur des parcelles de canne. Cela permet d'éviter toute confusion avec un autre type de surface pouvant avoir les mêmes caractéristiques spectrales.
2. On peut suivre également l'évolution des réflectances dans chaque bande spectrale à différentes dates, correspondant à « avant la coupe » et « après la coupe ».

La Figure 91 présente l'évolution temporelle des réflectances SPOT 4&5 de trois parcelles de canne passant de l'état « non coupé » à l'état « coupé » entre les dates du 12/06/02 au 14/08/02.

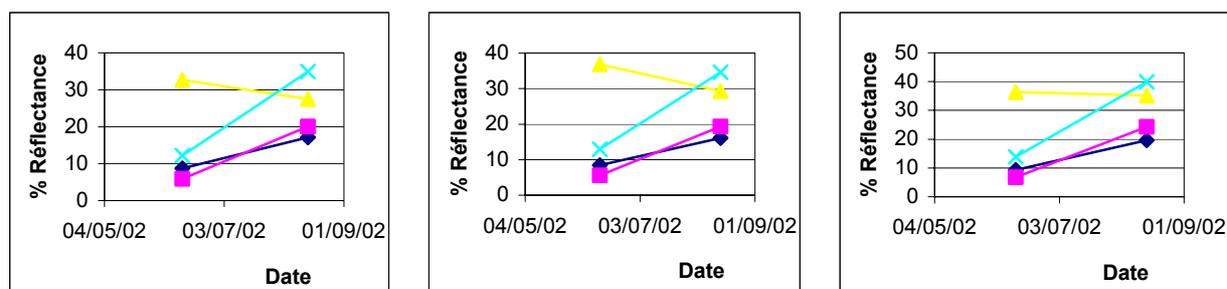


Figure 91. Evolution temporelle des réflectances SPOT 4&5 de trois parcelles de canne avant et après la coupe avec losange XS1, carré XS2, triangle XS3 et croix XS4, la coupe est en date du 15/08/02.

Il existe une différence significative dans la réponse spectrale de ces deux états. Il est donc possible d'identifier ce changement d'état du couvert. On remarque en particulier que les plus grandes différences de réflectance entre « non-coupé » et « coupé » sont observées pour les longueurs d'ondes du moyen infrarouge, canal XS4 (moyen infrarouge) de SPOT 4&5. En effet, en calculant la différence de valeur des réflectances entre « avant » et « après » la coupe pour chaque bande, on peut ainsi estimer la sensibilité de chaque bande à ce changement d'état. Les résultats sont présentés dans le Tableau 21.

Tableau 21. Sensibilité de la réflectance des bandes SPOT 4&5 au changement d'état d'une parcelle entre « non coupé » et « coupé ».

	XS1	XS2	XS3	XS4		XS1	XS2	XS3	XS4		XS1	XS2	XS3	XS4
12/06/02	8,70	5,84	32,65	12,21	12/06/02	8,41	5,61	36,90	12,94	12/06/02	9,30	6,77	36,38	13,86
14/08/02	17,12	20,05	27,51	34,91	14/08/02	16,10	19,31	29,31	34,57	14/08/02	19,61	24,26	35,20	39,95
différence	8,42	14,22	-5,15	22,71	différence	7,69	13,70	-7,59	21,63	différence	10,31	17,49	-1,18	26,09

Ces résultats nous indiquent qu'il est possible d'identifier les parcelles de canne coupées entre deux dates en utilisant la différence dans la bande du moyen infrarouge des deux images.

Cette méthodologie fait appel à des notions de détection des changements entre deux dates. L'avantage de cette méthode par rapport à la classification multispectrale est de pouvoir localiser les parcelles de canne coupées sans avoir besoin de parcellaire cannier pour limiter le traitement à l'intérieur des parcelles. En effet, l'augmentation dans le moyen infrarouge de la réflectance due à la coupe reste un phénomène caractéristique et unique à ce changement d'état. De ce fait, le processus peut identifier des zones comme coupées en dehors du parcellaire cannier, ce qui peut constituer un outil d'aide à la mise à jour du parcellaire cannier.

4.1.1.2 *Suivi des coupes par détection des changements dans le MIR*

Cette méthode se base sur la différence des réponses spectrales dans le moyen infrarouge (MIR, XS4) pour une parcelle de canne passant d'un état « non coupé » à « coupé ». Comme nous l'avons vu précédemment, la réflectance dans le moyen infrarouge augmente lorsque la parcelle passe de pleine végétation à coupée et recouverte de paillis. Nous proposons donc de faire la différence des images dans le MIR. L'image « avant » sera datée antérieurement au début de la coupe et l'image « après » à la date à laquelle on désire avoir un point sur l'état d'avancement de la coupe (Figure 92). Le résultat de cette première étape sera une image de différence pixel à pixel dans le moyen infrarouge (Figure 93).

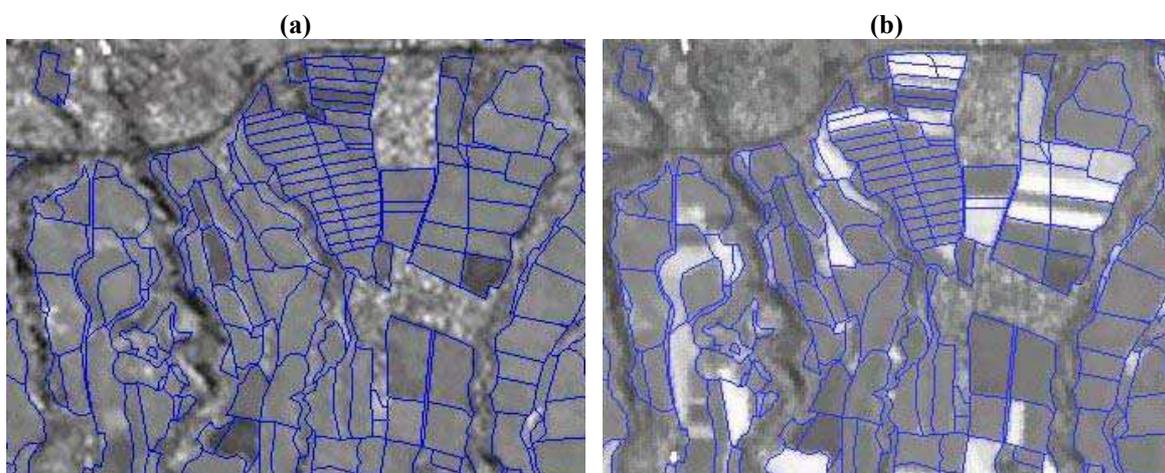


Figure 92. Couche MIR avant coupe en date du 17/06/03 (a) et Couche MIR après coupe en date du 21/08/03 (b).

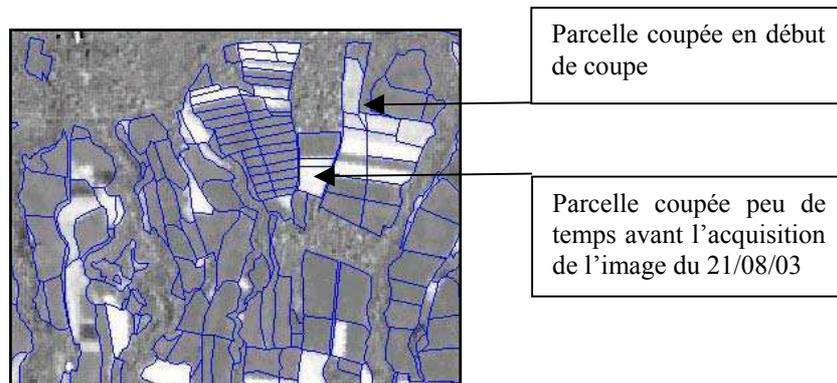


Figure 93. Image de différence pixel à pixel des couches MIR entre avant et après la coupe.

La deuxième étape consiste à déterminer à partir de quel seuil de différence (pourcentage d'augmentation du moyen infrarouge entre avant et après la coupe) on considère la parcelle comme « coupée ». Ce seuil est fonction de la valeur de différence de réflectance dans le MIR du paillis le plus dégradé présent sur l'image, soit les parcelles qui ont été coupées en premier. De cette façon, on est assuré d'identifier les parcelles de canne coupées entre les deux dates.

L'image SPOT 5 du 21/08/03 (Figure 92) est utilisée pour déterminer le seuil de différence à partir duquel on va considérer la parcelle comme coupée. On se base sur les parcelles qui ont été coupées en premier lors de la campagne. Ces parcelles ont les valeurs de différence dans le moyen infrarouge les plus faibles (voir Figure 93). Dans ce cas, nous avons un seuil de différence aux alentours de 35%, soit une valeur de réflectance dans le MIR augmentant de 35% entre avant et après la coupe, pour les parcelles coupées en premier.

La dernière étape, consiste à ne conserver que les pixels de l'image de différence dont la valeur a augmenté d'au moins 35%. Ce résultat est présenté en (Figure 94).

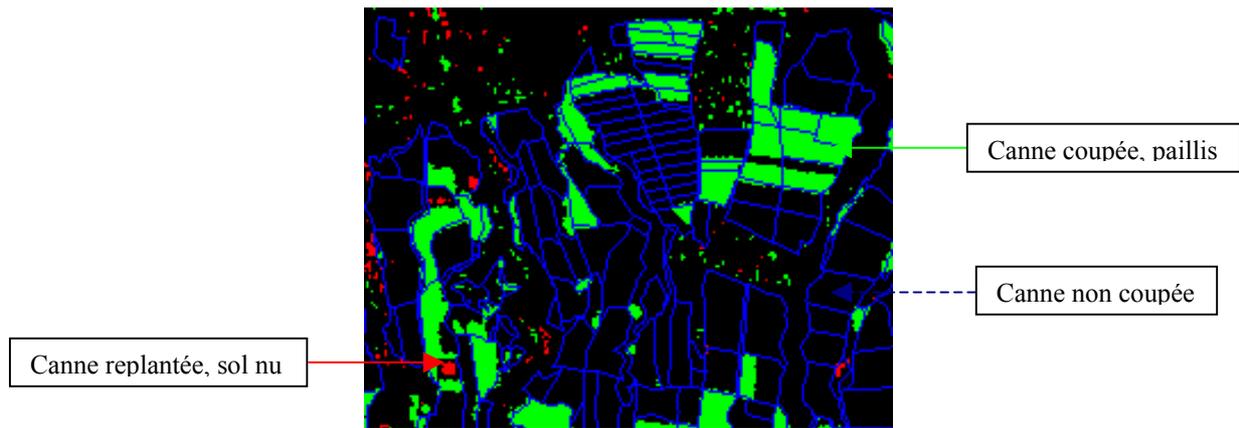


Figure 94. Seuil de 35% de l'image de différence, en vert pixel « canne coupée, paillis », en rouge « canne replantée, sol nu » et en noir « canne non récoltée, couvert fermé ».

Cette méthodologie est réalisable à l'aide de ERDAS Image 8.5 avec le module *change detection*. Ce logiciel permet de localiser les pixels ayant augmenté de valeur radiométrique dans le moyen infrarouge (cas des parcelles coupées en vert) mais également les pixels ayant diminué de valeur radiométrique dans le moyen infrarouge entre les deux dates (cas des parcelles replantées, en rouge). On y a superposé le parcellaire cannier afin de mettre en évidence le fait que le seuillage de l'image de différence permet de travailler quasiment uniquement à l'intérieur du parcellaire cannier. Cette méthode permet également de mettre à jour le parcellaire cannier par détection de zones coupées en dehors du parcellaire cannier. Par contre, on est limité par la nébulosité présente sur les deux images.

4.1.1.3 Suivi des coupes par classification multispectrale

Pour cette méthode, nous effectuons une classification non supervisée en un grand nombre de classes (de 10 à 20). On procède ensuite visuellement par PIAO¹⁰ à des regroupements afin d'obtenir trois classes : « coupée, le paillis », « non coupée, couvert fermé » et « sol nu, labourée ». Cette opération s'effectue également avec ERDAS Imagine. Nous allons expliciter la méthode sur une partie de l'image du 14/10/2003 (Figure 95).

¹⁰ PIAO : Photo Interprétation Assistée par Ordinateur

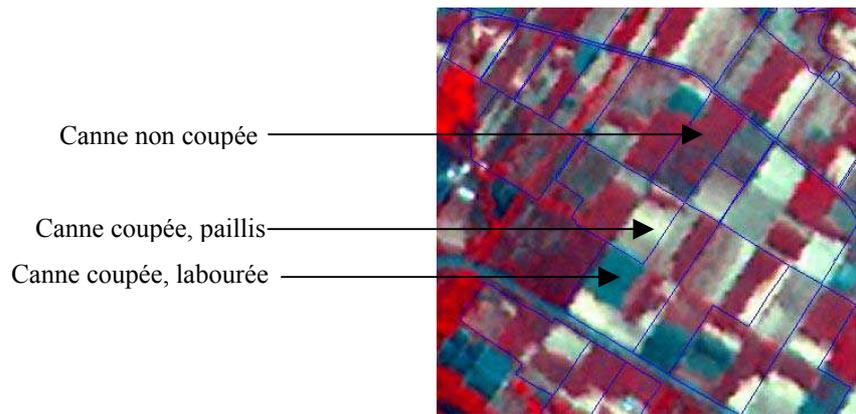


Figure 95. Composition colorée en fausses couleurs du 14/10/03 avec en rouge La canne non coupée, en blanc la canne coupée et en vert les parcelles de canne coupée puis labourée pour replantation, le sol nu.

Le résultat de la classification non supervisée en dix classes est présenté en Figure 96a. L'étape suivante consiste à regrouper les classes de manière à obtenir trois catégories, « coupée, le paillis », « non coupée, couvert fermé » et « sol nu, labourée » (Figure 96b).

Dans l'objectif de suivre les coupes de canne, il faut rassembler les classes « sol nu, labouré » et « canne coupée, paillis » pour calculer les statistiques des surfaces de canne coupée et non coupée par parcelle.

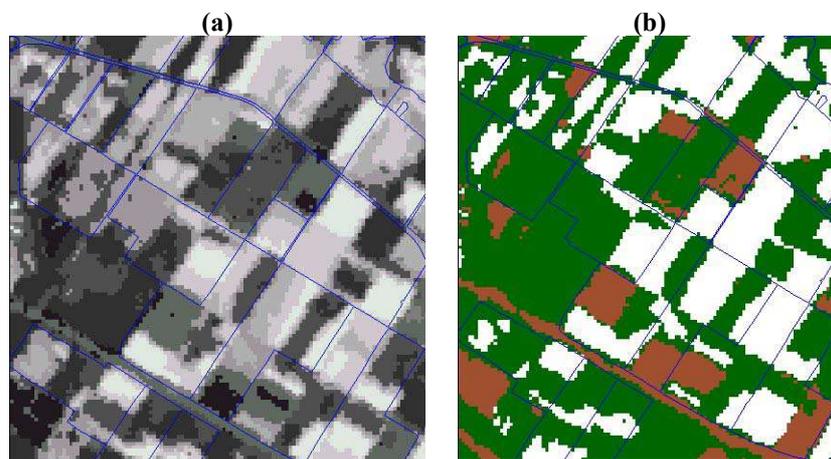


Figure 96. Classification non supervisée (a) et regroupement en trois classes (b), en vert canne non coupée (couvert fermé), en blanc canne coupée (paillis) et en marron les parcelles de canne coupées puis labourées pour replantation, le sol nu.

Les contraintes de cette méthode sont que le parcellaire cannier est nécessaire et que si le délai entre deux images est important, on peut confondre une repousse avec une parcelle de canne non coupée.

Les deux méthodes permettent d'une part de localiser les surfaces de canne à sucre coupées et d'autre part d'identifier les surfaces de canne en replantation.

4.1.2 Application au suivi de la campagne de coupe 2003, île de La Réunion

La campagne sucrière 2003 à La Réunion a commencé fin juin pour finir mi-décembre. Pour suivre l'évolution du taux d'avancement de la coupe, nous avons utilisé quatre images SPOT. La Figure 97 présente le calendrier d'acquisition des images SPOT.

	1-juin-03	1-juil-03	1-août-03	1-sept-03	1-oct-03	1-nov-03	1-déc-03	1-janv-04
Campagne sucrière								
Date image	17/06/03		21/08/03		14/10/03	20/11/03		
Capteur	Spot 4		Spot 5		Spot 4	Spot 4		

Figure 97. Calendrier d'acquisition des images Spot pour le suivi des coupes de la campagne sucrière 2003 à La Réunion.

4.1.2.1 *Estimation du taux d'avancement de la coupe à partir de la différence des couches MIR*

La différence des images dans le moyen infrarouge (image avant la coupe et image à la date souhaitée) pour estimer le taux d'avancement de la coupe a été utilisée pour le premier suivi des coupes en temps quasi réel à la date du 21/08/03. L'image choisie comme image « avant coupe » est en date du 17/06/03 (Figure 98a).

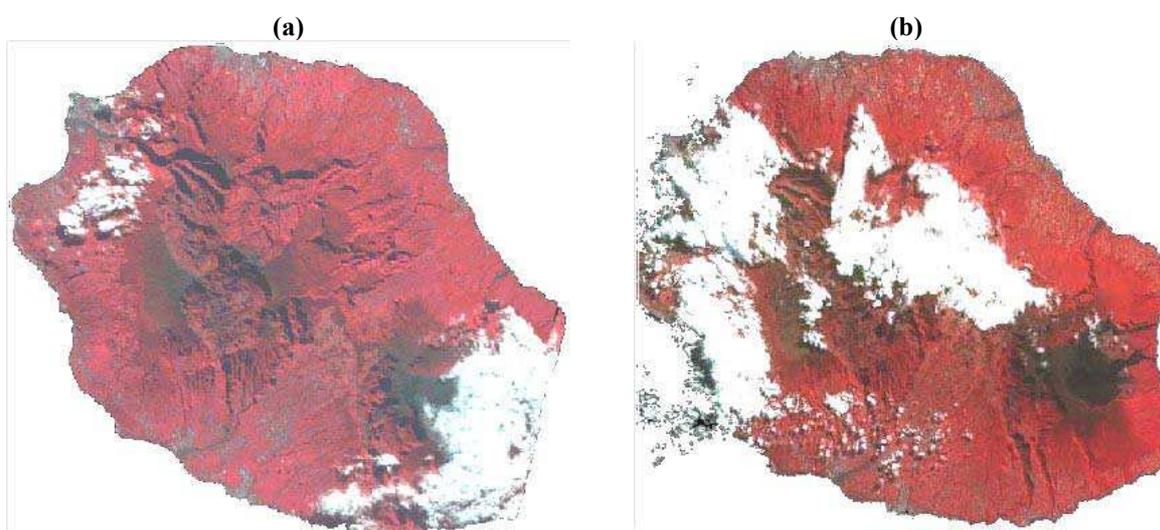


Figure 98. Composition colorée en fausses couleurs, images SPOT du 17/06/03 « avant coupe » (a) et du 21/08/03 « après coupe » (b).

Cette méthode nécessite deux images. Cela comporte certains avantages comme de pouvoir identifier à partir d'un même traitement d'image les parcelles de canne coupées et les parcelles de canne labourées. L'inconvénient majeur de cette méthode est justement d'utiliser deux images donc de cumuler les surfaces non dégagées de nuages (facteur très limitant quand on connaît les conditions atmosphériques de La Réunion). Malgré le passage des satellites SPOT 4&5 vers 10h30 du matin heure locale, la couverture nuageuse reste le problème majeur. La zone réellement exploitable par cette méthode est représentée par le parcellaire cannier (Figure 99).

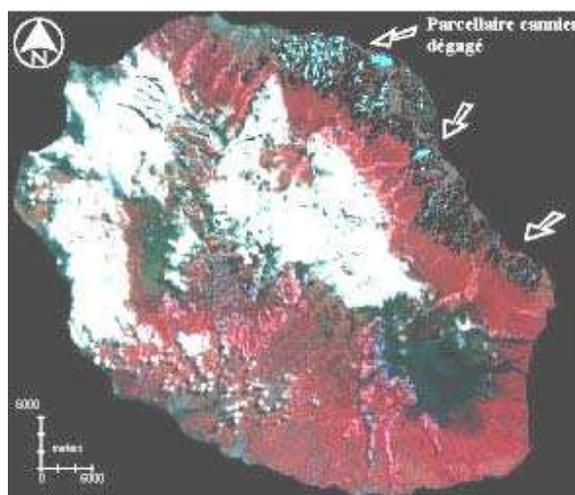


Figure 99. Sole cannière traitée pour le suivi des coupes à la date du 21/08/03.

Les surfaces traitées et les centres de livraison (balances) concernées pour ce premier suivi des coupes sont décrits dans le Tableau 22.

Tableau 22. Surfaces totales en canne et surfaces effectivement traitées par balances lors du suivi des coupes à la date du 21/08/03.

Balances	Surface totale (ha)	Surface traitée (ha)	Surface échantillon
La Mare	576	505	88%
Bois Rouge	5131	4965	97%
Pente Sassy	1845	1747	95%
Beaufonds	3343	3343	100%
Ravine glissante	1517	1051	69%
Total	12412	11611	94%

La couverture nuageuse présente sur les images nous permet de traiter 11 611 ha. Si l'on considère la surface cannière totale de l'île égale à 26 950 ha (D.A.F., 2003), la surface traitée

représente 44% de la surface totale en canne. On remarque également (Tableau 22) que les balances concernées sont relativement bien représentées, la surface minimale dégagée étant de 69% pour Ravine Glissante.

L'image de différence des couches du moyen infrarouge est utilisée par le système d'information géographique (SIG) constitué de la couche vecteur « sole cannière » extraite de la base de données parcellaire de la D.A.F.. Cette couche vecteur ne délimite pas les parcelles agronomiques (même variété, même itinéraire technique) mais des îlots d'exploitations. Un polygone de la couche vecteur D.A.F. délimite l'exploitation de l'agriculteur, constituant un îlot (Figure 11, p. 37). Bien que le parcellaire cannier ne soit pas nécessaire pour appliquer la méthode par différence dans le MIR, celui-ci est utilisé, via le SIG, pour compter le nombre de pixels qui sont passés de l'état « canne non coupée, couvert fermé » à l'état « canne coupée, paillis ».

Voici les résultats que nous avons obtenus en terme d'avancement de la coupe par balance à la date du 21/08/03 (Tableau 23).

Tableau 23. Taux d'avancement de la coupe par balance estimé par télédétection au 21/08/03 par la méthode de différence dans le MIR.

Balances	Taux d'avancement de la coupe
La Mare	25%
Bois Rouge	30%
Pente Sassy	41%
Beaufonds	41%
Ravine glissante	43%
Moyenne	36%

Pour ce suivi des coupes, nous avons également édité une carte des coupes illustrant la localisation des parcelles de canne coupées et non coupées. Un extrait de la carte des coupes est disponible ci-dessous (Figure 100).



Figure 100. Carte des coupes de la zone nord-est de l'île de La Réunion éditée à partir de l'image Spot 5 du 21/08/03, la classe « incertain » correspondant aux parcelles en cours de coupe.

4.1.2.2 Estimation du taux d'avancement de la coupe par classification multispectrale

La méthode d'estimation du taux d'avancement de la coupe par classification multispectrale a été utilisée pour le suivi des coupes aux dates du 14/10/03 et du 20/11/03. Contrairement à la méthode de différence dans le MIR, cette méthode ne nécessite que le parcellaire cannier et l'image à la date où l'on veut estimer l'avancement de la coupe. Pour ce faire, nous avons utilisé le parcellaire cannier de la D.A.F.. La Figure 101 présente les zones traitées lors de ces deux suivis des coupes.

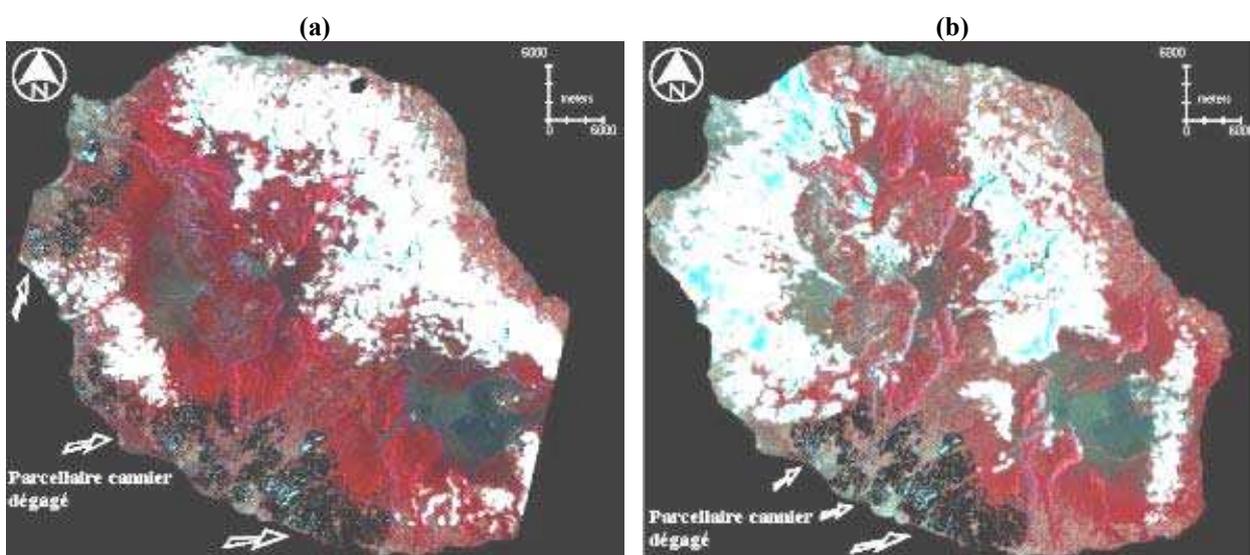


Figure 101. Parcellaire cannier dégagé au 14/10/03 (a) et au 20/11/03 (b).

Le Tableau 24 présente les caractéristiques des centres de livraison (balances) traitées lors du suivi des coupes à la date du 14/10/03 ainsi que les taux d'avancement obtenus.

Tableau 24. Résultats obtenus pour le suivi de la campagne de coupe, par centre de livraison en date du 14/10/03.

Balances	Surface totale (ha)	Surface traitée (ha)	Surface échantillon	Taux d'avancement
Vue Belle	1387	743	54%	67%
Savannah	1082	1043	96%	53%
Stella	1451	652	45%	73%
Pierrefonds	722	714	99%	67%
Grand-Bois	2281	2072	91%	62%
Gol	2055	1984	97%	64%
Casernes	3569	3503	98%	61%
Langevin	1020	738	72%	64%
Total	13568	11449	84%	
			Moyenne	64%

Pour ce suivi, nous avons classé les pixels de l'image en trois classes, comme décrit précédemment. L'analyse faite par le système d'information géographique consiste à compter au sein de chaque polygone le nombre de pixels de la classe « canne coupée, paillis ». Le ratio est ensuite fait avec la surface du polygone dont on a extrait l'aire correspondant à la classe « sol nu » pour obtenir le taux d'avancement de la coupe.

Concernant le suivi des coupes fait le 20/11/03, la surface traitée représente 29% de la sole cannière réunionnaise. Cependant, le bassin cannier concerné, alimentant l'usine Du Gol dans l'ouest de l'île, finit la campagne de coupe plus tard que le bassin cannier de Bois Rouge dans l'est de l'île. La surface suivie peut donc être ramenée à la surface du bassin cannier du Sud uniquement. Le suivi devient donc plus pertinent en terme de surface traitée.

De plus, les centres de livraison sont bien représentés, au minimum 69% de la surface des balances a été traité. Les résultats sont présentés ci dessous (Tableau 25).

Tableau 25. Résultats obtenus lors du suivi des coupes à la date du 20/11/03.

	Surface totale (ha)	Surface traitée (ha)	Surface échantillon	Taux d'avancement
Balances				
Pierrefonds	722	720	100%	90%
Grand-Bois	2281	2107	92%	70%
Gol	2055	1416	69%	85%
Casernes	3569	3565	100%	82%
Total	8627	7808	91%	
			Moyenne	82%

En fin de campagne, la méthode de classification est toujours la même. On peut même incrémenter le suivi d'une image à l'autre. Les surfaces détectées à l'image comme « coupées, paillis » au temps T ne seront pas traitées sur l'image au temps T+1 mois. Pour le suivi du 20/11/03, nous avons classifié l'image puis compté les pixels de la classe « canne non coupée, couvert fermé ». Le taux d'avancement est obtenu en faisant la différence de la surface totale avec cette surface « canne non coupée », puis on divise le tout par la surface totale et cela pour chaque polygone.

Quelle que soit la méthode de suivi des coupes, les résultats doivent être disponibles rapidement après la date d'acquisition de l'image. Cette condition peut amener le suivi des coupes à partir d'images satellite à devenir un outil d'aide à la gestion de l'approvisionnement des usines grâce aux statistiques d'avancement par centre de livraison (balance). On peut également envisager les résultats comme des indicateurs pour déterminer la date de fin de la campagne sucrière et de fermeture de l'usine.

Pour cela, il est nécessaire de connaître la marge d'erreur sur l'estimation de l'avancement de la coupe induite par la méthode que l'on utilise. Les résultats des trois suivis mis en place durant la campagne 2003 ont été validés et sont présentés dans la section suivante. Une comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes, sur le même jeu de données, a été faite pour le suivi en date du 21/08/03.

4.1.3 Validation des produits cartographiques et statistiques

Il est nécessaire de valider les produits du suivi des coupes afin d'évaluer la pertinence des résultats.

4.1.3.1 Validation du produit cartographique à partir d'observations de terrain

La validation de la carte des coupes s'effectue sous ERDAS Imagine. La méthode consiste à distribuer de manière aléatoire un certain nombre de points (dans notre cas, nous avons utilisé 82 points de contrôle sur la carte, Figure 102). Ces points sont distribués par le logiciel lui-même de manière aléatoire.

La deuxième étape consiste à vérifier sur le terrain l'état réel des parcelles de canne localisées par chaque point, à savoir « canne coupée, paillis » ou « canne non coupée, couvert fermé ». La dernière étape consiste à renseigner le logiciel sur l'état relevé sur le terrain de chaque point afin qu'il le compare à la situation donnée par la carte. Il en résulte une valeur statistique « *Overall Classification Accuracy* » (OCA) soit la précision globale de la classification ou encore, l'accord entre des jugements catégoriels appliqués aux mêmes objets.

On considère généralement la valeur OCA comme l'indicateur de fiabilité de la localisation de la classe choisie, dans notre cas « canne coupée, paillis ». Plus la valeur OCA est proche de 100%, plus la classe considérée est bien localisée sur la carte. Les résultats de la validation sont présentés ci-dessous (Tableau 26).

Tableau 26. Résultats obtenus pour la validation de la carte des coupes éditée à partir de l'image du 21/08/03 en utilisant la méthode de classification multispectrale.

Classes	Références	Classifiées	Correctement classifiées
Non coupée	15	14	14
coupée	67	68	67
Totals	82	82	81

Overall Classification Accuracy = 98.78%

La valeur de OCA obtenue pour la carte des coupes du 21/08/03 est égale à 98,78%, certifiant que ce même pourcentage de canne coupée est bien localisée sur la carte, résultat qui est très satisfaisant.

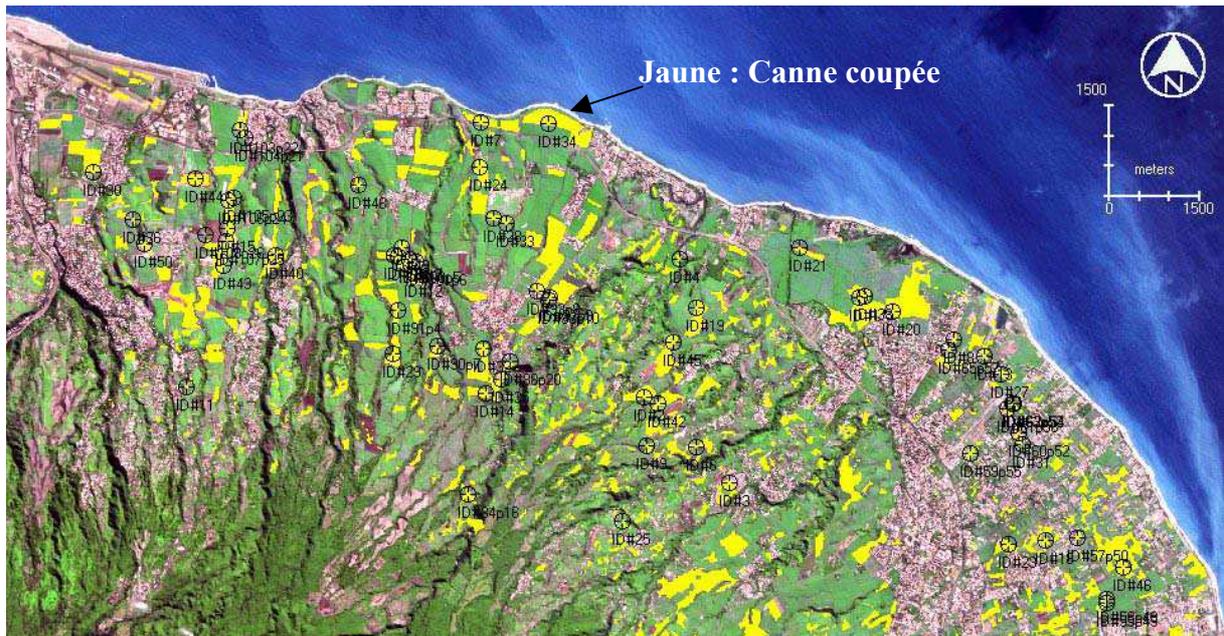


Figure 102. Localisation des 82 points de contrôles utilisés pour la validation des cartes de coupe.

Les résultats de la validation des cartes des coupes sont prometteurs. Les méthodes développées permettent une estimation précise des surfaces coupées et non coupées en temps quasi réel à partir de traitement d'image SPOT 4&5. Nous proposons maintenant de faire une analyse comparative des résultats obtenus à partir des deux méthodes : par classification multispectrale et par différence dans le moyen infrarouge.

4.1.3.2 Comparaison des produits statistiques

On peut comparer les taux d'avancement estimés par télédétection avec les données fournies par le CTICS aux dates correspondant aux suivis des coupes. Une fois la campagne sucrière terminée, il est possible de connaître le tonnage total cumulé par centre de livraison (balance). On peut donc avoir l'avancement de la coupe par balance par rapport aux tonnages réceptionnés aux dates des suivis. Chaque suivi des coupes est validé en calculant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) existant entre les taux d'avancement du CTICS et les taux d'avancement estimés par télédétection.

Les deux méthodes ont été comparées à cette estimation du taux d'avancement CTICS. Les taux d'avancement de chaque méthode (différence MIR et classification multispectrale) sont comparés au taux d'avancement CTICS (Tableau 27).

Tableau 27. Comparaison de l'erreur obtenue entre la méthode de classification multispectrale et la méthode de différence dans la MIR à partir de l'image du 21/08/03.

CENTRES CUMULES	Tonnage final	Tonnage 21/08/03	TX d'avancement CTICS	TX d'avancement classification	TX d'avancement Dif MIR
Beaufonds	213147,66	83299,26	39%	40%	41%
Ravine Glissante	98470,28	39273,28	40%	43%	43%
Pente Sassy	128972,54	46448,44	36%	30%	41%
Bois Rouge	375488,90	131724,36	35%	29%	30%
La Mare	32855,40	11333,66	34%	30%	25%
Savanna	54040,58	13151,80	24%	34%	36%
		Moyenne	35%	34%	36%
		RMSE		4,6%	5,5%

La comparaison des erreurs quadratiques moyennes montre que les résultats obtenus par la méthode de classification multispectrale sont meilleurs que ceux obtenus avec la méthode de différence dans le moyen infrarouge mais les deux méthodes restent acceptables.

De plus, on constate que les deux méthodes entraînent une erreur relativement faible, comprise entre 4,6% et 5,5% (exprimée en taux d'avancement). Cela signifie que pour la méthode de classification multispectrale par exemple, le taux d'avancement est estimé avec une erreur de plus ou moins 4,6% à l'échelle du centre de livraison. On peut constater qu'en moyenne, toutes balances confondues, l'erreur sur l'estimation du taux d'avancement est de plus ou moins 1%, quelle que soit la méthode utilisée. On remarque que l'erreur sur l'estimation des taux d'avancements de la coupe dépend de l'échelle d'observation.

Les résultats obtenus pour le suivi des coupes du 14/10/03 sont présentés dans le Tableau 28.

Tableau 28. Comparaison des résultats obtenus lors du suivi des coupes du 14/10/03 par la méthode de classification multispectrale avec les données CTICS.

CENTRES CUMULES	Tonnage final	Tonnage 14/10/03	TX d'avancement CTICS	TX d'avancement classification
Savanna	54040,58	34484,26	64%	53%
Vue Belle	83289,34	50379,59	60%	67%
Stella Matutina	86335,76	53711,42	62%	73%
Le Gol	164918,42	102022,46	62%	64%
Pierrefonds	59220,16	38516	65%	67%
Casernes	273749,61	170126,13	62%	61%
Grands Bois	194832,80	115134,90	59%	62%
Langevin	150965,66	96791,18	64%	64%
		Moyenne	62%	64%
		RMSE		6,1%

L'erreur la plus importante se porte sur l'estimation du taux d'avancement pour le centre de livraison « Stella Matutina ». La RMSE est égale à 6,1% pour le suivi du 14/10/03. Elle est supérieure à celle obtenue pour le suivi du 21/08/03. L'augmentation de cette erreur est probablement due au fait qu'une ambiguïté spectrale apparaît entre certaines classes. En effet, les parcelles de canne coupées en début de campagne peuvent être confondues avec des parcelles de canne non coupées en raison du re-départ de la culture. Il est donc intéressant, quand cela est possible, de cumuler les cartes de coupe lors du traitement des images de manière à enlever systématiquement les parcelles détectées comme coupées à la date précédente. Etant donné qu'aucun suivi des coupes n'a été fait sur cette zone entre le début de la campagne et le 14/10/03, il ne nous a pas été possible d'utiliser la carte des coupes précédente pour masquer l'image avant le traitement.

Toutefois, en moyenne sur toutes les balances traitées, l'erreur est de plus ou moins 2%. La validation des résultats obtenus pour le suivi des coupes du 21/11/03 est présentée dans le Tableau 29.

Tableau 29. Synthèse des résultats obtenus pour la comparaison du suivi des coupes à la date du 20/11/03 par de classification multispectrale avec les données du CTICS.

CENTRES CUMULES	Tonnage final	Tonnage 21/11/03	TX d'avancement CTICS	TX d'avancement classification
Le Gol	164918,42	142377,74	86%	85%
Pierrefonds	59220,16	52435,26	89%	90%
Casernes	273749,61	238529,04	87%	82%
Grands Bois	194832,80	165843,61	85%	70%
		Moyenne	87%	82%
		RMSE		8,0%

La RMSE obtenue pour ce suivi est la plus importante des trois suivis (Tableau 29). En fin de coupe, les confusions entre classes sont plus importantes qu'en début de coupe, principalement en raison du re-départ de la culture. De plus, les données fournies par le CTICS sont datées du 21/11/03, soit un jour après la date d'acquisition de l'image SPOT utilisée pour le suivi. Ceci entraîne certainement une erreur, cependant il n'y a qu'un jour d'écart, mais cette erreur tend à augmenter la différence entre les taux du CTICS et les taux d'avancement estimés par télédétection.

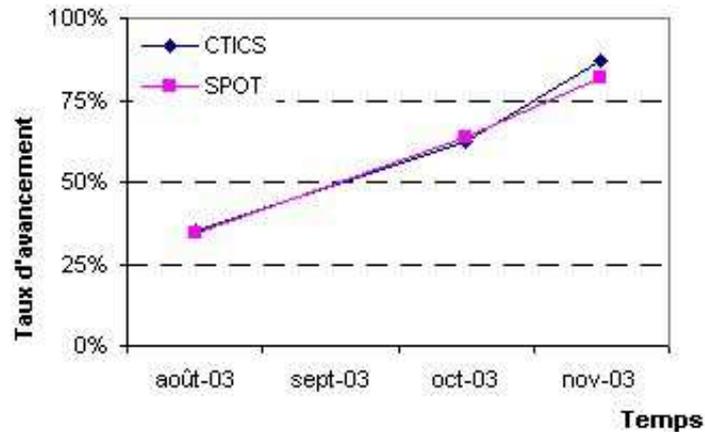


Figure 103. Evolution du taux d'avancement de la coupe calculé à partir des données CTICS et estimé par télédétection, campagne sucrière 2003, La Réunion.

En faisant l'hypothèse que les surfaces traitées lors de chacun des suivis sont représentatives du reste de l'île, on peut en déduire l'évolution du taux d'avancement de la coupe au cours de la campagne (Figure 103). Le taux d'avancement CTICS a pu être calculé à posteriori. En effet, il faut connaître le tonnage final réceptionné pour calculer le taux d'avancement CTICS. L'avantage du taux d'avancement estimé par télédétection, à partir d'image SPOT 4&5, est de pouvoir être connu en temps quasi réel. Son utilisation opérationnelle est possible.

4.1.4 Estimation des surfaces replantées

Comme nous l'avons vu précédemment (Figure 95 et Figure 96), il est possible d'identifier et de quantifier en terme de surface les zones en sol nu correspondant à des parcelles de canne labourées. On peut donc éditer des cartes de replantation à partir d'images satellites SPOT 4&5. Ce produit cartographique permet d'une part, de localiser les parcelles de canne qui ont été labourées et d'autre part d'éditer des statistiques de surface labourée par planteur.

La méthodologie est semblable à celle du suivi des coupes : classification multispectrale de la sole cannière puis regroupement de manière à obtenir la classe étudiée. Dans le cas du suivi des coupes, la classe correspondait au « paillis » alors que dans le cas du suivi des replantations la classe observée est « sol nu ». Ensuite, on utilise le parcellaire cannier de la D.A.F. (îlots exploitants) pour effectuer une analyse statistique à l'échelle de chaque polygone. Les résultats sont regroupés par planteur afin d'obtenir la surface labourée (replantée) pour chaque planteur. On a appliqué cette méthode avec une image SPOT 5 du 13/05/04 pour éditer une carte de replantation de la zone nord-est de l'île.

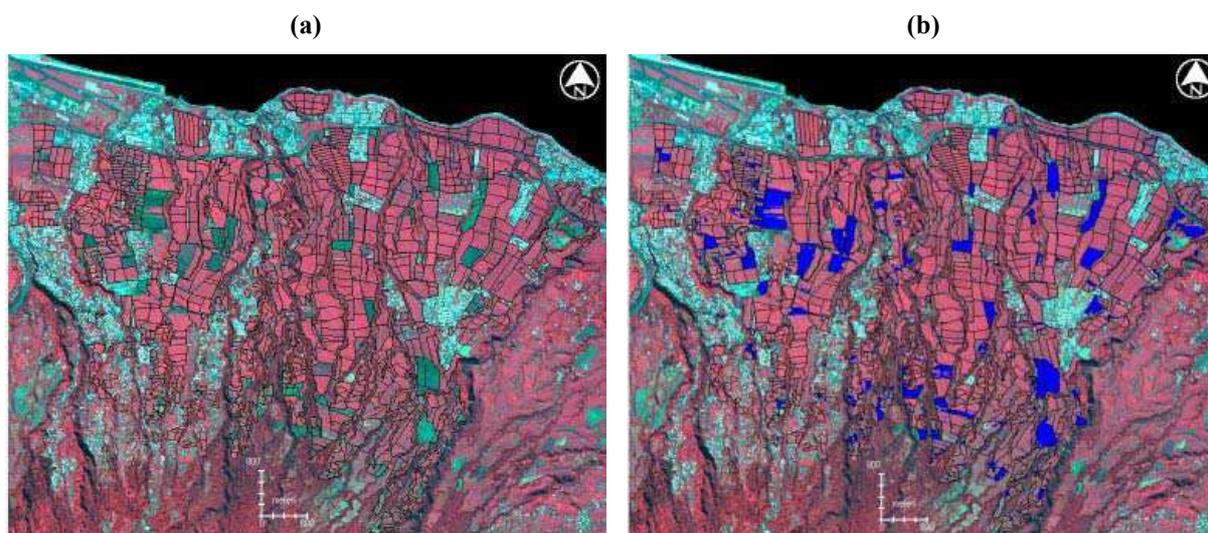


Figure 104. Image Spot 5 du 13/05/04 en composition colorée fausses couleurs (a) et carte des replantations (b) ; les pixels bleus sont identifiés comme « sol nu » au sein de la sole cannière.

A partir de l'image (Figure 104 b) issue de la classification multispectrale, on peut restituer les résultats pour les planteurs dont la surface replantée est supérieure à une certaine valeur, cinq hectares par exemple.

Tableau 30. Surfaces identifiées comme replantées supérieures à 5 ha à la date du 13/05/04 par planteur.

N PLANTEUR	SURFACE (ha)	Replantation (ha)	Taux de replantation
16376	51,17	5,55	11%
1012	95,45	7,18	8%
16375	49,70	8,19	16%
14534	105,21	9,78	9%
2065	42,71	10,58	25%
1005	169,67	14,34	8%
9034	191,95	15,19	8%
2421	152,63	16,91	11%
1016	137,84	21,14	15%
16435	61,44	23,48	38%
1003	191,97	25,60	13%
9003	243,00	28,86	12%
9690	244,57	40,21	16%
9136	342,70	67,14	20%
Total	2080,01	294,15	14%

Il est ainsi possible de localiser et d'estimer les surfaces replantées. Cette méthode peut être utilisée en multitemporel afin d'obtenir l'intégralité des replantations effectuées durant l'année. En effet, dans notre exemple, nous avons choisi une image du 13 mai 2004 qui

correspond à la fin de la période de plantation. Des replantations peuvent avoir lieu après la coupe (de novembre à mars) ; pour cette raison, plusieurs suivis des replantations sont nécessaires pour obtenir l'intégralité des surfaces replantées par année.

On estime le nombre d'image nécessaire au suivi des replantations à trois : une image en fin de période de replantation (avril, mai), une image en fin de campagne de récolte (novembre, décembre) et une image au milieu de la période de replantation (février).

Cartes thématiques descriptifs de l'état du couvert

Cette partie se divise en trois, traitant dans un premier temps du suivi et de la cartographie des paramètres descriptifs de l'état du couvert à partir des données multispectrale, puis des données hyperspectrales pour enfin aborder la cartographie de la variabilité inter-parcellaire.

4.1.5 Suivi multitemporel et cartographie multispectrale des paramètres

Pour illustrer le suivi et la cartographie des paramètres descriptifs de l'état du couvert de la canne nous traiterons de la surface foliaire et de la biomasse. Les cartes de surface foliaire et de biomasse fraîche (rendement canne) sont établies à partir d'image SPOT 4&5. Nous verrons dans un premier temps qu'il est possible de cartographier la surface foliaire à une date précise mais également de suivre son évolution au cours du développement de la canne. Nous aborderons, dans un deuxième temps, la cartographie des rendements canne potentiels à partir d'images SPOT 4&5.

4.1.5.1 Cartographie de la surface foliaire

Nous avons déterminé la relation qui permet d'exprimer le LAI en fonction du NDVI SPOT 4&5 (Equation 1, p. 120), nous pouvons donc établir des cartes de la surface foliaire et suivre son évolution dans le temps.

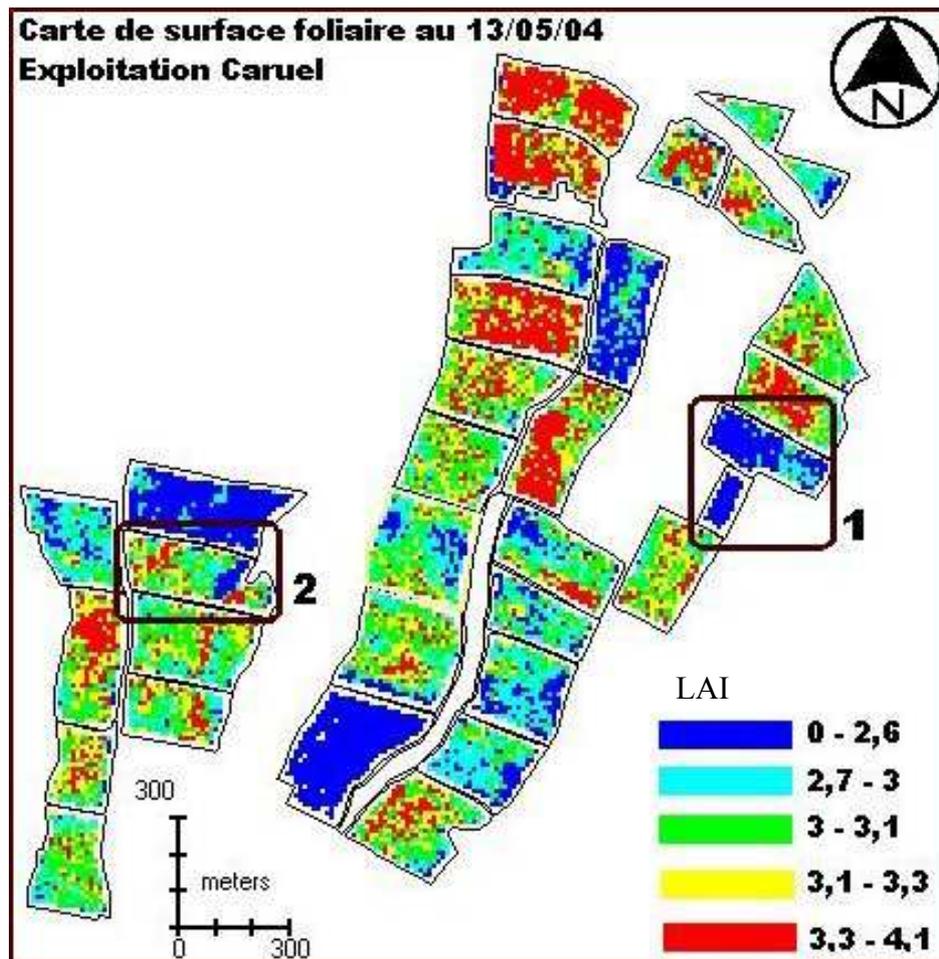


Figure 105 Carte thématique de surface foliaire, de l'exploitation Caruel, réalisée à partir d'une image NDVI Spot 5 du 13/05/04 (au maximum de développement, 1 mois avant la coupe).

On constate une variabilité aussi bien inter-parcellaire que intra-parcellaire. On peut suivre l'évolution de la surface foliaire d'une plantation, une parcelle labourée qui vient d'être plantée (Figure 106). Dans ce cas, on va suivre l'évolution de la surface foliaire sur les six premiers mois.

On remarque que le développement foliaire est hétérogène. Sur la carte de surface foliaire du 14/10/03 (Figure 106), les faibles valeurs de LAI (en bleu) correspondent à du paillis qui recouvre le bord de la parcelle issu de la coupe de la parcelle contiguë.

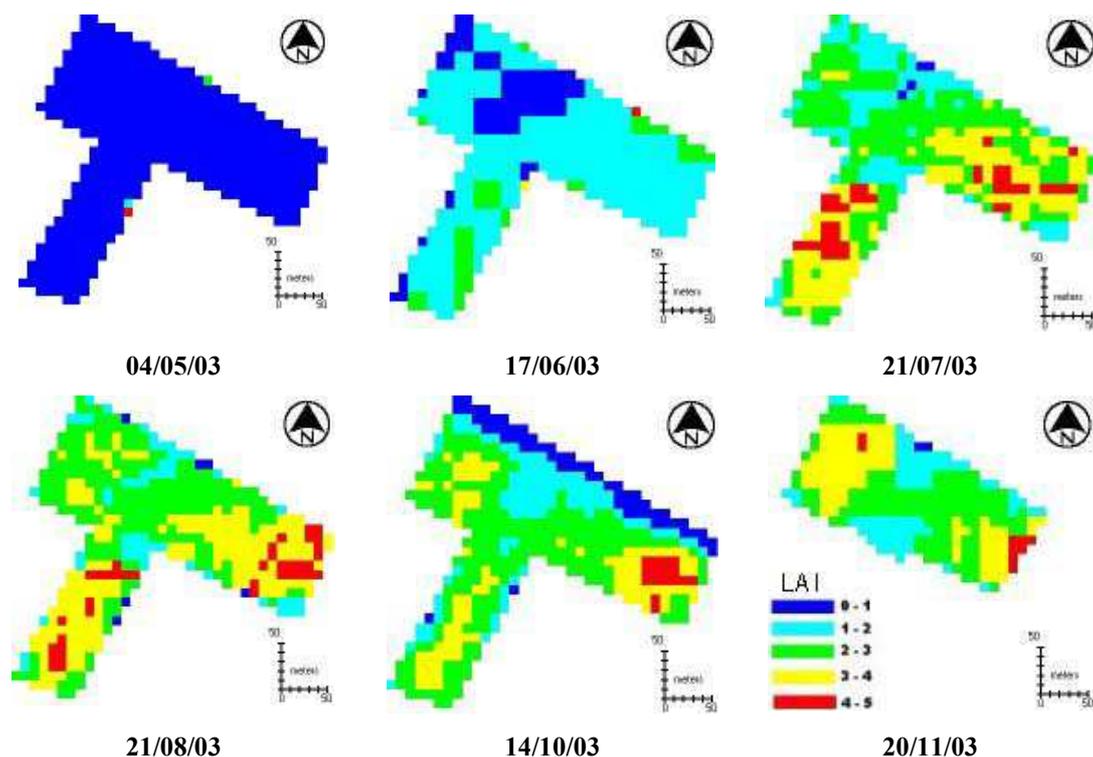


Figure 106. Cartographie et suivi intra-parcellaire de l'évolution de la surface foliaire d'une plantation, parcelle C11, exploitation Caruel en 2003.

Il est possible de suivre la surface foliaire d'une même parcelle, sur plusieurs années (Figure 107). Ce suivi permet de voir si la canne se développe de la même manière sur plusieurs années. Nous avons pu observer la parcelle C52 sur quatre années, de 2001 à 2004.

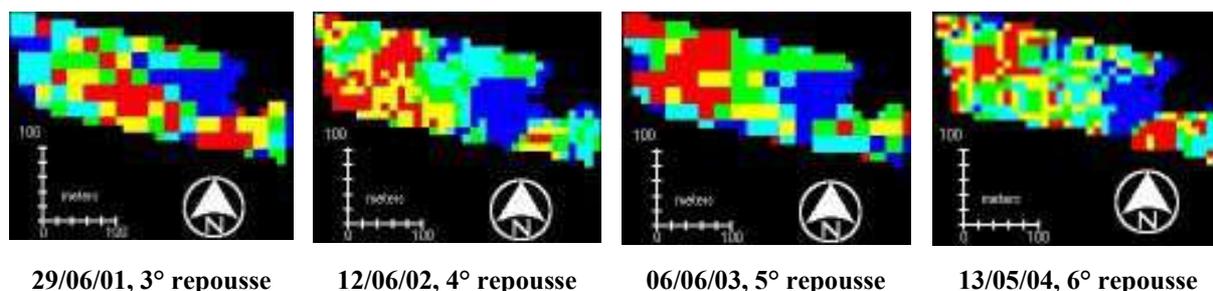


Figure 107. Cartographie et suivi intra-parcellaire, inter annuel de la surface foliaire de la parcelle C52 de 2001 à 2004, de l'exploitation Caruel.

Pour le suivi inter-annuel, nous avons choisi de classer les valeurs de LAI en utilisant la méthode permettant de représenter chaque classe par un nombre égal de pixels, « *equal area* ». Parmi cinq classes, chaque classe représente 20% de la surface de la parcelle. On remarque en bleu les 20% les plus faibles et en rouge les 20% les plus forts. Le fait d'observer une même structure spatiale pour une parcelle (un déficit de développement systématiquement au milieu) est généralement en relation avec la topographie de la parcelle, la profondeur de sol

ou un défaut de plantation. Cette information peut être utile à l'exploitant. Lors de la prochaine plantation, il peut travailler le sol de manière à atténuer ces effets.

4.1.5.2 Cartographie des rendements potentiels

Il est possible de réaliser une carte des rendements potentiels en utilisant la relation précédemment établie entre le NDVI au maximum de développement et le rendement canne, biomasse fraîche (Equation 3, p. 124).

Une validation de la méthode est proposée en appliquant sur 47 parcelles des exploitations Barau et Caruel, cycle cultural 2002, la relation établie entre les valeurs de NDVI au maximum de développement et le rendement canne. Les rendements canne ainsi estimés seront comparés aux rendements réelles mesurés lors de la récolte.

Une application est ensuite présentée : une carte des rendements potentiels a été éditée à partir d'une image SPOT 4 du 06/06/03, période de maximum de développement pour la canne, sur 62 parcelles des exploitations du nord-est de l'île, Barau et Caruel, cycle cultural 2003.

Le détail des parcelles utilisées pour ces analyses est présenté en annexe 18.

Pour valider la relation, nous avons extrait les valeurs du NDVI parcellaire au maximum de développement de la canne, à partir de l'image SPOT 4 du 12/06/02. La relation entre la valeur du NDVI au maximum de développement et le rendement canne établie pour le cycle cultural 2003 a été appliquée pour obtenir des valeurs de rendement estimé sur le cycle cultural 2002. Les résultats sont présentés en Figure 108.

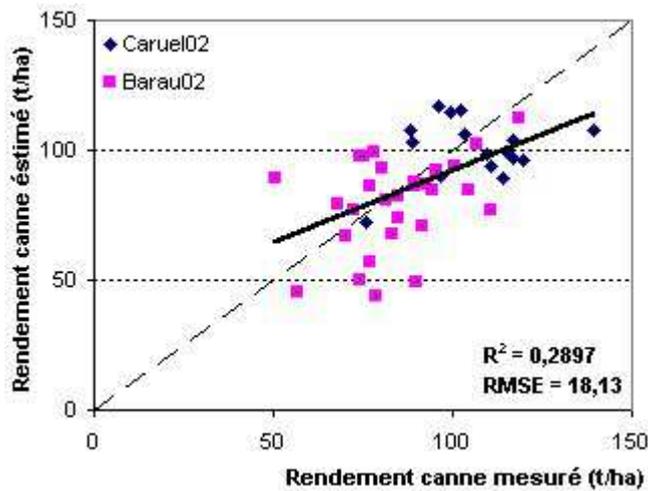


Figure 108. Comparaison entre les rendements canne estimés par télédétection et mesurés lors de la récolte pour 47 parcelles des exploitations Barau et Caruel, cycle cultural 2001-2002.

L'erreur (RMSE) sur l'estimation du rendement canne à partir des données de télédétection est égale à 18,13 t/ha (Figure 108). La RMSE donne l'erreur faite sur l'estimation du rendement canne à l'échelle parcellaire. On peut évaluer l'erreur à l'échelle de chaque exploitation en comparant le rendement canne moyen estimé par télédétection avec le rendement canne moyen réellement mesuré à la récolte :

$$\frac{\sum(\text{RdtEstimé} \times \text{surface})}{\sum \text{surface}} \text{ comparé à } \frac{\sum(\text{RdtRéel} \times \text{surface})}{\sum \text{surface}}$$

A l'échelle des exploitations, l'estimation du rendement canne moyen est proche des valeurs mesurées. Pour l'exploitation Caruel, le rendement moyen estimé par télédétection pour le cycle 2002 est égal à 105 t/ha pour un rendement moyen réalisé égal à 111 t/ha, soit une sous-estimation du rendement canne de l'ordre de 5,4%. Pour l'exploitation Barau, le rendement canne moyen estimé par télédétection est égal à 81 t/ha pour un rendement moyen réalisé égal à 85 t/ha, soit une sous-estimation du rendement canne de l'ordre de 4,7%.

Une fois cette validation effectuée, la méthode a été appliquée sur les exploitations de M. Barau et M. Caruel, pour le cycle cultural 2003, pour éditer une carte des rendements potentiels. L'erreur quadratique moyenne calculée entre les rendements canne estimés par télédétection et les rendements canne réels est de 17,62 t/ha (Figure 109) pour le cycle cultural 2003.

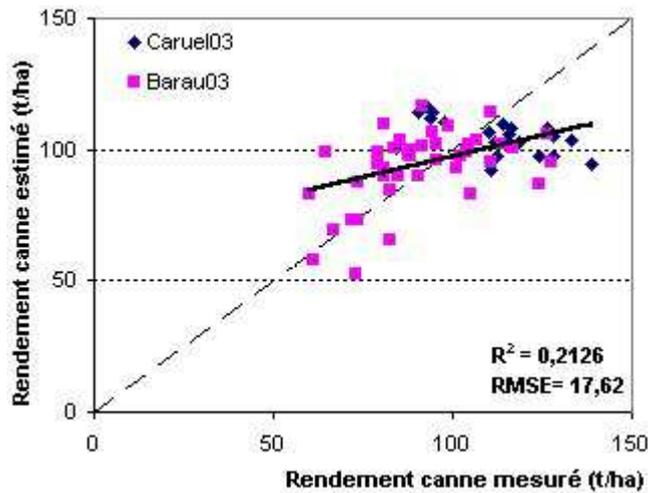


Figure 109. Comparaison entre les rendements canne estimés par télédétection et mesurés lors de la récolte pour 62 parcelles des exploitations Barau et Caruel, cycle cultural 2002-2003.

L'estimation du rendement canne faite à l'échelle de l'exploitation, est proche des valeurs réelles (Figure 109). Pour le cycle cultural 2003, l'exploitation Caruel a un rendement moyen estimé par télédétection égal à 105 t/ha pour un rendement moyen réel égal à 111 t/ha, soit une sous-estimation de 5,4% (résultats similaires à ceux obtenus pour la validation, cycle cultural 2002). Pour l'exploitation Barau, le rendement moyen estimé par télédétection est égal à 97 t/ha et le rendement moyen réel est égal à 91 t/ha, soit une surestimation de 6,6%. Pour les deux exploitations agricoles confondues, le rendement canne estimé par télédétection (au maximum de NDVI) est égal au rendement canne réel, 100 t/ha.

Par conséquent, le rendement canne moyen peut être estimé à l'échelle des exploitations agricoles, des centres de livraisons et des bassins canniers. La Figure 110 présente une carte de rendement potentiel à l'échelle parcellaire pour les exploitations Barau et Caruel.

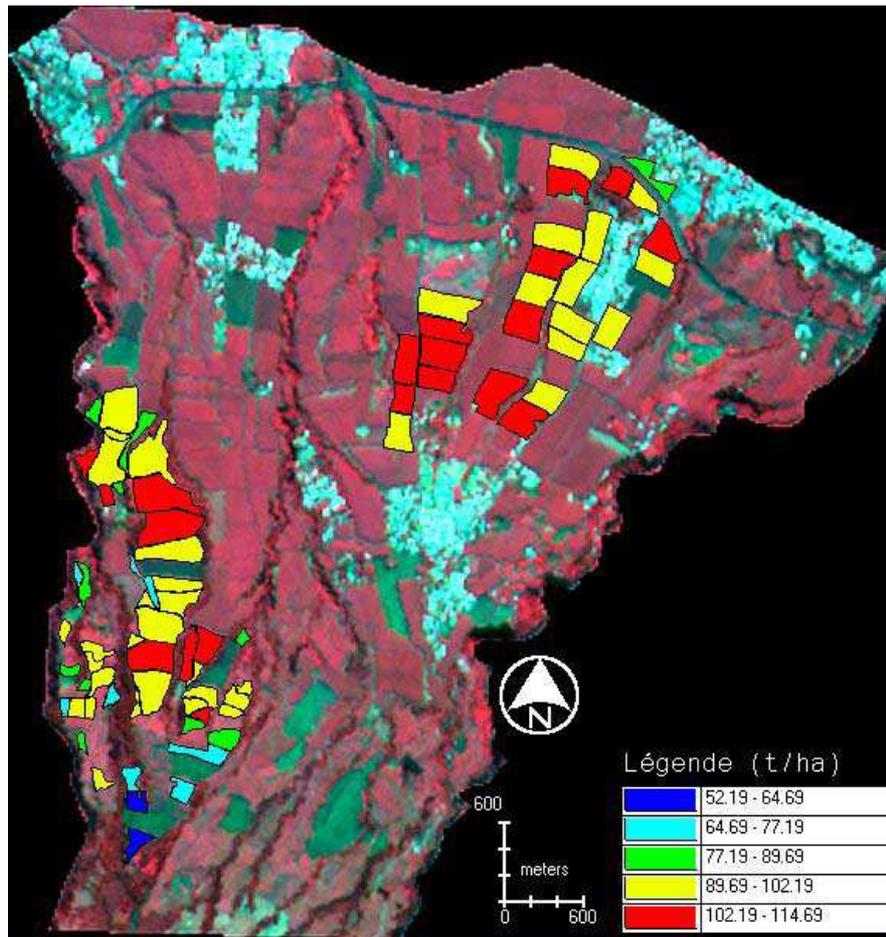


Figure 110. Carte de rendement potentiel calculé à partir du NDVI d'une image SPOT 4 du 06/06/03, au maximum de développement de la canne, exploitations Barau et Caruel, représentation par pas de 12,5 t/ha.

En résumé, une validation a pu être réalisée sur le cycle cultural 2001-2002 indiquant que le rendement canne peut être estimé par télédétection avec une sous-estimation de l'ordre de 5%. L'estimation du rendement canne à partir de la valeur maximale du NDVI au cours du cycle de la canne induit donc une erreur acceptable pour une utilisation opérationnelle.

L'avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite qu'une seule image et qu'elle peut être réalisée à l'échelle de toute la sole cannière de l'île dégagée de nuage lors de l'acquisition de l'image. De plus, le temps de traitement de l'image est court (orthorectification et application de la relation), l'information peut donc être disponible dans la semaine après l'acquisition de l'image SPOT 4 ou SPOT 5.

4.1.6 Cartographie hyperspectrale du couvert

Nous avons réalisé des cartes thématiques des paramètres descriptifs de la structure du couvert et de son état biochimique. Les paramètres les mieux estimés par la méthode de régression linéaire multiple soit, l'indice de surface foliaire (LAI) et le taux d'azote foliaire du couvert sont représentés (Figure 111).

Pour réaliser ces cartes thématiques à partir d'un transect CASI, nous avons masqué toutes les surfaces qui ne sont pas en canne et les parcelles de canne coupées. Nous avons ensuite appliqué la relation établie par la méthode de régression linéaire multiple.

La finesse spectrale du CASI nous permettant d'estimer le taux d'azote dans les feuilles, il est possible de faire une double analyse de l'information extraite. En effet, comme nous l'avons vu dans la partie 1.1.4, page 25, le taux d'azote peut renseigner sur le degré de maturité de la canne. Rappelons que pour pouvoir interpréter la teneur en azote des feuilles comme indice de maturité il faut connaître le stade de croissance de la canne. Ce stade de croissance peut être appréhendé par le LAI. Pour deux parcelles ayant atteint le même stade de développement, il serait préférable de récolter la parcelle qui présente une teneur en azote foliaire plus faible car ceci garantit une teneur en sucre plus importante.

La Figure 111 montre que pour un même LAI on peut avoir des niveaux de taux d'azote foliaire différents.

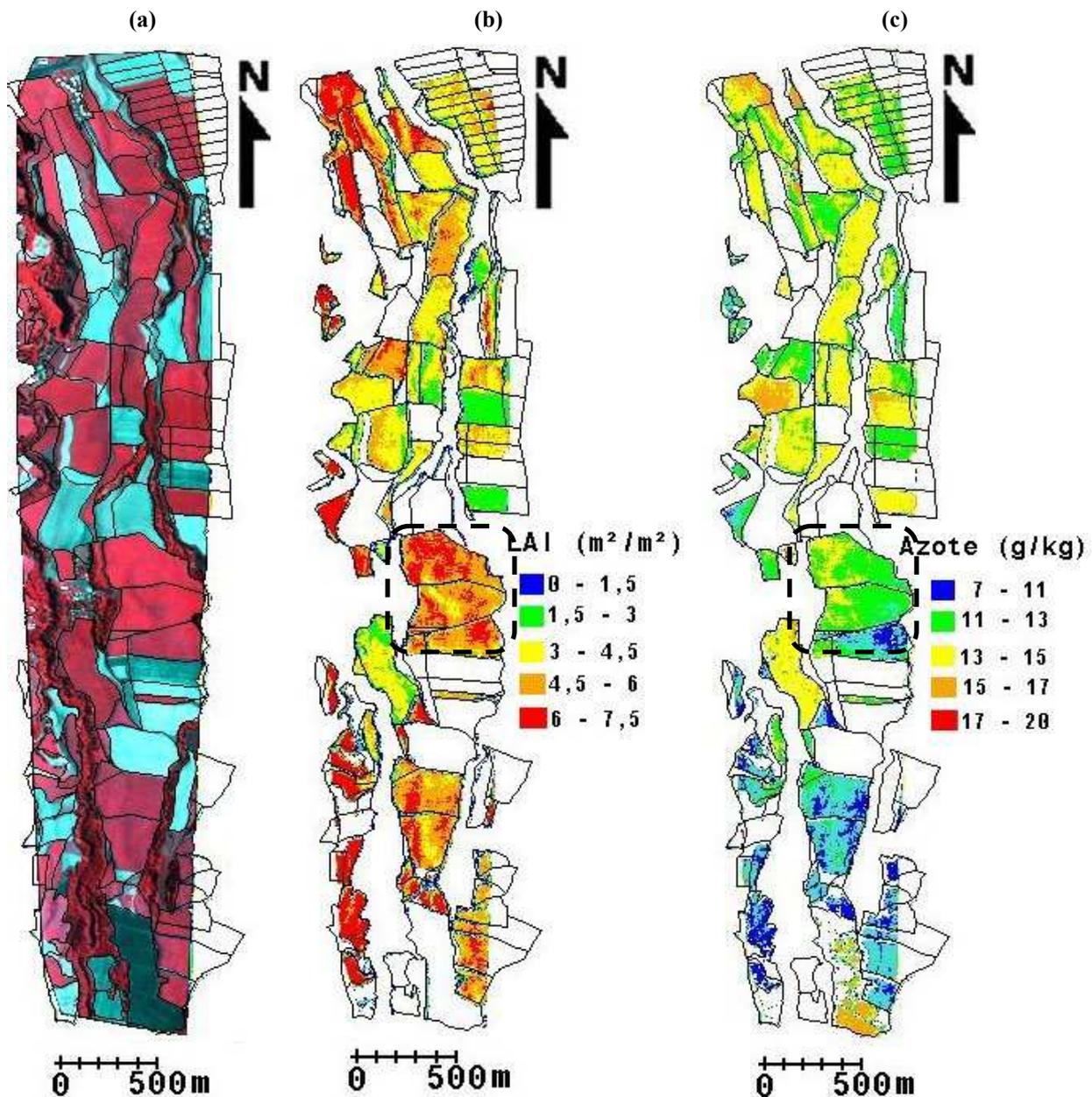


Figure 111. Composition colorée en fausse couleur d'un transect CASI (a), cartes thématiques réalisées à partir des régressions linéaires multiples de surface foliaire (b) et de taux d'azote dans les feuilles (c). En pointillé et entouré une zone remarquable discutée dans le texte.

De telles capacités pour quantifier l'état du couvert peuvent permettre le développement d'applications agronomiques. Il serait alors possible d'optimiser la coupe en fonction du degrés de maturité des parcelles. Le CASI permet une cartographie assez complète de l'état du couvert à partir d'une même image, en considérant que les bandes spectrales sont adaptées et sensibles aux paramètres suivis. De plus, le CASI enregistre des images avec une résolution spatiale de l'ordre du mètre.

Cependant, les coûts d'acquisitions des images CASI ainsi que le temps de traitement nécessaire rendent son utilisation impropre pour le développement d'outils d'aide à la gestion de la sole cannière. L'utilisation opérationnelle des images hyperseptrales enregistrées à partir de plate formes satellitaires est envisageable permettant ainsi un suivi multitemporel à moindre coût comparé à des acquisitions d'images aéroportées.

4.1.7 Carte de variabilité inter-parcellaire

Il est possible de réaliser une carte de l'indice de végétation (NDVI) moyen des parcelles, indiquant un niveau de développement. La Figure 112 présente une carte du niveau de développement des parcelles établie à partir du calcul de l'indice de végétation NDVI de l'image SPOT 5 du 13/05/04.

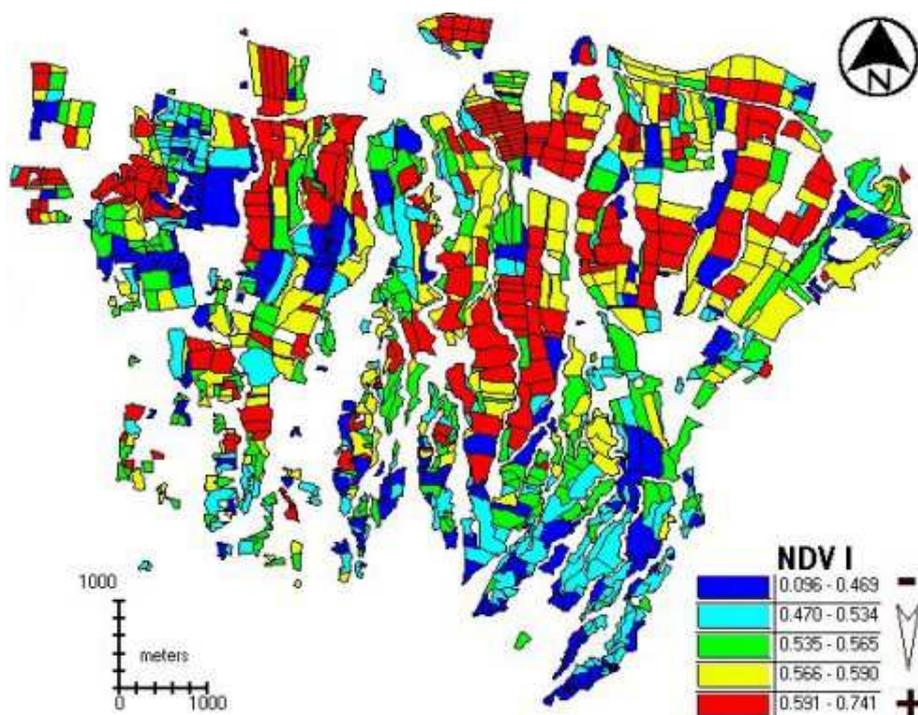


Figure 112. Carte des valeurs de l'indice de végétation NDVI (moyenne parcellaire) établie à partir de l'image SPOT 5 du 13/05/04.

Une carte de variabilité inter-parcellaire, peut également être réalisée à partir d'une image SPOT 4&5 acquise durant la période de développement maximal du couvert. En effet, il est possible d'estimer la variabilité d'une parcelle de canne en calculant l'écart-type des valeurs de NDVI observées à l'intérieur de la parcelle. On obtient ainsi une carte indiquant l'état de développement des parcelles de canne (de très hétérogène à très homogène). Nous avons

choisi pour éditer cette carte d'utiliser l'image SPOT 5 du 13/05/04 au moment où les parcelles de canne sont toutes à leur maximum de développement, en terme d'indice de végétation NDVI. Cette carte peut servir à échantillonner des parcelles (homogènes ou hétérogènes) pour des estimations de production. Les parcelles choisies (Figure 113) pour les estimations de production seront représentatives de la zone.

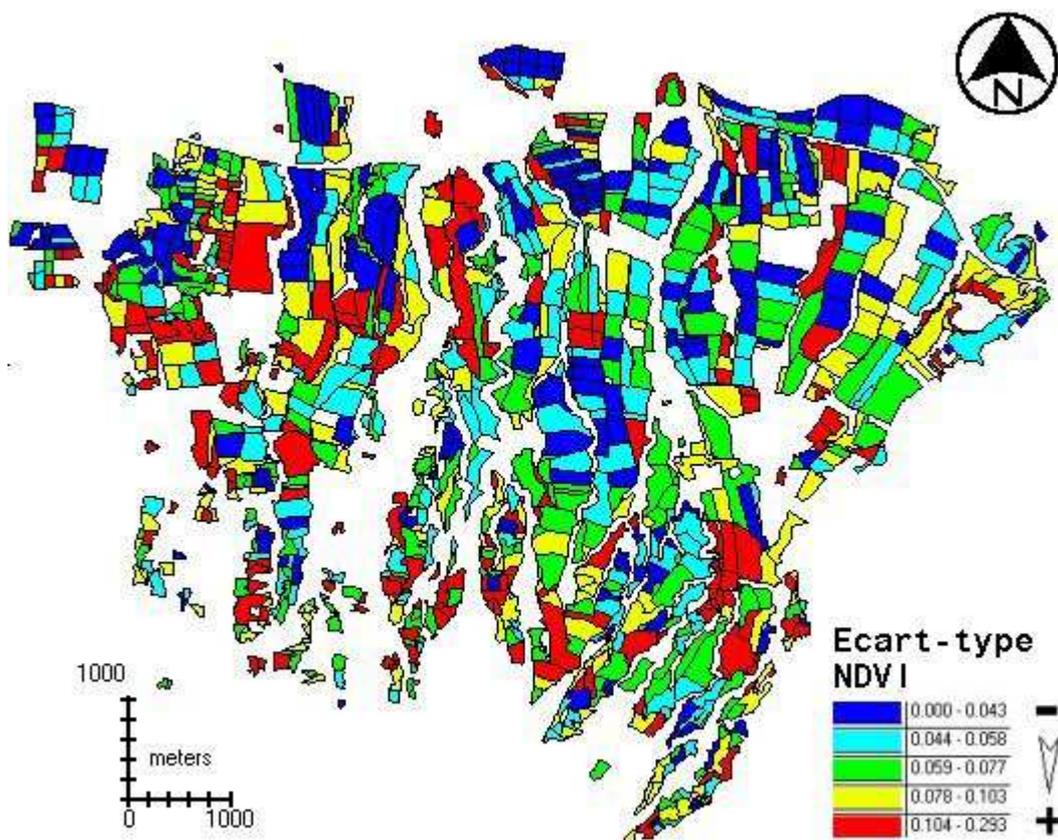


Figure 113. Carte de variabilité inter-parcellaire établie à partir de l'analyse de la valeur de l'écart type parcellaire du NDVI, image Spot 5 du 13/05/04.

Les parcelles observées sont réparties en cinq classes en fonction de l'écart type du NDVI parcellaire. Chaque classe représente 20% de la surface totale en canne à sucre. La première classe (en bleu) représente les 20% les plus homogènes alors que la dernière classe (en rouge) représente les 20% les plus hétérogènes. A partir d'une telle carte, on peut par exemple visualiser les 40% les plus homogènes afin d'effectuer une estimation de la production servant à la répartition des quotas de coupe de la zone.

Discussion sur les applications pour la filière

Les applications opérationnelles envisagées pour la filière canne doivent faire l'objet d'une mise en perspective afin de prendre en compte les facteurs limitants de chacune des méthodes utilisées.

4.1.8 Suivi des coupes et des replantations

Comme nous l'avons souligné précédemment, le suivi des coupes de la canne, pour être un outil opérationnel d'aide à la gestion, doit être constitué d'un taux d'avancement de la coupe, représentant les statistiques des surfaces coupées et non coupées. Ces états d'avancement doivent être faits mensuellement pendant la coupe. Les résultats statistiques doivent être disponibles dans les dix jours après la date d'acquisition de l'image.

La méthode par classification multispectrale est plus adaptée que la différence dans le moyen infrarouge, car elle n'utilise qu'une seule image. La méthode de différence dans le MIR, en utilisant deux images, cumule le risque de présence de nuages sur les zones d'étude. Pour pouvoir utiliser les deux méthodes par classification multispectrale ou par différence dans les bandes du MIR d'une date à l'autre, il faut employer un masque des surfaces localisées comme « coupées » à la date précédente, afin de tenir compte de l'éventuelle repousse de la canne si le délai entre les deux acquisitions d'images dégagées est trop long. Toutefois, la filière a exprimé le besoin d'avoir un suivi des coupes mensuel, garantissant un délai maximum entre deux images suffisamment court pour limiter les confusions entre les repousses et les parcelles de canne non coupées. La couverture nuageuse reste le facteur limitant à l'utilisation de ces deux méthodes. Cependant, des solutions sont envisageables pour palier aux problèmes de présence de nuage sur les images. On pourrait faire une mosaïque à partir des zones dégagées de nuage sur les images enregistrées entre les deux suivis. L'information serait alors disponible sur l'intégralité de la sole cannière. Lorsque la réalisation de cette mosaïque n'est pas possible, une méthode pour vérifier la représentativité de l'échantillon utilisé serait également à mettre en place afin d'améliorer l'estimation du taux d'avancement d'une zone donnée.

Les taux d'avancement de la coupe estimés par classification multispectrale sont proches des valeurs calculées à partir des données du CTICS. Cependant, le taux CTICS d'avancement de la coupe est basé sur les tonnages réceptionnés alors que la télédétection l'estime en terme de

surface. L'évolution des rendements au cours de la campagne peut expliquer en partie les différences observées entre les données du CTICS et l'estimation du taux d'avancement de la coupe à partir des données satellitaires.

De plus, la classification multispectrale permet d'identifier au sein du parcellaire cannier les parcelles en sol nu ou replantations. Une application du suivi des replantations est envisageable.

4.1.9 Cartographie des paramètres descriptifs de l'état du couvert

Des cartes de surface foliaire de la canne, permettant le suivi de son développement, ont été réalisées à l'échelle parcellaire comme à l'échelle intra-parcellaire au moyen de la relation établie entre l'indice de végétation NDVI calculé à partir des réflectances enregistrées par les satellites SPOT et les mesures au champ. Cependant, l'utilisation de cette relation pour estimer la surface foliaire à partir des mesures de réflectance enregistrées par les satellites SPOT implique une normalisation du signal.

Des cartes de rendement potentiel de la biomasse fraîche sont réalisables à partir d'une image enregistrée par les satellites SPOT 4&5 au moment du maximum de développement de la canne, environ un mois avant le début de la campagne de récolte. L'estimation des rendements canne par télédétection a été validée pour l'année 2002 sur les deux exploitations du nord-est suivies avec une erreur de l'ordre de 5 t/ha à l'échelle des exploitations. Cependant, l'erreur d'estimation du rendement canne à l'échelle parcellaire reste importante. Une validation sur d'autres exploitations (zones géographiques différentes) doit être envisagée avant le développement d'une application fiable et opérationnelle. De plus, les données radiométriques utilisées pour l'estimation du rendement canne doivent être étalonnées car cette relation a été établie à partir de mesures de réflectances normalisées en prenant le satellite SPOT 5 comme référence. Une autre approche serait à tester pour l'estimation du rendement canne : une mise en relation des valeurs de NDVI avec des estimations de rendement faites au champ pour une spatialisations des résultats.

L'estimation de la richesse en sucre à partir des données de télédétection nécessite des recherches complémentaires. L'analyse de l'évolution du NDVI en fin de cycle peut apporter des éléments de réponse.

L'hétérogénéité des parcelles de canne peut être mise en évidence par une analyse de la variabilité de l'indice de végétation NDVI calculé pour chaque parcelle. Il est possible alors de cartographier et de choisir des parcelles pour effectuer des estimations de rendement au champ représentatif d'une zone.

La cartographie des paramètres descriptifs de l'état du couvert a été également abordée à partir des images enregistrées par le CASI. Cependant, son utilisation en opérationnel n'est pas envisageable au vu des coûts d'acquisition élevés et des temps de traitements trop longs, malgré ses capacités de reconnaissance hyperspectrale.

CONCLUSION

Cette étude s'est appliquée à identifier les limites et les potentialités des capteurs aérospatiaux présents pour le suivi agronomique du parcellaire cannier réunionnais. Pour ce faire, nous avons poursuivi deux axes de recherche ; nous avons testé l'utilisation de données hyperspectrales enregistrées par le CASI pour estimer les paramètres biophysiques et biochimiques descriptifs de l'état du couvert de la canne à sucre, ainsi que l'efficacité des données multispectrales et multitemporelles SPOT 4&5 à caractériser la dynamique spatio-temporelle de l'état du couvert et du suivi de la production de la canne.

La télédétection peut fournir des informations détaillées pour la discrimination des cultures et l'évaluation de l'état physiologique de la plante. Pour la canne à sucre, le rendement final est fonction de deux paramètres : le rendement canne et le rendement sucre. L'élaboration du rendement final en sucre étant un phénomène relativement complexe, les recherches dans le domaine de la télédétection se sont essentiellement portées sur l'estimation du rendement canne soit la biomasse fraîche.

Les résultats du suivi temporel multispectral SPOT ont montré qu'il était possible d'estimer la surface foliaire (LAI) à partir de l'indice de végétation normalisé (NDVI). La relation établie entre le NDVI calculé à partir des réflectances SPOT 4&5 et les mesures de LAI in situ a été obtenue avec un coefficient de détermination égal à 0,86 et une erreur maximale de 15,8% (RMSE=1,16). En revanche, les données multispectrales SPOT 4&5 ne nous ont pas permis d'évaluer avec précision par télédétection la valeur de SPAD, utilisée comme indicateur de maturité en fin de cycle.

Nous avons également mis en évidence la possibilité d'estimer le rendement canne à partir de l'indice de végétation NDVI calculé au moment du développement maximal du couvert qui est atteint un mois avant le début de la coupe. Cependant, l'erreur sur l'estimation de la biomasse fraîche (rendement canne) reste relativement importante à l'échelle parcellaire avec une marge d'erreur de 18 t/ha. En utilisant les données SPOT, la meilleure estimation du rendement canne à l'échelle parcellaire résulte du couplage entre le modèle de croissance Mosicas et les profils d'évolution de surface foliaire obtenus à partir de la série temporelle d'images SPOT 4&5. L'erreur induite par l'utilisation de Mosicas pour l'estimation du

rendement canne à l'échelle parcellaire passe de 19,3 t/ha sans « forçage » à 12,8 t/ha avec « forçage ». Cependant, les résultats obtenus à l'échelle de l'exploitation pour l'estimation du rendement canne à partir des données SPOT 4&5 sont proches des valeurs observées. L'erreur induite sur l'estimation du rendement canne moyen par la méthode utilisant la valeur du NDVI au maximum de développement du couvert est de l'ordre de 5% à l'échelle des exploitations suivies. Pour aller plus loin, il faudrait comparer les résultats obtenus en utilisant cette méthode non pas avec des rendements mesurés au moment de la coupe, mais avec les rendements au moment de l'acquisition de l'image car ils peuvent être différents suivant les conditions climatiques.

De plus, notre analyse de l'évolution temporelle du signal radiométrique a mis en évidence des réponses spectrales différentes et caractéristiques des états de surface d'une parcelle de canne. La possibilité de discriminer, par leurs réponses spectrales différentes, des parcelles de canne en fonction de leurs états de surface (pleine végétation, coupée ou labourée) nous a permis de développer des applications opérationnelles de cartographie dynamique de la sole cannière (suivi des coupes et suivi des replantations), applications parmi les plus attendues par la filière canne. Le taux d'avancement de la coupe en cours de campagne est très utile. En effet, la détermination des surfaces récoltées et des surfaces à récolter permet, pour une date donnée, de dresser l'état des lieux de la récolte en rapprochant tonnages livrés et surfaces récoltées. Les surfaces restant à récolter peuvent être utilisées pour extrapoler les livraisons futures et fournir ainsi une tendance de la production finale. Il ne s'agirait que d'un outils d'aide à la prévision car cette tendance utilise les mêmes potentiels de rendement de canne au début et à la fin de la campagne. L'estimation du taux d'avancement de la coupe en temps réel (résultats cartographiques et statistiques disponibles au maximum 10 jours après l'acquisition de l'image) est possible avec une marge d'erreur variable en fonction de la date du suivi. Au début de la campagne de récolte, l'erreur sur l'estimation des surfaces coupées est de 2% environ alors qu'en fin de campagne elle peut atteindre 8%. Le besoin exprimé de la filière canne à La Réunion en terme d'estimation du taux d'avancement de la coupe met en évidence la nécessité d'un suivi mensuel durant la campagne de récolte.

Le facteur limitant de cette application reste irrémédiablement la nébulosité, non négligeable à La Réunion. Néanmoins, la capacité de revisite des satellites SPOT 4&5 étant de 3 jours, le suivi des coupes reste une application opérationnelle qui a d'ailleurs été utilisée à La Réunion durant la campagne sucrière 2004 par le CIRAD. En effet, il est possible de réaliser une image résultant de la mosaïque des zones dégagées de nuages à partir de plusieurs images. Compte

tenu des conditions atmosphériques particulièrement nuageuses à La Réunion, l'utilisation des images radars pour effectuer le suivi des coupes serait à tester car cette technologie n'est pas affectée par la couverture nuageuse. De plus, Le traitement des séries temporelles d'images SPOT 4&5 a mis en évidence des incohérences quant à l'étalonnage absolu des réflectances calculées à partir des coefficients fournis dans les fichiers annexes des images. Les solutions imaginées pour corriger cet effet « satellite » (essentiellement par recherche d'invariants) ont nécessité un grand nombre d'images et n'ont pu être mises en œuvre de façon définitive avant la fin des acquisitions. Ce problème d'inter-étalonnage, qui est également perceptible sur les valeurs d'indices de végétation, a été un frein important au développement de produits faisant appel à la comparaison entre dates.

L'utilisation du capteur aéroporté CASI permet de bénéficier des avantages de la technologie hyper-spectrale et ouvre de nouvelles possibilités. Les paramètres biophysiques de la canne sont corrélés à quelques longueurs d'onde précises. Les données hyperspectrales CASI permettent l'estimation de la surface foliaire et de la biomasse fraîche, paramètres décrivant la structure du couvert, tout comme les données multispectrales SPOT 4&5. Cependant, les données CASI permettent une meilleure estimation des paramètres que les données SPOT 4&5. Pour l'estimation du LAI, on obtient une erreur égale à 1,16 avec SPOT 4&5 alors que l'erreur commise par la méthode de régression linéaire multiple à partir des réflectances CASI est égale à 0,6. De même, l'erreur sur l'estimation de la biomasse fraîche (rendement canne) à l'échelle parcellaire est réduite pour atteindre la valeur de 10,57 t/ha contre 12,8 t/ha pour la meilleure méthode utilisant les données SPOT 4&5 (couplage entre le modèle Mosaic et le LAI estimé par SPOT).

En outre, le taux d'azote peut être estimé à l'aide des fines bandes spectrales mesurées par le CASI contrairement aux réflectances SPOT. Comme l'estimation de la teneur en azote des feuilles peut, en fin de cycle, renseigner sur le degré de maturité d'une parcelle, il est alors possible de déterminer les parcelles dont la richesse saccharine est la plus élevée. Un outil d'aide à la coupe par identification des parcelles les plus matures peut alors être développé à partir des données hyperspectrales. Concernant cette application, des recherches complémentaires sont à mener.

Cependant, ces résultats confirment bien l'intérêt de la télédétection satellitaire multi- et hyperspectrale pour la mise au point d'outil d'aide à la gestion de la canne à sucre. Le principal facteur limitant de l'utilisation des données multitemporelles reste aujourd'hui la normalisation du signal radiométrique étant donné la multiplicité des capteurs utilisés.

Actuellement, l'Europe, les Etats-Unis et même l'Australie se sont lancés dans la mise au point de capteurs hyper-spectraux satellitaires. Les résultats encourageants incitent les agences spatiales à se doter d'une résolution hyperspectrale pour la télédétection aérospatiale. De tels capteurs embarqués à bord de plates-formes satellitaires vont permettre de bénéficier de coûts équivalents à l'acquisition des images multispectrales, tout en profitant de la finesse d'information qu'apportent les mesures hyperspectrales.

L'apport de la télédétection multitemporelle est donc indéniable pour le suivi de la sole cannière à La Réunion. L'utilisation du multitemporel est même nécessaire au vu de la complexité du système de culture cannier présentant des cycles de croissance décalés, conséquence directe de l'étalement de la campagne sucrière sur six mois. La télédétection permet d'obtenir une information spatialisée sur l'état de surface de la canne nécessaire au développement d'outils d'aide à la gestion de la sole cannière, opérationnels en temps quasi réel et utiles pour l'ensemble des acteurs de la filière. Les résultats de cette étude sur l'évaluation du potentiel de la télédétection aérospatiale appliquée à la culture de la canne à sucre à La Réunion sont donc prometteurs puis que 2005 devraient donner lieu à un service pré-opérationnel de produits thématiques dérivés des données satellitaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aase J.K. and 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.

Ahlich J.S. and Bauer M.E., 1983. Relation of Agronomic and Multispectral Reflectance Characteristics of Spring Wheat Canopies. *Agronomy Journal*. Vol. 75, pp. 987–993.

Argete J.C., 1983. Sugarcane production estimates using LANDSAT MSS data and argometeorological models. *Proc. Phillippines Sug. Technol. Ass.* :583–596.

Asrar G., Kanemasu E.T. and Yoshida M., 1985. Estimates of leaf area index spectral reflectance of wheat under different cultural practices and solar angle. *Remote Sensing of Environment*, 17, pp. 1-11.

Atherton B.C., Morgan M.T., Shearer S.A., Stombaugh T.S. and Ward A.D., 1999. Site-Specific Farming: A Perspective on information Needs, Benefits and Limitations. *Journal of Soil and Water Conservation* 54 (2): 455-461.

Baret F. et Guyot G., 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 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.

Bariou R., Lecamus D. et Henaff F.L., 1985. Indices de végétation, Rennes : Centre régional de Télédétection, Université de Rennes 2 : Presses universitaires de Rennes 2.

Bausch W.C. and Duke H.R., 1996. Remote sensing of plant nitrogen status in corn. *Transactions of the ASAE*, 39(5), pp. 1869-1875.

Beaulieu D., Bédard Y., Bhérer L., Boulanger M., Boutin G. and F. Dutil, 1990. Guide de la Géomatique. Sainte-Foy, Qc, Ordre des arpenteurs-géomètres du Québec.

Bégué, A., Todoroff P., Degenne P., Baillarin F. and 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, 92 p.

Blackmer T.M., Schepers J.S. and Varuel G.E., 1994. Light reflectance compared with other nitrogen stress measurements in corn leaves. *Agronomy Journal*, 86(4), pp. 934-938.

Blackmer T.M., Schepers J.S., Varuel G.E. and Watershea E.A., 1996. Nitrogen deficiency detection using reflected shortwave radiation from irrigated corn. *Agronomy Journal*, 88(1), pp. 1-5.

Boegh E., Soegaard H., Broge N., Hasager C.B., Jensen N.O., Schelde K. and Thomsen A., 2002. Airborn multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81, pp. 179-193.

Bonn F. et Rochon G., 1992. Précis de télédétection – Volume 1, Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec – Canada, 485 p.

Borden G., 1942. A search for guidance in the nitrogen fertilization of the sugarcane crop. *Haw. Plant. Rec.*, 46, pp. 191-238.

Borden R.J., 1944. A search for guidance in the nitrogen fertilization of the sugar cane crop. Part 2 - - The first ratoon crop. *Haw. planters' Rec.*, 48: 271-306.

Borden R.J., 1948. Nitrogen effects upon the yield and composition of sugarcane. *Haw. Planters' Rec.*, 52: 1-51.

Broge N.H. and Leblanc E., 2000. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sens. Environ.* 76, pp. 156–172.

Brown L., Chen J., Leblanc S., and Cihlar J., 2000. A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests: An image and model analysis. *Remote Sensing of Environment*, 71, 16– 25.

Carter G.A., 1994. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. *International Journal of Remote Sensing* 15, pp. 697–704.

Carter G.A., Cibula W.G. and Miller R.L., 1996. “Narrow-band reflectance imagery compared with thermal imagery for early detection of plant stress.” *Journal of Plant Physiology* 148 : 515-522.

Carter G.A. et Knapp A.K., 2001. “Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration.” *American Journal of Botany* 88 (4): 677-684.

Celestine-Myrtil D.A. and Parfait A., 1987. HPLC analysis of sugars in sugar cane stalks. *International Sugar Journal*, 89 :217-220.

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

Chapman L.S., 1994. Fertiliser N management in Australia. *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.*, 1994 Conf. 83-92.

Cheema S.S. and Moolani M.K., 1970. Growth and yield of sugar-cane as influenced by varying soil moisture regimes and nitrogen levels. *Indian Sugar*, 20: 533-539.

Chen J., 1996. Evaluation of vegetation indices and modified simple ratio for boreal applications. *Can. J. Remote Sens.* 22, pp. 229–242.

Chen J. and Cihlar J., 1996. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*, 55, 153– 162.

Clevers J.G.P.W., Wonder O.W., Jongschaap R.E.E., Desprats J.F., King C., Prévost L. and Bruguier N., 2002. Using SPOT data calibrating a wheat growth model under mediterranean conditions. *Agronomie*, 22 : 687-694.

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

Crist E.P., 1984. “Effects of Cultural and Environmental Factors on Corn and Soybean Spectral Development Patterns”, *Remote Sensing of Environment*. Vol. 14, pp. 3 – 13.

Das U.K., 1936. Nitrogen nutrition of sugar cane. *Plant Physiol.*,11: 251-317.

Daughtry C.S.T., Bauer M.E., Crececius D.W., and Hixson M.M., 1980. “Effects of Management Practices on Reflectance of Spring Wheat Canopies”, *Agronomy Journal*, Vol. 72, pp. 1055 – 1060.

Delécolle R., Maas S.J., Guérif M. and Baret F., 1992. Remote sensing and crop production models : Present trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 47, 145-161.

Despinoy M., 2002. Campagne CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager) 2002 à La Réunion. Rapport technique, CIRAD-AMIS, 45p.

Dwyer L.M., Anderson A.M., Stewart D.W., Tollenaar M. and Gregorich E., 1994. Quantifying the nonlinearity in chlorophyll meter response to corn leaf nitrogen concentration. *Canadian Journal of Plant Science* **75** (1): 179-182.

Fauconnier R. et Bassereau D., 1970. La canne à sucre. G-P Maisonneuve et Larose, Paris, 468 p.

Gamon J.A., Penuelas J. and Field C.B., 1992. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of the Environment*, 41, pp. 35-44.

Gamon J.A., Serrano L. and Surfus J.S., 1997. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthesis radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 112, pp. 492-501.

Gascho G.J., 1985. Water–sugarcane relationships. *Sugar J.* 48 6, pp. 11–17

Gers C. , 2000. Mapping and geographic information system (GIS): Guidelines for the South African sugar industry. SASEX Project Report. Project 5.2.2, 31 p.

Gers C. and Schmidt E., 2001. Using SPOT4 satellite imagery to monitor area harvested by small scale sugarcane farmers at Umfolozi, 75th South African Sugar Technologists Association (SASTA), pp. 28-33.

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

Girard M.C. et Girard C.M., 1999. Traitements des données de télédétection. Technique et ingénierie - Série Environnement. Dunod, Paris, 529 p.

Goel N.S. and 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 réflectances. *Remote Sensing of Environment*, 16, pp. 69-85.

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

Groupe Céréaliers de France, 1999. Dossier: Agriculture de précision: cap sur le XXI ième siècle.

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

Haboudane D., Miller J.R., Pattey E., Zarco-Tejada P.J. and Strachan I.B., 2004. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90, pp. 337-352.

Hartt C.E., Korschak H.P., Forbes A.J. and Burr G.O., 1963. Translocation of ¹⁴C in sugar cane. *Plant Physiology*, 38 : 305-319.

Hartt C.E., 1965. The effect of temperature upon translocation of ¹⁴C in sugarcane. *Plant Physiology*, 40: 74-81.

Hartt C.E., 1967. Effect of moisture supply upon translocation and storage of ¹⁴C in sugarcane. *Plant Physiology*, 42 : 338-346.

Hartt C.E., 1970. Effect of nitrogen deficiency upon translocation of ¹⁴C in sugarcane. *Plant Physiology*, 46 : 419-422.

Hatfield, J.L. 1983. "Remote sensing Estimators of Potential and Actual Crop Yield", *Remote Sensing of Environment*. Vol. 19 pp.47 – 61.

Henry P. and Meygret A., 2000. Calibration of HRVIR and VEGETATION cameras on SPOT4. *Advances in Space Research*, 28(1) :49-58

Holben B.N., Tucker C.J. and Cheg-Jen Fan. 1980. Spectral Assessment of Soybean Leaf Area and Leaf Biomass. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 5, pp. 651 – 656.

Huete A.R., 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, pp. 295-309.

Hurney A.P., 1984. Excess nitrogen is detrimental to crop yields. *BSES Bull.*, 8: 18-19.

Jackson, R.D., Slater P.N., and Pinter P.J., 1983. Discrimination of Growth and Water Stress in Wheat by Various Vegetation Indices Through Clear and Turbid Atmospheres. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 13, pp. 187 – 208.

Jhoty I. and Autrey L.J.C., 2001. Precision agriculture for sugar cane in Mauritius. Proc. 24th Congress ISSCT, 24 : 47-50.

Johnson A.K.L. and Kinsey-Henderson A.E., 1997. Satellite-based remote sensing for monitoring land use in sugar industry. *Proc. Aust. Soc. Sug. Cane Technol.*, 19: 237-245.

Johnson L.F., 2001. Nitrogen influence on fresh-leaf NIR spectra. *Remote Sensing of Environment*, 78, pp. 314-320.

Jones, A.R., Settle, J.J., and Wyatt, B.K., 1988. Perspective images from the SPOT-1 HRV sensor. *Int. J. Remote Sens.* 9, 1405-1407.

Justice, C. and Holben, B., 1979. Examination of the Lambertian and non-lambertian models for simulating the topographic effect on remotely sensed data. NASA TM 80557, GFSC.

Justice C.O., Wharton, S.W., and Holben B.N., 1981. Application of digital terrain data to quantify and reduce the topographic effect on Landsat data. *Int. J. remote sens.* 2, pp.213-230.

Kaufman, Y.J. and Tanre D., 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI). *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30, pp. 261–270.

Kim M.S., Daughtry C.S.T., Chappelle E.W., McMurtrey III J.E. and Walthall C.L., 1994. The use of high spectral resolution bands for estimating absorbed photosynthetically active radiation (Apar). In: *Proceedings of the 6th Symp. on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Jan. 17–21, 1994, Val D'Isere, France*, pp. 299–306.

Kleman J. and Fagerlund E., 1987. Influences of Different Nitrogen and Irrigation Treatments on the Spectral Reflectance of Barley. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 12, pp. 1 –14.

Lainé G., 2001. Cartographie et évaluation des surfaces cultivées en canne à sucre (1995 à 1999), CIRAD/DAF Guadeloupe/ FEOGA/FIDOM.

Lelong C.C.D., Pinet P.C. and Poilvé H., 1998. Hyperspectral imaging and stress mapping in agriculture : a case study on wheat in Beauce (France). *Remote Sensing of Environment*, 66, pp. 179-191.

Lichtenthaler H.K., 1988. Applications of Chlorophyll Fluorescence in Photosynthesis Research, Stress Physiology. Hydrobiology and Remote Sensing. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers

Lichtenthaler H. K., Wenzel O., Buschmann C. and Gitelson A., 1998. Plant stress detection by reflectance and fluorescence. *Annals of the New-York Academy of sciences* 851 : 271-285.

Lingle S.E. and Smith R.C., 1991. Sucrose metabolism related to growth and ripening in sugarcane internodes. *Crop Science*, 31:172-177.

Lingle S.E ,1999. Sugarcane. In: Smith D.L., Hamel C. (Eds.) *Crop yield. Physiology and processes*, Springer-Verlag, Berlin, p. 287-310.

LI-COR 1990. LAI-2000 Plant Canopy Analyzer – For Rapid, Non-Destructive Leaf Area Index Measurements. LI-COR inc., Lincoln, Nebraska, USA, 14p.

Lovick G. and Kirchner L., 1991. Limitations of LANDSATTM data in monitoring growth and predicting yields in sugarcane. *Proc. Aust. Soc. Sug. Cane Technol.*, 13 :124-129.

Maas S. J., 1988. Using satellite data to improve model estimates of crop yield. *Agronomy Journal* 80, 655-662.

Malila W.A., 1978. Applications of modelling to analysis and processing of LANDSAT data, 12th International symposium on remote sensing of environment, ERIM, Mich. U.S.A., pp.917-926.

Martignac C. et Pariente P., 2002. Les planteurs entre patrimoine et productivité. *Economie de La Réunion – INSEE*, 114, pp. 12-14.

Martiné J.F., 2002. Note technique : Estimation des biomasses et LAI de parcelles de canne à sucre par mesures biométriques indirectes. *CIRAD-CA-CAS – Service modélisation*, Saint-Denis de La Réunion, France, 4 p.

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.

McDonald L. and Routley S., 1999. Use of satellite imagery, remote sensing and spatial analysis to determine the area under cane prior to and during the harvest season. Cooperative Research Centre Report N°03/99., Herbert Cane Protection and Productivity Board.

Meygret A., Soule P., Dinguirard M., Briottet X. and Laubies M.C., 1999. Bilan de recettes en vol, qualité des images de SPOT4, étalonnage absolu. *Rapport DSO/OT/QTIS/GC no 99/3202*.

Meynard J.M., 1999. Les règles de modulation pour la fertilisation azotée, in L’enjeu français de l’agriculture de précision. *Salon International du Machinisme Agricole*, 3 mars 1999, INRA, Paris, pp. 3-4.

Moore P.H., 1995. Temporal and spatial regulation of sucrose accumulation in the sugarcane stem. *Aust. J. Plant Physiol.*, 22:661-679.

Moran M. S., Clarke T.R., Inoue Y. and Vidal A., 1994. “Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index.” *Remote sensing of environment* 49 (3): 246-263.

Muchow R.C., Cooper M., Hammer G., 1996. Characterizing environmental challenges using models. In: Cooper M., Hammer G.L. (Eds.) Plant adaptation and crop improvement, CAB international, Wallingford, p. 349-364.

Myneni R.B., Nemani R.R. and Running S.W., 1997. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 35(6), pp. 1380-1393.

Narciso, G. and Schmidt E.J., 1999. Identification and classification of sugarcane based on satellite remote sensing. 73rd South African Sugar Technologists' Association (SASTA), pp. 189-194.

Noonan M., 1999. Classification of fallow and yields using LANDSATTM data in the sugarcane lands of the Herbert River catchment. Herbert Resource Information Centre. <http://hric.tag.csiro.au>. Queensland 4850.

Nyati C.T., 1996. Effect of irrigation regime on cane and sugar yields of variety NCo376 in the south-east lowveld of Zimbabwe. Proc. South African Sugar Technologists Assn. 70. pp. 59-62.

Ortiz M.J., Formaggio A.R. and Epiphanyo J.C.N., 1997. Classification of croplands through integration of remote sensing, GIS and historical database. *Int. J. Remote Sensing*, 18(1), pp. 95-105.

Pacheco A., Bannari A., Staenz K., and McNairn H., 2001a. LAI measurements in white beans and corn canopies with two optical instruments. 8th *International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, 8-12 janvier 2001, Aussois, France, pp. 374-379.

Pacheco A., Bannari A., Deguise J.C., McNairn H. and Staenz K., 2001b. Application of hyperspectral remote sensing for LAI estimation in precision farming. 23rd *Canadian Remote sensing Symposium*, 21-24 août 2001, Sainte-Foy, Québec, Canada.

Peñuelas J., Gaman J.A., Fredeen A.L., Merino J. and Field C.B., 1994. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 48, pp. 135-146.

Peñuelas J., Filella I., Lloret P., Muñoz F., and Vilajeliu M., 1995. Reflectance assessment of mite effects on apple trees. *Int. J. Remote Sensing*. Vol. 16-14: 2727-2733.

Pouzet D., Velle A. et Thong-Chane A., 2003. Diagnostic de nutrition azotée « au champ » de la canne à sucre par mesure photométrique. *CIRAD-CA-CAS*, Saint-Denis de La Réunion, France, 12 p.

Price J.C. and Bausch W.C., 1995. Leaf area index estimation from visible and near-infrared reflectance data. *Remote Sensing of Environment*, 52, pp. 55-65.

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

Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H. and Sorooshian S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48, pp. 119-126.

Qi J., Kerr Y.H., Moran M.S., Weltz M., Huete A.R., Sorooshian S. and Bryant R., 2000. Leaf area index estimates using remotely sensed data and BRDF models in a semiarid region. *Remote Sensing of Environment*, 73, pp. 18-30.

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

Raunet M., 1991. Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion. Conséquences pour la mise en valeur agricole. CIRAD, 438p.

Reddy M.R., Reddy, S.C., Venkatachari, A. and Kulkarny, H.L., 1978. Studies on the effect of nitrogen and moisture regimes on yield and quality of sugarcane. Proc. 42nd Annual Convention of the Sugar Technologists's Assoc. of India, pp. 99-121.

Régie des Assurances agricoles du Québec, 1997. Le mesurage des champs par ordinateurs. Nouvelle méthode, Gouvernement du Québec.

Richardson A.J. and Wiegand C.L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 43, pp. 1541-1552.

Richardson A.D., Duigan S.P. and Berlyn G.P., 2002. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content. *New Phytologist*, 153 : 185-194.

Robin M., 1995. La Télédétection. Collection Fac Géographie. Edition Nathan, France, Paris, pp. 203-206.

Rougean J.-L. and Breon F.M., 1995. Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.* 51, pp. 375–384.

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

Rudorff, B.F.T. and Batista G.T., 1990. Yield Estimation of Sugarcane based on Agrometeorological-Spectral models. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 33, pp. 183–192.

Samuels G., 1965. The response of sugarcane to fertilizer application as influenced by irrigation. Proc. 12th Congress ISSCT, Puerto Rico, pp. 222-226.

Schepers J. S., Francis D.D., Vigil M. and Below F.E., 1992. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. *Communications in soil science and plant analysis* 23 (17-20): 2173-2187.

Schmidt E.J., Narciso G., Frost P. and Gers C., 2000. Application of remote sensing technology in the South African sugar industry : Review of recent research findings. 74th South African Sugar Technologists' Association (SASTA).

Schröder J.J., Neeteson J.J., Oenema O. and Struik P.C., 2000. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. *Field Crops Research* 66 : 151-164.

Smeal D. and Zhang H., 1994. Chlorophyll meter evaluation for nitrogen management in corn. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **25** (9-10): 1495-1503.

Smith J.A., Kin T.L. and Ramson K.J., 1980. The lambertian assumption and Landsat data, *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 46, pp.1183-1189.

Stafford J.V., 2000. Implementing Precision Agriculture in the 21st century. *Journal of Agricultural Engineering Research* 76 (3): 267-275.

Stevensen D.W.A., Van der Merwe A., Benninga W. and Allison J.C.S., 1992. Response of different sugarcane varieties to greater than normal applications of nitrogen. *Proc. S. Afr. Sugar Technol. Assoc.*, 50-53.

Stombaugh T.S. and Shearer S., 2000. Equipment technologies for Precision Agriculture. *Journal of soil and water conservation* 55 (1): 6-11.

Strahler A.H., 1978. Improving forest cover classification accuracy from Landsat by incorporating topographic information. 12th International symposium on remote sensing of environment, ERIM, Mich. U.S.A., pp.927-942.

Su L.Y., Cruz A.D., Moore P.H. and Maretzki A., 1992. The relationship of glyphosate treatment to sugar metabolism in sugarcane : new physiological insights. *J Plant Physiol* 140:168-173.

Teng W.L., 1990. AVHRR Monitoring of U.S. Crops during the 1988 Drought. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 56, No. 8, pp. 1143 – 1146.

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

Tucker C.T., Holben B.N., Elgin Jr. J.H., and Mc Murtey III J.E., 1980. Relationship of spectral data to grain yield variation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 46, No. 5, pp. 657-666.

Van Dillewijn, 1952, Physiology: Nutrition. p 207-246. In Van Dillewijn. ed. Botany of sugarcane. Waltham Mass. USA.

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.

Viau A.A., 2000b. La géomatique et la collecte de données en agriculture. 1er colloque sur la géomatique agricole et l'agriculture de précision, St-Hyacinthe, Qc 23 et 24 mars 2000.

Vogelmann, J. E., Rock B. N. and Moss D. M., 1993. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing*. 14:1563-1575.

Vogt J. V., Niemeier S., Somma F., Beaudin I. and Viau A.A., 2000. Drought monitoring from space. Drought and drought mitigation in Europe. J. V. V. a. F. S. editors, Kluwer Academic Publishers. 14: 167-183.

Weiss M., 1998. Développement d'un algorithme de suivi de la végétation à large échelle. *Thèse pour le grade de Docteur de l'Université de Nice-Sophia Antipolis*, Université de Nice-Sophia Antipolis.

Welles J.M. and Norman J.M., 1991. Instrument for indirect measurement of canopy architecture. *Agronomy Journal*, 83, pp. 818,-825.

Westcott, M.P. and Wraith J.M., 1995. Correlation of leaf chlorophyll readings and stem nitrate concentrations in peppermint. *Communications in soil science and plant analysis* 26 (9-10): 1481-1490.

Wiedenfeld R.P., 1995. Effects of irrigation and N fertilizer application on sugarcane yield and quality. *Field Crops Res.* 43, 101-108.

Wiedenfeld R.P., 2000. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. *Agricultural Water Management.* 43, 173-182.

Wiegand C.L. and Richardson A.J., 1990. Use of Spectral Vegetation Indices to Infer Leaf Area, Evapotranspiration and Yield: I. Rationale. *Agronomy Journal*, Vol. 82, pp. 623 – 629.

Wood R.A., 1990. The roles of nitrogen, phosphorus and potassium in the production of sugarcane in South Africa. *Fertilizer Res.*, 26: 89-98.

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

Zarco-Tejeda P. J., 2000. Hyperspectral remote sensing of closed forest canopies : Estimation of chlorophyll fluorescence and pigment content. Ph.D. Dissertation, *Graduate Program in Earth and Space Science*, York University, Totonto.

GLOSSAIRE

AGRIGUA	Association Guadeloupéenne pour le Recueil d'Information Géographique d'Utilité Agricole
ASD PSII	Analytical Spectral Devices, model PSII
Brix	Teneur en sucrose par réfractométrie
CASI	Compact Airborn Spectrographic Imager, société Itres®
CERF	Centre d'Essai, de Recherche et de Formation
Cimel CE-310	Radiomètre de terrain, société CIMEL ELECTRONIQUE
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CIRAD-AMIS	Département de l'Amélioration Méthodologique pour l'Innovation Scientifique du CIRAD
CIRAD-CA	Département des Cultures Annuelles du CIRAD
CNERTA	Centre National d'Etudes et de Ressources en Technologie Avancée
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CRAAQ	Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
CTICS	Centre Technique Interprofessionnel de la Canne à Sucre
D.A.F.	Direction de l'Agriculture et de la Forêt
DGPS	Differential Global Positioning System
DOM	Département d'Outre Mer
ERS	European Remote Sensing Satellite
F3	3 ^{ème} feuille déroulée à partir du sommet de la plante
GMT	Greenwich Mean Time
GPS	Global Positioning System
HDI	Hyperspectral DI
HRVIR	Haute Résolution Visible et Infra Rouge
htvd	Distance entre le sol et la dernière ligule visible de la tige d'une canne
Hyperion	Capteur hyperspectral embarqué sur le satellite EO-1
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	Indice Foliaire
IGN	Institut Géographique National
IGARSS	International Geoscience And Remote Sensing Symposium
ISLE_Reunion	Information Satellitaire pour L'Environnement de la Réunion
K	Potassium
LACIE	Large Area Crop Inventory Experiment
LAI	Leaf Area Index
LAI-2000 PCA	Plant Canopy Analyzer, LI-COR®.
LANDSAT TM	LANDSAT Thematic Mapper
Lich	Lichtenthaler indice
MARS	Monitoring Agriculture with Remote Sensing
m.s.	Matière sèche
MCARI	Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index
MIR	Moyen Infrarouge
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MOSICAS	Modèle de simulation de la croissance de la canne à sucre

MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index
MSR	Modified Simple Ratio
N	Azote
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Végétation Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NPCI	Normalized Pigment Chlorophyll ratio Index
P	Phosphate
pIR	Proche Infra Rouge
PRI	Physiological Reflectance Index
RDVI	Renormalized Difference Vegetation Index
RMSE	Root Mean Square Error
RTE	Reseau Terre et Espace (Ministère de la Recherche)
RVI	Ratio Végétation Index
SASEX	South African Sugar Association Experiment Station
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SARVI	Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index
Shtvd	Somme des mesures « htvd »
SIG	Système d'Information Géographique
SIMULEX	Simulateur d'expérimentations (Plate-Forme de simulation)
SPAD-502	Chlorophylle meter, Minolta™
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SR	Single Ratio
SRPI	Simple Ratio Pigment Index
SUCRETTE	Système de sUivi de la Canne à sucRE par TélédéTEction
THR	Très Haute Résolution
TVI	Triangular Vegetation Index
T_{Chl}	Taux de chlorophylle
T_N	Taux d'azote
Vogel	Volgelmann indices
WDVI	Weighted Difference Vegetation Index

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Cycle total et cycle de récolte de la canne à sucre.....	17
Figure 2. Représentation schématique de l'élaboration du saccharose (Sucrose) dans la feuille, de son transport vers le phloème, et de son métabolisme de stockage dans le parenchyme (dégradation et synthèse) d'après Lingle, 1999.....	18
Figure 3. Evolution de la richesse saccharine de 1999 à 2003 pour les deux bassins cannier de l'île de La Réunion, CTICS.	20
Figure 4. Evolution des tonnages hebdomadaires de canne réceptionnés par bassin cannier de 1999 à 2003, CTICS.....	20
Figure 5. Carte de la sole cannière réunionnaise, les encadrés délimitent les périmètres irrigués (D.A.F., 2002).....	22
Figure 6. Schématisation du cycle total et du cycle de récolte de la canne à sucre à La Réunion.	23
Figure 7. Evolution du LAI de la canne à sucre réunionnaise (Martiné, 2003).	24
Figure 8. Evolution du T_N des feuilles pour une culture de canne à Porto Rico (Fauconnier et Bassereau, 1970).	25
Figure 9. Comportement spectral d'un couvert végétal dans le rouge et le pIR en fonction du LAI (CNERTA, 2003).	32
Figure 10. Photographie aérienne de la BD_Topo de l'IGN avec le parcellaire cannier (flots exploitants) de la base de données de la D.A.F.....	37
Figure 11. Image Spot 5 du 06/07/02, à gauche parcellaire D.A.F., à droite parcellaire agronomique.....	37
Figure 12. Zone de faible développement dans une parcelle de canne irriguée par pivot central, exploitation de Médine, Ile Maurice ; à gauche, image QuickBird à 2,5m de résolution et à droite image SPOT 5 à 10m de résolution spatiale.	38
Figure 13. Localisation des sites d'études; en fond, composition colorée en fausses couleurs, image SPOT 4 du 01/04/02.	41
Figure 14. Localisation des deux exploitations du nord-est, Barau et Caruel sur fond d'image SPOT 5, composition colorée en vraies couleurs du 6 juillet 2002.	42
Figure 15. Localisation des exploitations de l'ouest, Cuvelier et Kalimoutou sur fond d'image SPOT 5, composition colorée en fausses couleurs du 13 mai 2004.	43
Figure 16. Evolution climatique des sites nord-est et ouest en 2002 et 2003 (Météo France, 2003)	45
Figure 17. Localisation des parcelles d'études sur les exploitations de M. Caruel (a) et M. Barau (b), sur fond d'image Spot 5 à 2,5 m de résolution, composition colorée en vraies couleurs du 6 juillet 2002.	48
Figure 18. Localisation des parcelles d'étude sur les exploitations de M. Cuvelier (a) et M. Kalimoutou (b), sur fond d'image Spot 5 à 2,5 m de résolution, composition colorée en fausses couleurs du 13 mai 2004.....	48
Figure 19. Placette de mesure pour le suivi temporel mise en place lors de la première expérimentation.....	49
Figure 20. Localisation des points de mesure lors de la deuxième expérimentation, exploitations de M. Caruel et M. Barau.....	51
Figure 21. Localisation des points de mesures lors de la deuxième expérimentation, exploitations de M. Cuvelier (a) et M. Kalimoutou (b).	51

Figure 22. Schéma d'une placette de mesures effectuée pour la deuxième expérimentation, approche synchronique.	52
Figure 23. Relation entre les valeurs de LAI estimées par le LAI-2000 et par les mesures de Shtvd.	56
Figure 24. Relation entre le taux d'azote foliaire et la valeur de SPAD (Pouzet, 2003)	58
Figure 25. Spectres d'un couvert de canne à sucre mesurés sur le terrain avec ASD PSII.	63
Figure 26. Descriptif des bandes spectrales mesurées par le CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager), campagne 2002 à La Réunion.	63
Figure 27. Exemple d'un transect CASI avant correction géométrique (a) et après correction géométrique (b) en composition colorée vraies couleurs.....	65
Figure 28. Géométrie de la visée entre le soleil, la surface observée et le capteur.....	70
Figure 29. Localisation et surface des sites utilisés pour le contrôle de la radiométrie entre les images SPOT 4 fusionnées et non fusionnées.	72
Figure 30. Evolution des réflectances d'une parcelle de canne à La Réunion entre deux coupes (réflectances mesurées par SPOT 4&5).	74
Figure 31. Droites d'inter-étalonnage obtenus par bande entre SPOT4 et SPOT5.....	76
Figure 32. Droites d'inter-étalonnage obtenus pour l'indice de végétation NDVI entre SPOT4 et SPOT5.	76
Figure 33. Exemples d'évolution des réflectances pour trois parcelles de canne à La Réunion, sans inter-étalonnage (colonne de gauche), avec étalonnage par mise à jours par le CNES des coefficients a_λ (colonne du milieu) et avec étalonnage par la méthode des points invariants (colonne de droite).	79
Figure 34. Evolution de la valeur du LAI parcellaire par localisation et par variété, en fonction des degrés jours accumulés par la plante (La Réunion, 2002).	82
Figure 35. Evolution du taux d'azote foliaire par variété et localisation (La Réunion, 2002).	83
Figure 36. Comparaison des moyennes de LAI et de teneur en azote entre le nord-est et l'ouest pour la variété R579 ; les barres d'erreurs représentent les plus petite différence significative (<i>ppds</i>).	85
Figure 37. Comparaison des moyennes de LAI et des teneur en N par variété pour le site nord-est ; les barres d'erreurs représentent les <i>ppds</i>	86
Figure 38. Relation entre la teneur en eau relative des feuilles et leur couleur (valeur de SPAD).	88
Figure 39. Relation entre la teneur en azote et la couleur des feuilles mesurées avec le SPAD.	88
Figure 40. Relation entre les valeurs de SPAD et Brix mesurées lors de la deuxième expérimentation, les barres d'erreurs repréasant l'écart type.	89
Figure 41. Relation entre les valeurs de SPAD et Brix, moyennes parcellaires pour la Guadeloupe 2003 et 2004 (carrés et ronds noirs) et La Réunion (carrés blanc), Pellegrino (2004).	90
Figure 42. Relation entre le rendement canne final et la durée du cycle pour les parcelles de l'exploitation de M. Barau, cycle cultural 2002 et 2003.....	91
Figure 43. Relation entre le rendement canne final et la durée du cycle pour les parcelles de l'exploitation de M. Caruel, cycle cultural 2002 et 2003 (les points encerclés représentent des replantations, cycle d'un an et demi).	92
Figure 44. Relation entre le rendement canne final et la somme des degrés jours accumulés durant le cycle cultural 2003. Chaque point représente une parcelle.....	93
Figure 45. Relation entre le rendement final et le cumul des précipitations durant le cycle cultural 2003, chaque point représente une parcelle.	94

Figure 46. Relation entre la richesse saccharine (a), le rendement sucre (b) et la durée du cycle pour les parcelles de l'exploitation de M. Barau, cycles culturaux 2002 et 2003.....	95
Figure 47. Relation entre la richesse saccharine et le cumul des degrés jours (a), les précipitations (b).	95
Figure 48. Relation entre le rendement sucre final et le cumul des degrés jours (a), les précipitations (b).	96
Figure 49. Spectres de réflectances caractéristiques des trois états de surface enregistrés à l'aide du Cimel CE 310.....	99
Figure 50. Signatures spectrales des trois états d'une parcelle de canne enregistrées à partir du CASI.....	99
Figure 51. Extrait d'une image CASI en composition colorée vraies couleurs (7,4,1) présentant les trois états d'une parcelle de canne : sol nu (A), couvert de canne fermé (B) et paillis (C).	100
Figure 52. Extrait d'une image SPOT 5 en composition colorée fausses couleurs (xs3,xs2,xs1) présentant les trois états d'une parcelle de canne : sol nu (A), couvert de canne fermé (B) et paillis (C).	100
Figure 53. Signatures spectrales des trois états d'une parcelle de canne enregistrés à partir de SPOT 4&5.....	100
Figure 54. Evolution de la réflectance d'une parcelle de canne dans le vert enregistrée par le Cimel.....	102
Figure 55. Evolution de la réflectance d'une parcelle de canne dans le rouge enregistrée par le Cimel.....	103
Figure 56. Evolution de la réflectance d'un couvert fermé dans le pIR enregistrée par le Cimel.....	103
Figure 57. Evolution des indices de végétation calculés à partir des réflectances mesurées au Cimel au cours du cycle de la canne.....	104
Figure 58. Représentation de la droite du paillis en fonction de la réflectance dans le rouge et le proche infrarouge mesurée avec le Cimel.....	106
Figure 59. Evolution de la réflectance dans le vert (XS1) enregistrée par SPOT 4&5 de 59 parcelles de canne en repousse, variétés R570 et R579, cycle cultural 2002-2003. 107	107
Figure 60. Evolution de la réflectance dans le rouge (XS2) enregistrée par SPOT 4&5 de 59 parcelles de canne en repousse, variétés R570 et R579, cycle cultural 2002-2003. 108	108
Figure 61. Evolution de la réflectance dans le proche infrarouge (XS3) enregistrée par SPOT 4&5 de 59 parcelles de canne en repousse, variétés R570 et R579, cycle cultural 2002-2003.	109
Figure 62. Evolution de la réflectance dans le moyen infrarouge (XS4) enregistrée par SPOT 4&5 de 59 parcelles de canne en repousse, variétés R570 et R579, cycle cultural 2002-2003.	110
Figure 63. Signatures spectrales enregistrées par SPOT 4&5 du paillis et d'un couvert fermé d'une parcelle de canne à sucre.....	111
Figure 64. Evolution du NDVI calculé à partir des réflectances SPOT 4&5 pour 59 parcelles en fonction du nombre de jours après la coupe, variétés R570 et R579 confondues, cycle cultural 2002-2003.....	111
Figure 65. Evolution du NDVI de 59 parcelles au cours du cycle cultural 2002-2003, variétés R570 et R579 confondues.....	112
Figure 66. Evolution temporelle de la valeur du NDVI SPOT 4&5 parcellaire pour une plantation, une coupe suivie de la repousse et d'une coupe suivie d'une plantation, La Réunion 2002-2003.....	113
Figure 67. Evolution de la réflectance dans le rouge et proche infrarouge enregistrée par le Cimel en fonction de la surface foliaire (LAI).....	115

Figure 68. Relation entre le LAI et les trois indices de végétation calculés à partir des réflectances Cimel pour les stades de croissance < 2500 degrés/jour.....	116
Figure 69. Evolution de la réflectance enregistrée avec le Cimel dans le vert et le rouge en fonction des valeurs de SPAD, pour les stades de croissance supérieurs à 2500 degrés jours.	117
Figure 70. Relation entre les valeurs de SPAD et le NDVI calculé à partir des réflectances enregistrées avec le Cimel, pour les stades de croissance supérieurs à 2500 degrés jours.....	118
Figure 71. Relation entre la surface foliaire de la canne et les réflectances SPOT 4&5 (65 points).....	119
Figure 72. Relation entre le NDVI calculé à partir des réflectances SPOT et la surface foliaire d'un couvert de canne mesurée au champ (65 points).	120
Figure 73. Indicateurs calculés pour chaque parcelle à partir des ajustements de NDVI au cours du cycle cultural : intégrale du NDVI et maximum de NDVI	121
Figure 74. Relation entre le maximum de NDVI et le rendement en canne, exploitation Barau et Caurel, cycle cultural 2002-2003.	121
Figure 75. Relation entre l'intégrale de l'indice de végétation NDVI au cours du cycle et le rendement canne final, exploitation Barau et Caurel, cycle cultural 2002-2003.	122
Figure 76. Relation entre le maximum de NDVI calculé à partir des réflectances enregistrées par SPOT 4&5 et le rendement final en canne pour La Réunion et la Guadeloupe, cycles culturaux 2003, 2004 (Bégué, 2004).....	123
Figure 77. Relation entre l'intégrale de NDVI calculé à partir des réflectances enregistrées par SPOT 4&5 et le rendement final en canne pour La Réunion et la Guadeloupe, cycles culturaux 2003.....	123
Figure 78. Relation entre les réflectances enregistrées par SPOT 4&5 et les valeurs de SPAD mesurées au champ.	125
Figure 79. Relation entre les valeurs de SPAD et le NDVI calculé à partir des réflectances SPOT 4&5.....	125
Figure 80. Relation entre le LAI (a), la biomasse fraîche (b) et l'indice de végétation TVI calculé à partir des réflectances enregistrées par le CASI.	127
Figure 81. Relation entre le SPAD (a), le T_N (b) et l'indice de végétation PRI calculé à partir des réflectances enregistrées par le CASI.	128
Figure 82. Coefficient de détermination par bande spectrale pour le LAI et la biomasse fraîche. La réflectance spectrale pour un couvert fermé de canne est également représentée pour mieux se repérer sur le spectre.	129
Figure 83. Coefficient de détermination par bande spectrale pour le T_N et le SPAD. La réflectance spectrale pour un couvert fermé de canne est également représentée pour mieux se repérer sur le spectre.	130
Figure 84. Comparaison des valeurs mesurées au champ (surface foliaire, rendement canne, T_N et SPAD) et calculées par les indices de végétation et par régression linéaire multiple à partir des réflectances CASI.	132
Figure 85. Sensibilité des bandes CASI aux différents paramètres descriptifs de l'état du couvert d'une parcelle de canne.	133
Figure 86. Comparaison entre les valeurs de rendement canne (a), de richesse (b) et de rendement sucre (c) simulés par Mosaic et les valeurs observées, cycle cultural 2002-2003.	135
Figure 87. Courbes d'évolution du NDVI parcellaire et des valeurs de NDVI extraites des images SPOT 4&5.	136

Figure 88. Comparaison entre les rendements canne (a), la richesse (b) et le rendement sucre (c) simulés par Mosaicas avec forçage du LAI estimé par télédétection et les valeurs observées, cycle cultural 2002-2003.	137
Figure 89. Cartes de rendements simulés par Mosaicas avec forçage du LAI estimé par télédétection, pour les parcelles des exploitations Barau (a) et Caruel (b), cycle cultural 2002-2003.	138
Figure 90. Evolution du signal radiométrique SPOT lors d'une plantation, d'une coupe et d'une reprise après coupe.	143
Figure 91. Evolution temporelle des réflectances SPOT 4&5 de trois parcelles de canne avant et après la coupe avec losange XS1, carré XS2, triangle XS3 et croix XS4, la coupe est en date du 15/08/02.	145
Figure 92. Couche MIR avant coupe en date du 17/06/03 (a) et Couche MIR après coupe en date du 21/08/03 (b).	146
Figure 93. Image de différence pixel à pixel des couches MIR entre avant et après la coupe.	147
Figure 94. Seuil de 35% de l'image de différence, en vert pixel « canne coupée, paillis », en rouge « canne replantée, sol nu » et en noir « canne non récoltée, couvert fermé ».	148
Figure 95. Composition colorée en fausses couleurs du 14/10/03 avec en rouge La canne non coupée, en blanc la canne coupée et en vert les parcelles de canne coupée puis labourée pour replantation, le sol nu.	149
Figure 96. Classification non supervisée (a) et regroupement en trois classes (b), en vert canne non coupée (couvert fermé), en blanc canne coupée (paillis) et en marron les parcelles de canne coupées puis labourées pour replantation, le sol nu.	149
Figure 97. Calendrier d'acquisition des images Spot pour le suivi des coupes de la campagne sucrière 2003 à La Réunion.	150
Figure 98. Composition colorée en fausses couleurs, images SPOT du 17/06/03 « avant coupe » (a) et du 21/08/03 « après coupe » (b).	150
Figure 99. Sole cannière traitée pour le suivi des coupes à la date du 21/08/03.	151
Figure 100. Carte des coupes de la zone nord-est de l'île de La Réunion éditée à partir de l'image Spot 5 du 21/08/03, la classe « en cours » correspondant aux parcelles en cours de coupe.	153
Figure 101. Parcelle cannière dégagé au 14/10/03 (a) et au 20/11/03 (b).	153
Figure 102. Localisation des 82 points de contrôles utilisés pour la validation des cartes de coupe.	157
Figure 103. Evolution du taux d'avancement de la coupe calculé à partir des données CTICS et estimé par télédétection, campagne sucrière 2003, La Réunion.	160
Figure 104. Image Spot 5 du 13/05/04 en composition colorée fausses couleurs (a) et carte des replantations (b) ; les pixels bleus sont identifiés comme « sol nu » au sein de la sole cannière.	161
Figure 105 Carte thématique de surface foliaire, de l'exploitation Caruel, réalisée à partir d'une image NDVI Spot 5 du 13/05/04 (au maximum de développement, 1 mois avant la coupe).	163
Figure 106. Cartographie et suivi intra-parcellaire de l'évolution de la surface foliaire d'une plantation, parcelle C11, exploitation Caruel en 2003.	164
Figure 107. Cartographie et suivi intra-parcellaire, inter annuel de la surface foliaire de la parcelle C52 de 2001 à 2004, de l'exploitation Caruel.	164
Figure 108. Comparaison entre les rendements canne estimés par télédétection et mesurés lors de la récolte pour 47 parcelles des exploitations Barau et Caruel, cycle cultural 2001-2002.	166

Figure 109. Comparaison entre les rendements canne estimés par télédétection et mesurés lors de la récolte pour 62 parcelles des exploitations Barau et Caruel, cycle cultural 2002-2003.	167
Figure 110. Carte de rendement potentiel calculé à partir du NDVI d'une image SPOT 4 du 06/06/03, au maximum de développement de la canne, exploitations Barau et Caruel, représentation par pas de 12,5 t/ha.	168
Figure 111. Composition colorée en fausse couleur d'un transect CASI (a), cartes thématiques réalisées à partir des régressions linéaires multiples de surface foliaire (b) et de taux d'azote dans les feuilles (c). En pointillé et entouré une zone remarquable discutée dans le texte.	170
Figure 112. Carte des valeurs de l'indice de végétation NDVI (moyenne parcellaire) établie à partir de l'image SPOT 5 du 13/05/04.	171
Figure 113. Carte de variabilité inter-parcellaire établie à partir de l'analyse de la valeur de l'écart type parcellaire du NDVI, image Spot 5 du 13/05/04.	172

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Technologies de la géomatique utilisées en agriculture de précision.	28
Tableau 2. Caractéristiques des régressions entre les valeurs de LAI observées et estimées à partir d'indices de végétation (Haboudane, 2004).	33
Tableau 3. Caractéristiques des exploitations suivies durant les expérimentations de mesures au champ.	43
Tableau 4. Caractéristiques des parcelles suivies au cours de la première expérimentation ; le nom des parcelles qui commence par un « B » sont situées sur l'exploitation de M. Barau, « C » pour M. Caruel, « Cuv » pour M. Cuvelier et enfin « Kali » pour M. Kalimoutou.	47
Tableau 5. Caractéristiques des parcelles suivies au cours de la deuxième expérimentation.	50
Tableau 6. Récapitulatif des mesures faites lors de la deuxième expérimentation.	53
Tableau 7. Caractéristiques des parcelles suivies au cours de la troisième expérimentation.	54
Tableau 8. Liste et caractéristiques des images SPOT 4&5 utilisées pour constituer la série temporelle.	67
Tableau 9. Exemple d'extraction des valeurs radiométriques des cinq sites d'études dans la bande XS1 pour les deux images.	72
Tableau 10. Calcul de la RSME pour chaque bande entre les valeurs radiométriques des deux images.	73
Tableau 11. Détails des extractions des valeurs de réflectances enregistrées par SPOT4 sur les points invariants.	75
Tableau 12. Détails des extractions des valeurs de réflectances enregistrées par SPOT5 sur les points invariants.	75
Tableau 13. Récapitulatif des coefficients d'inter-étalonnage obtenus par la méthode des points invariants.	77
Tableau 14. Mise à jour des coefficients d'étalonnage A_k (en jaune) fournis par SPOT Image.	78
Tableau 15. Identification des groupes pour les deux analyses de variance.	85
Tableau 16. Résultats des relations obtenues entre les indices de végétation calculés à partir du Cimel et la surface foliaire de la canne.	116
Tableau 17. Indices de végétation calculés à partir des réflectances mesurées par le CASI pour l'estimation des variables biophysiques descriptives de l'état du couvert de la canne.	126
Tableau 18. Coefficients de détermination et RMSE obtenus par régression linéaire entre les indices de végétation calculés à partir des réflectances enregistrées par le CASI et les paramètres structuraux du couvert de la canne (LAI et biomasse fraîche).	127
Tableau 19. Coefficients de détermination et RMSE obtenus par régression linéaire entre les indices de végétation calculés à partir des réflectances enregistrées par le CASI et les paramètres descriptifs de l'état biochimique du couvert (T_N et SPAD).	128
Tableau 20. Bandes spectrales, coefficients de détermination et RMSE obtenus par régression linéaire multiple pour le LAI, le rendement canne, le T_N et la valeur de SPAD. ...	131
Tableau 21. Sensibilité de la réflectance des bandes SPOT 4&5 au changement d'état d'une parcelle entre « non coupé » et « coupé ».	145
Tableau 22. Surfaces totales en canne et surfaces effectivement traitées par balances lors du suivi des coupes à la date du 21/08/03.	151

Tableau 23. Taux d'avancement de la coupe par balance estimé par télédétection au 21/08/03 par la méthode de différence dans le MIR.	152
Tableau 24. Résultats obtenus pour le suivi de la campagne de coupe, par centre de livraison en date du 14/10/03.	154
Tableau 25. Résultats obtenus lors du suivi des coupes à la date du 20/11/03.	155
Tableau 26. Résultats obtenus pour la validation de la carte des coupes éditée à partir de l'image du 21/08/03 en utilisant la méthode de classification multispectrale.	156
Tableau 27. Comparaison de l'erreur obtenue entre la méthode de classification multispectrale et la méthode de différence dans la MIR à partir de l'image du 21/08/03.	158
Tableau 28. Comparaison des résultats obtenus lors du suivi des coupes du 14/10/03 par la méthode de classification multispectrale avec les données CTICS.	158
Tableau 29. Synthèse des résultats obtenus pour la comparaison du suivi des coupes à la date du 20/11/03 par de classification multispectrale avec les données du CTICS.	159
Tableau 30. Surfaces identifiées comme replantées supérieurs à 5 ha à la date du 13/05/04 par planteur.	161

ANNEXES

Annexe 1 : Morphologie et phénologie de la canne.....	207
Annexe 2 : L'île de La Réunion.....	210
Annexe 3 : Conduite culturale de la canne.....	213
Annexe 4 : Bases physiques de la télédétection.....	218
Annexe 5 : La télédétection appliquée aux couverts végétaux.....	222
Annexe 6 : Fiche technique du LAI-2000 Plant Canopy Analyzer.....	228
Annexe 7 : Fiche technique du SPAD-502 de Minolta™.....	229
Annexe 8 : Fiche technique du radiomètre de terrain Cimel CE-310.....	230
Annexe 9 : Présentation du CASI.....	231
Annexe 10 : Indices de végétation hyperspectraux utilisés dans cette étude.....	234
Annexe 11 : Tableau récapitulatif des mesures enregistrées lors de la première expérimentation.....	236
Annexe 12 : Caractéristique des capteurs embarqués sur SPOT.....	239
Annexe 13 : Résultats de l'analyse de variance sur les effets « variété » et « lieu ».....	241
Annexe 14 : Détail des parcelles utilisées pour l'analyse de l'évolution des réflectances	254
Annexe 15 : Détail des 29 parcelles utilisées pour les simulations Mosicas.....	255
Annexe 16 : Ajustements NDVI obtenus pour chacune des parcelles en repousse.....	256
Annexe 17 : Coefficients de pondération des réflectances SPOT 4&5 en fonction des dates des mesures terrain de LAI et de taux d'azote.....	263
Annexe 18 : Détail des parcelles utilisées pour la cartographie des rendements estimés par télédétection, exploitations Barau et Caruel, cycles culturaux 2002 et 2003.....	264
Annexe 19 : Communication internationale IGARSS 2003, Toulouse.....	266
Annexe 20 : Communications internationales ISSCT05, Guatemala.....	270

Annexe 1 : Morphologie et phénologie de la canne

1. Propriétés morphologiques de la canne

Les principaux organes de la canne à sucre sont décrits de manière précise dans l'ouvrage intitulé « La canne à sucre » de R. Fauconnier (1970) :



Figure 1. La canne à sucre (Illustration du Musée du Sucre, Berlin)

La tige est la partie utilisée en sucrerie car elle renferme le saccharose (jusqu'à 35 %) accumulé au moment de la maturation. Sa longueur au moment de la coupe varie normalement entre 1,5m et 4m. Son poids à la récolte peut être de seulement 300g ou atteindre 6kg. La tige présente des bourgeons latéraux, placés sur les nœuds, alternés et protégés par chaque gaine foliaire.



Photographie 1. Coupe de tige devenant canne usinable

Les feuilles alternées sont implantées sur la tige. Elles sont allongées et composées de deux parties, la gaine et le limbe reliés par une articulation.

La ligule est un appendice de la gaine, situé entre cette dernière et le limbe. La distance entre la dernière ligule visible et le sol permet d'établir la hauteur « htvd », caractéristique du stade de croissance de la plante.

Le feuillage comporte une dizaine de feuilles actives qui absorbent la lumière.

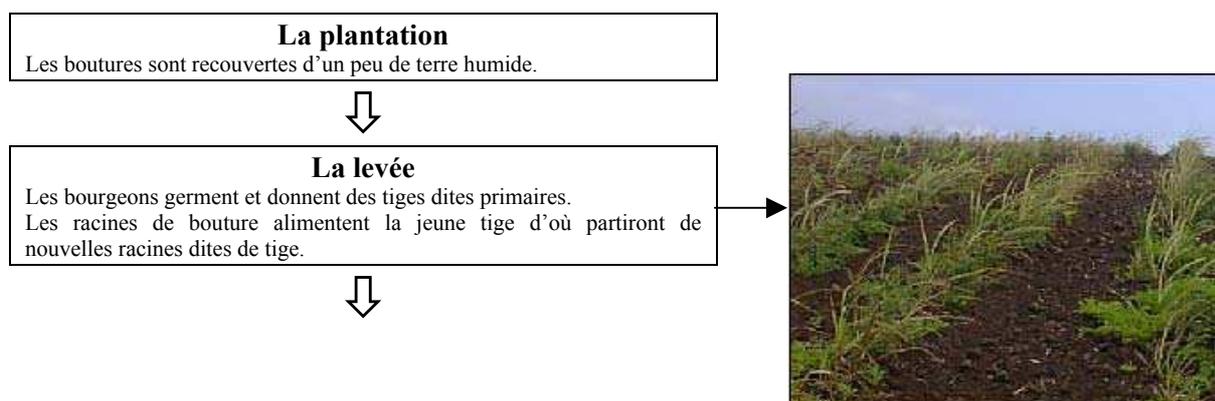
Le couvert végétal se développe progressivement pendant les 4 à 6 premiers mois de croissance puis se stabilise jusqu'à maturité

Le système racinaire n'intéresse pas directement notre étude. Notons simplement qu'il est composé successivement de deux sortes de racines : les racines de bouture et les racines de tige.

Les racines de bouture ne sont que passagères. Elles sont minces, très ramifiées et superficielles.

Les racines de tige qui les remplacent ont deux rôles : absorption et fixation.

2. Le cycle de culture de la canne à sucre





Le tallage

Certains bourgeons souterrains des tiges primaires se développent et donnent des tiges secondaires. Ces dernières produisent leurs propres racines et, éventuellement des tiges nouvelles dites tertiaires, ainsi de suite.

Le tallage s'achève lorsqu'un équilibre entre le nombre de tiges, le potentiel d'absorption des racines et les possibilités du milieu est atteint.



La croissance

Le bourgeon végétatif de chaque tige donne naissance à une suite de nœuds et d'entrenœuds. Les tiges s'allongent et le feuillage prend progressivement son aspect normal.

Les premières feuilles sèchent et vont jusqu'à se détacher dans le cas de la variété R579, au profit des nouvelles feuilles. Le feuillage photosynthétiquement actif se compose de 7 feuilles encore enroulées au sommet et d'une dizaine de feuilles vertes.

Les racines se ramifient et s'allongent pour supporter la croissance.

L'intervalle de temps entre l'apparition d'une feuille et de la suivante dépend de la température et donc des degrés/jour.



La floraison

A partir d'un certain âge et sous l'influence de la longueur du jour qui diminue, le bourgeon apical végétatif peut se transformer en bourgeon floral.

Se développe alors une inflorescence s'apparentant à un plumeau blanc.

Dans les climats tropicaux usuels, la floraison intervient en fin de saison des pluies.



La maturation

La fraîcheur et le manque d'eau provoquent la maturation. Le saccharose s'accumule dans les tiges, ceci s'accompagnant d'une diminution de la teneur en eau et en azote.

Dans les climats chauds et contrastés, tel qu'à la Réunion, il peut y avoir sur-maturation. Cette dernière provoque le départ en végétation des bourgeons latéraux qui se nourrissent des réserves accumulées dans la tige.



La récolte

Les cannes sont sectionnées au niveau du sol. Les feuilles et le haut de la tige sont éliminés. De cette coupe reste la canne usinable qui est livrée aux usines sucrières et aux distilleries industrielles.



La repousse

La souche comporte la partie souterraine des différentes tiges récemment coupées et tout le système racinaire.

A partir des bourgeons latents, naissent de nouvelles tiges qui, à leur tour, produisent leurs propres racines. L'ancien système racinaire cesse ses fonctions, il est remplacé par le nouveau, pendant que la partie aérienne se développe.



Annexe 2 : L'île de La Réunion

1. Localisation

La Réunion est un Département français d'Outre-Mer (DOM) situé dans le Sud-Ouest de l'Océan Indien (cf. figure 2).

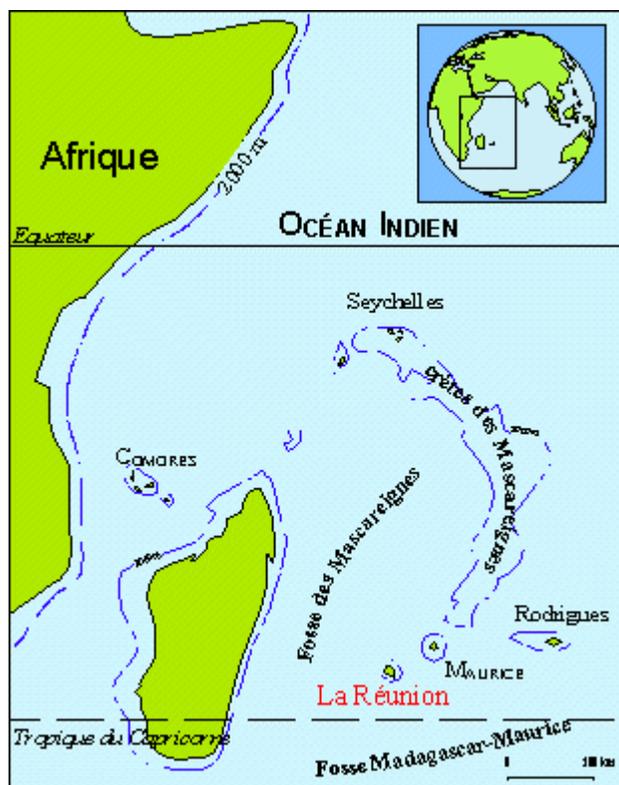


Figure 2. Situation géographique de la Réunion (Météo France)

La Réunion est une île d'origine volcanique située dans l'archipel des Mascareignes, 800 km à l'Est de Madagascar, par 55°30' de longitude Est et 21°05' de latitude Sud. Sa superficie de 2510 km² occupe une forme ovoïde, compacte et fortement accidentée.

La Réunion se présente en effet comme une montagne culminant à 3069 m au milieu de l'océan. Le relief de l'île est composé de deux massifs qui laissent peu de place aux plaines.

2. Le Climat

Le climat de La Réunion est 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 caractérisent la « saison chaude

» ou « saison des pluies ». C'est aussi la période où se forme la plus grande partie des dépressions tropicales.

L'hiver, de mai à octobre, est la saison « fraîche » ou saison « sèche ». Les températures sont douces et les précipitations peu abondantes. Ces dernières restent tout de même importantes sur l'Est.

2.1 Le contraste climatique Est/Ouest induit par le relief

Le climat réunionnais se singularise surtout par ses grandes variabilités pluviométriques. Les hauts reliefs de l'île sont la cause de cette dissymétrie Est-Ouest.

Les précipitations tendent à se concentrer sur les régions directement exposées à l'humidité océane apportée par les vents de secteur Est. On parle de région « au vent ». A l'inverse, les régions « sous le vent », qui bénéficient de l'abri du relief, sont beaucoup plus sèches (cf. figure 3).

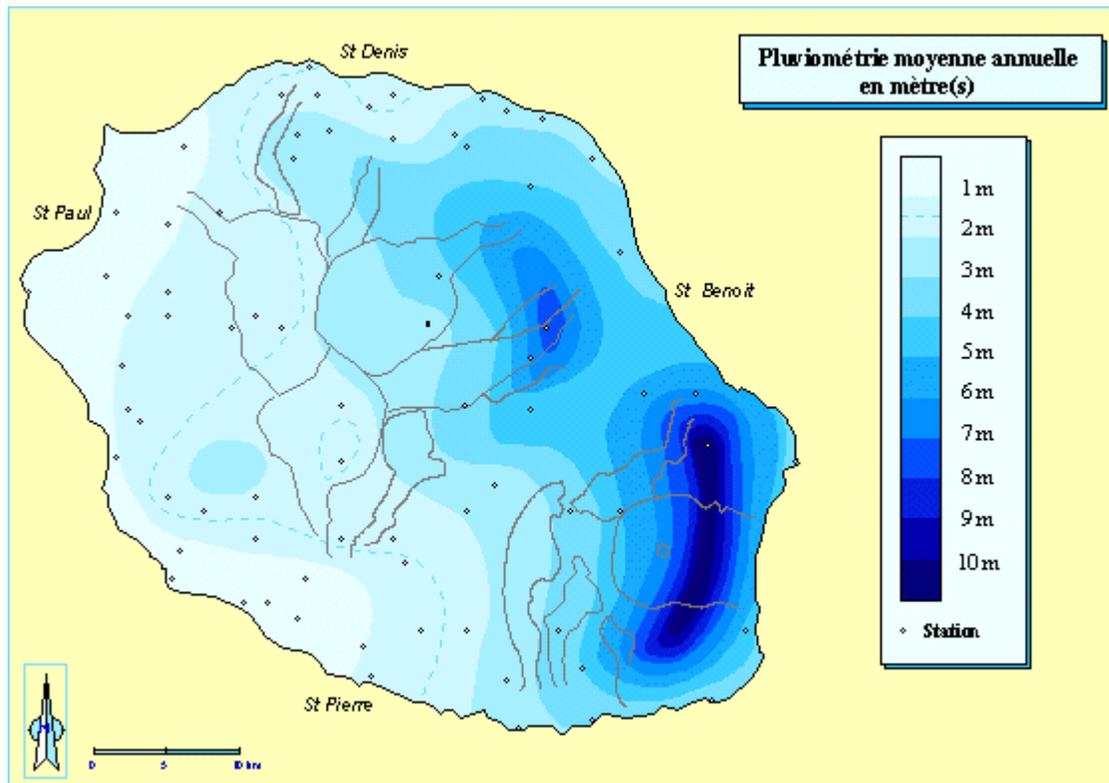


Figure 3. Carte des isohyètes annuelles (Météo France)

2.2 Variation de la température en fonction de l'altitude

La décroissance des températures avec l'altitude est un phénomène important à La Réunion.

Le gradient thermique vertical est de $-0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour 100m . Comme le relief est très accentué sur l'île, les lignes isothermes suivent le plus souvent les lignes de niveaux. La figure 4 ci-après présente cette corrélation.

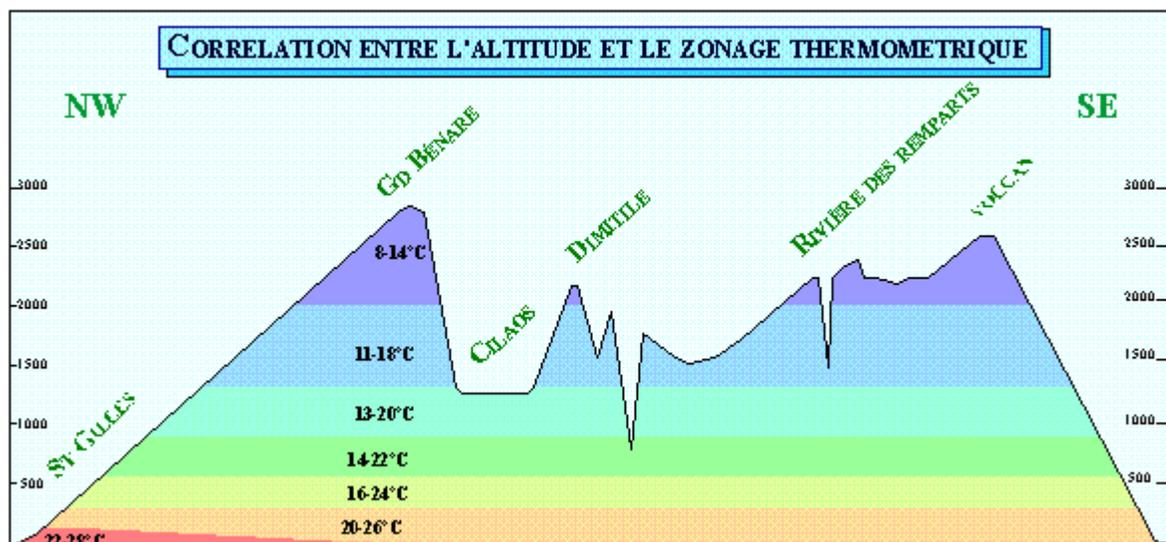


Figure 4. Corrélation entre l'altitude et le zonage thermométrique (Météo France)

Cette notion de gradient thermique est utile pour déterminer la température moyenne d'un lieu à partir des données d'une station météorologique située dans la même zone, mais à une altitude différente.

Annexe 3 : Conduite culturale de la canne

1. L'itinéraire technique

Les deux objectifs principaux dans la préparation des parcelles de canne à sucre sont la destruction efficace de la vieille récolte et la préparation un sillon qui assure la bonne germination des boutures.

La destruction de la vieille récolte peut être mécaniquement ou au moyen de produits chimiques.

1.1 La plantation

Il y a deux méthodes de plantation, à savoir manuel et mécanique. La plantation a lieu en général au début de la saison des pluies (de janvier à mars à la Réunion).

Les boutures de canne et l'engrais sont disposés manuellement bout à bout, dans le sillon puis couvertes de terre. Avec la plantation mécanique, les trois opérations sont conduites simultanément.

1.2 Les traitements azotés et phytosanitaires

De l'engrais peut être appliqué pour favoriser le développement de la plante. L'engrais peut être répandu à la main en utilisant un récipient correspondant à une longueur prédéterminée de rangée de canne.

Des distributeurs mécaniques peuvent également être employés pour appliquer l'engrais. Les méthodes de contrôle des mauvaises herbes sont réalisées à la main (sarclage) ou par l'application d'herbicides.

Etant donné l'importance de la densité et de la taille des tiges, l'accès des engins dans la parcelle est limité aux 6-8 premiers mois du cycle de croissance de la canne à sucre.

1.3 La récolte

A La Réunion, la première récolte a lieu 12 mois après la plantation, un peu après le début de la saison sèche. Les souches repartent ensuite en nouvelles tiges et l'on récolte à nouveau 12 mois plus tard.

Pour couper la canne, on pratique la coupe à la main ou la coupe mécanique.

La coupe à la main est pratiquée dans les pays de culture traditionnelle ou au relief très accidenté. Le coupeur tranche la canne avec un sabre au ras du sol, coupe le sommet, ou " bout blanc ", pauvre en sucre, et la range en " andains ". Le ramassage est ensuite effectué à la main ou à la machine.

La coupe mécanique est pratiquée dans les régions de grande culture. On utilise des machines qui coupent les cannes, les tronçonnent en segments et les chargent dans des véhicules qui les transportent à la sucrerie.

Le transport à la sucrerie doit s'effectuer rapidement car une fois coupée, la canne se détériore et perd son sucre.

2. Les deux principales variétés de canne à sucre réunionnaise

Les variétés R570 et R579 représentent plus de 85 % des cannes cultivées à La Réunion.

Les fiches techniques suivantes ont été réalisées par le CERF (Centre d'Essai, de Recherche et de Formation) de La Réunion. Depuis 1929, cet organisme est chargé de la sélection de nouvelles variétés (CERF, 2002)

2.1 La variété R 570



Photographie 2. La variété R570 (CERF, 2000)

Récolte

Toutes périodes de récolte Toutes zones sauf altitude : < 550 m Ouest / Sud, < 300 m dans l'Est

Description botanique

- Grande canne au tallage abondant et en forme de panier, port érigé, toujours droite même après brûlage. Son aspect général rappelle beaucoup celui de la H 32/8560.

- Feuille large, retombante au 1/3 supérieur de sa longueur, verte ; gaine très adhérente avec de nombreuses taches de Morve Rouge (caractère de R 445), ochréa brun rougeâtre ; auricule triangulaire de taille moyenne, présence de poils à la base ; ligule poilue sur face externe.

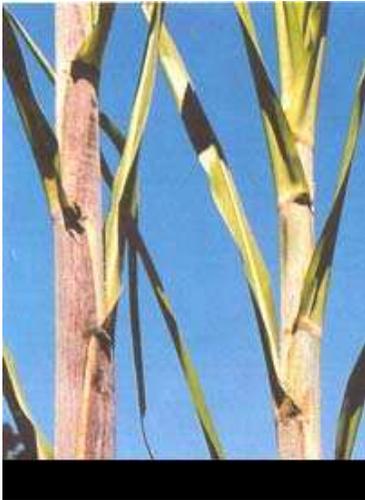
- Tige : entre-noeud assez long de diamètre assez gros, cylindrique ; jaune verdâtre, cireuse, présence fréquente de fumagine qui donne un aspect sale à la canne, tavelures ; pas de sillon sur Voieillon ; zone radriculaire de largeur constante cicatrice. Foliaire protubérante, oeil sphérique, sans poil.

- Fleurit peu ou pas, fleur longue, frêle, hampe florale très longue.

Caractères agronomiques

- Très large zone d'adaptation : zone sèche, irriguée, humide, sur-humide, sauf en altitude.
- Légère sensibilité à la Maladie de l'Ananas. Sensibilité observée à la Maladie de Fidji en Australie. Résistante aux autres maladies à la Réunion.
- Rendements forts en général.
- Bonne richesse tout le long de la campagne. Bonne tenue en repousses.
- Germe bien, à condition de prélever la semence sur des cannes âgées de 7 à 9 mois. Traitement fongicide des boutures indispensable.
- La forte adhérence des gaines rend l'épauillage des boutures difficile. C'est une source de propagation des cochenilles à la plantation.
- Cette variété a aujourd'hui la faveur des planteurs de l'île et a supplanté les autres variétés dans les nouvelles plantations.
- Résiste très bien à la récolte mécanique, à signaler cependant une certaine dureté de l'écorce qui nécessite un affûtage fréquent des couteaux des récolteuses.

2.2 La variété R579



Photographie 3. La variété R579 (CERF, 2000)

Récolte

Milieu - fin de campagne régions littorales humides ou irriguées.

Description botanique

- Feuilles larges, dressées, vert foncé. Gaine violet foncé très peu adhérente : se dépaille d'elle-même ; léger duvet sur les jeunes gaines.
- Ochréa foncé, auricule triangulaire qui se détache très vite des gaines en phase d'assèchement.
- Tiges très droites, port dressé, diamètre assez gros ; de couleur rosé à mauve violet foncé; tallage moyen.
- Entre-noeuds en général assez longs mais parfois irréguliers et raccourcis (marque la sécheresse); de forme très cylindrique; présence de cire sur la partie supérieure; peu de craquelures, quelques tavelures. Oeilleton plat, de forme triangulaire, suivi d'un sillon prononcé sur la moitié de l'entre- noeud. Anneau de croissance régulier de couleur identique à celle de l'entre-noeud.
- Très faible floraison en conditions normales.

Caractères agronomiques

- Forts rendements en canne dans les zones de basses altitudes et humides (Nord/Est et Est) et sous irrigation : sa plantation est à proscrire dans les zones sèches ou froides.
- Tiges très lourdes et denses; germination moyenne en vierge mais repousses très vigoureuses et croissance rapide avec la pluie ou l'irrigation.
- Tallage moyen : la souche demande un soin particulier vis à vis des mauvaises herbes. Le tallage s'amplifie avec les repousses.
- L'aspect droit très régulier et l'épillage naturel en font une variété qui devrait plaire aux agriculteurs : coupe manuelle et chargement facilités, et bonne adaptation à la mécanisation; il reste à préciser par l'expérience sa résistance au piétinement des engins.
- Richesse moyenne à forte en milieu et fin de campagne (ne fleurit pas).
- Pas de sensibilité aux maladies graves à la Réunion; on a pu observer quelques stries chlorotiques dans des conditions très humides et de sols gorgés d'eau.
- Variété assez sensible aux cyclones (casse au niveau de l'apex, sans doute le défaut lié à son "épillage facile").

Annexe 4 : Bases physiques de la télédétection

1. Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique (cf. figure 5) s'étend des courtes longueurs d'onde (les rayons gamma et les rayons X par exemple) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio).

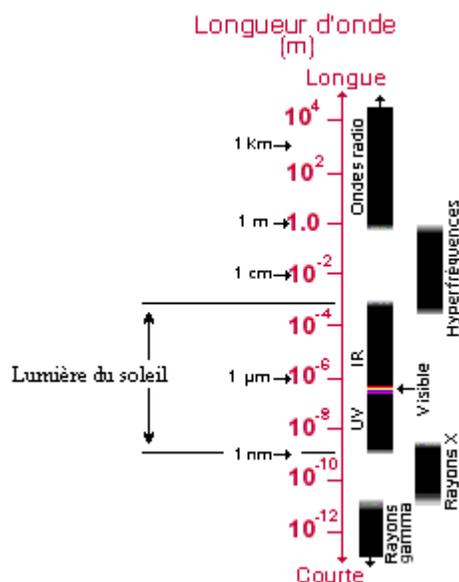


Figure 5. Le spectre électromagnétique (Dictionnaire Larousse, 1999)

Les grands domaines spectraux qui intéressent l'étude de la végétation par télédétection sont :

- le visible (400 – 700 nm) ;
- le proche infra-rouge (700 – 1300 nm) ;
- l'infra-rouge moyen (1300 – 2500 nm).

Dans le visible et le proche infra-rouge, le soleil constitue la source de rayonnement électromagnétique et les récepteurs de télédétection enregistrent l'énergie solaire réfléchi par les objets de la surface de la surface terrestre.

2. Principe de réflectance

Lorsqu'un rayonnement rencontre une surface, il se décompose en trois résultantes de l'interaction (cf. figure 6).

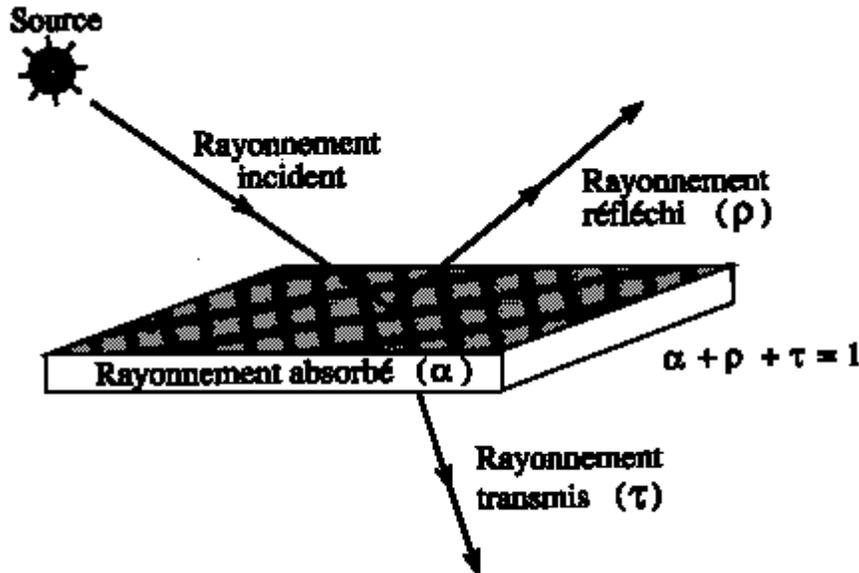


Figure 6. Résultantes de l'interaction entre le rayonnement incident et la surface
(Bonn et Rochon, 1992)

La surface absorbe une partie de l'énergie apportée par le rayonnement incident (absorptance), une autre portion du rayonnement est transmise au travers de la surface (une surface transparente possède par exemple une transmittance élevée).

Enfin, une partie du rayonnement incident peut être réfléchi. Le rapport entre l'énergie totale apportée par le rayonnement incident et l'énergie réfléchie est appelé réflectance est exprimée en pourcentage. C'est cette résultante qui intéresse notre étude.

La réflexion s'accompagne d'une modification spectrale du rayonnement incident, qui constitue la base des signatures spectrales. Les modifications spectrales sont fonctions de la surface considérée. Le rayonnement réfléchi issu de cette interaction est donc propre au comportement spectral de la surface considérée.

Le comportement spectral des objets permet d'analyser et d'interpréter les données radiométriques issues de la réflexion du rayonnement incident.

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.

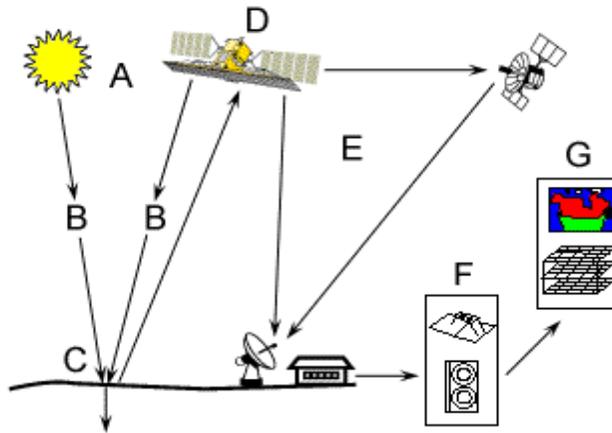


Figure 7. Le processus de télédétection

En utilisant des systèmes imageurs passifs tels que ceux employés par notre étude, le processus de la télédétection est composé des sept étapes suivantes (cf. figure 7) :

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 parcelles de canne à sucre.

Rayonnement et atmosphère (B) - Durant son parcours entre le soleil et les champs de cannes, 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.

Interaction avec la cible (C) - Une fois parvenue aux parcelles de cannes à sucre, l'énergie interagit avec la surface du couvert végétal. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés biologiques et structurales du feuillage.

Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) - Une fois le rayonnement réfléchi par le couvert végétal, il doit être capté à distance par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible pour être enfin enregistrée. L'un des capteurs utilisés pour l'étude est monté sur un avion et enregistre à 2500 m d'altitude l'énergie du rayonnement réfléchi.

Transmission, réception et traitement (E) - L'énergie enregistrée par le capteur est transmise à une station de réception où l'information est transformée en images numériques. Les traitements consistent à effectuer des corrections atmosphériques, radiométriques et géométriques sur les images produites.

Interprétation et analyse (F) - Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur les parcelles de canne.

Application (G) - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour observer l'état des cultures (cartographie de paramètres biologiques). Si l'on dispose suffisamment d'images successives, le suivi de l'évolution des champs de canne à sucre est envisageable.

Annexe 5 : La télédétection appliquée aux couverts végétaux

1. La réflectance d'un couvert végétal : comportement spectral

Comme pour tous les êtres vivants, il y a autant de cas de figure qu'il y a d'individus. De plus, il faut distinguer le comportement spectral de feuilles isolées de celui d'un individu d'une espèce donnée et d'un peuplement d'individus de la même espèce et de la même variété (Girard, 1989). Il faut donc différencier les observations réalisées en laboratoire de celles effectuées en plein champ.

Néanmoins, pour des couverts végétaux chlorophylliens denses (pour lesquels la contribution spectral du sol est négligeable), quel que soit le niveau de perception et les espèces considérés, les comportements spectraux sont semblables, même si dans le détail, les valeurs de réflectance peuvent beaucoup varier (Girard, 1999).

1.1 Au laboratoire

Les spectres de réflectance d'absorbance et de transmittance, réalisés en laboratoire sont similaires pour des feuilles chlorophylliennes, quelles que soient les espèces (cf. figure 8). On distingue trois types de comportements correspondant aux grands domaines spectraux :

- dans le visible, la végétation présente un comportement spectral particulier dû à l'existence de pigments chlorophylliens ;
- dans le proche infra-rouge, il est lié à la structure des tissus ;
- dans l'infra-rouge moyen réflectif, c'est principalement la teneur en eau de ces derniers qui intervient.

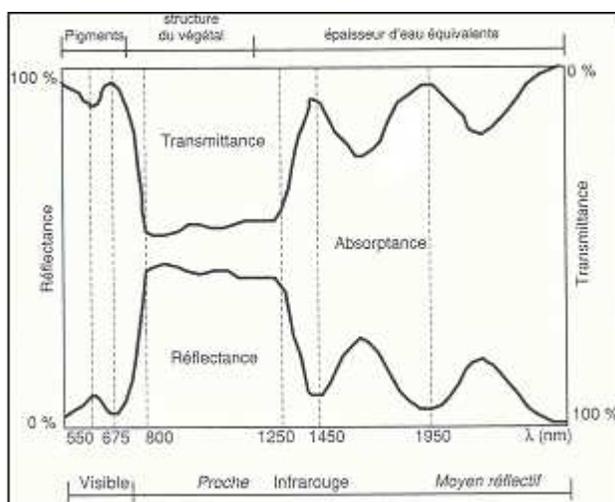


Figure 8. Absorbance, réflectance, transmittance pour un végétal chlorophyllien (Guyot, 1997)

Dans le visible, les végétaux présentent une réflectance faible (au maximum 15 %), avec un maximum à 550 nm. Cela est dû aux pigments, particulièrement les chlorophylles a et b, qui présentent deux bandes d'absorption dans le bleu (450 nm) et le rouge (660 nm).

Dans ce domaine, le comportement spectral d'un végétal sénescent ou desséché est complètement différent de celui d'un végétal chlorophyllien (cf. figure 9). Pour une espèce donnée, dans l'ensemble du spectre visible les valeurs de réflectance des feuilles vertes sont toujours inférieures à celles des feuilles sèches.

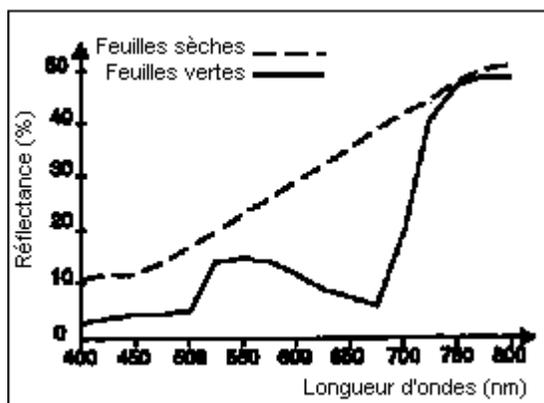


Figure 9. Courbes de réflectance de feuilles vertes et sèches de brachypode penné, prélevées sur les mêmes individus (Girard, 1999)

Dans le proche infra-rouge, les pigments n'interviennent plus dans le comportement spectral, la quantité de rayonnement absorbée par les feuilles est très faible.

La structure interne du feuillage, en particulier les différents tissus et les arrangements de cellules et d'espaces intercellulaires, est principalement responsable des différentes valeurs de réflectance.

Dans l'infra-rouge moyen, le comportement spectral des feuilles est principalement affecté par la teneur en eau des cellules. Une plante verte turgescente aura de faibles valeurs de réflectance dans ce domaine spectral. En revanche, si sa teneur en eau diminue par l'effet de la sénescence ou suite à une maladie, sa réflectance augmentera.

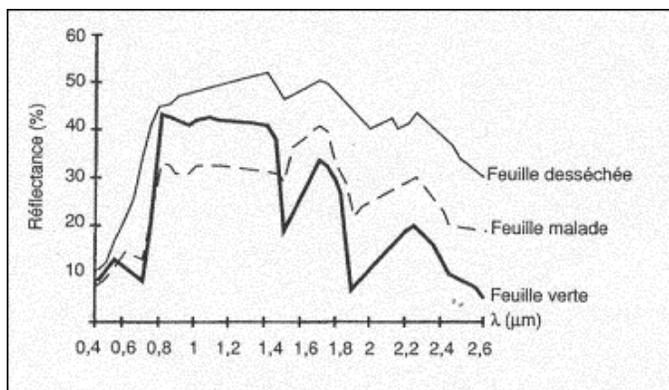


Figure 10. Variations de la réflectance d'une feuille selon son état physiologique (Girard, 1999)

Les changements physiologiques (teneur en pigments, structure interne des tissus, teneur en eau) qui accompagnent les phénomènes de maturation et de sénescence sont responsables de changements importants du comportement spectral dans le visible et l'infra-rouge (cf. figure 10). Les végétaux sénescents (jaunes et secs) ont des valeurs de réflectance toujours plus fortes dans ces deux domaines spectraux que les végétaux verts et bien turgescents.

1.2 Au champ

Lorsque l'on passe à des mesures terrain, plusieurs cas peuvent se présenter suivant le degré de couverture végétale de la culture.

Dans le cas où la végétation recouvre complètement le sol (100 % de recouvrement), le comportement spectral se rapproche de celui des feuilles mesurées au laboratoire.

Si la végétation a un faible recouvrement (inférieur à 20-30 %), le comportement spectral sera voisin de celui d'un sol nu.

Enfin, si le recouvrement est intermédiaire, il faut envisager tout les cas de figure situés entre les deux précédents.

Dans le cas de couverts végétaux plus ou moins couvrants, il faut prendre en compte les variations induites par la structure de la canopée.

On distingue, selon l'angle d'inclinaison des feuilles par rapport à l'horizontale, les végétaux planophylles (angles proche de 0°), les végétaux érectophylles (angles proche de 90° , cas des graminées) et les cas intermédiaires : végétaux plagiophylles (feuilles inclinées) et extrémophylles (feuilles dressées).

A cet effet d'orientation des feuilles s'ajoute, pour les plantes cultivées, l'effet de rang.

Tout comme pour une feuille isolée, la réflectance d'un couvert végétal varie en fonction de stade phénologique et d'état physiologique (cf. figure 11).

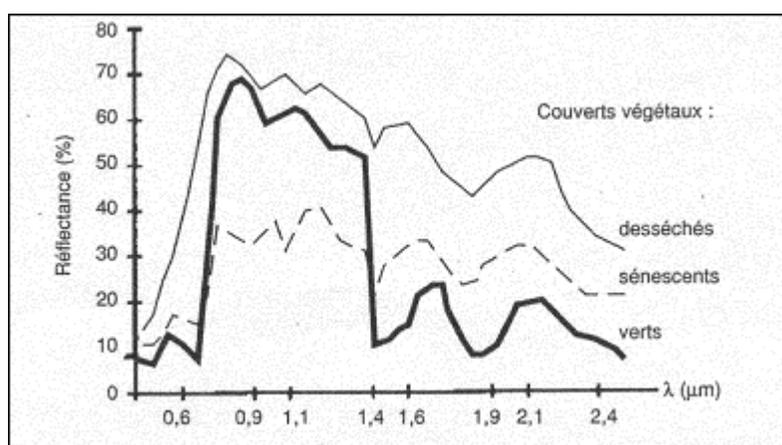


Figure 11. Réflectance de couverts végétaux dans divers états physiologiques (Girard, 1999)

Sur des couverts sénescents, on observe une diminution de la réflectance dans le proche infra-rouge qui correspond aux effets combinés du changement de la structure interne et du port des feuilles qui deviennent moins couvrantes.

2. Indices de végétation

Le principe des indices de végétation consiste à réaliser des combinaisons (somme, différence, rapport, combinaison linéaire) de réflectances dans différentes longueurs d'onde, dans le but d'estimer un paramètre caractéristique de la végétation. Ils s'appuient essentiellement 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, 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 du 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 des sols...

Nous présenterons les 5 indices de végétation que nous utilisons dans notre étude.

2.1 L'indice RIV (Ratio Vegetation Index)

C'est le ratio le plus simple, son expression est la suivante :

$$\text{RVI} = \frac{\text{Réflectance pIR}}{\text{Réflectance Rouge}}$$

2.2 L'indice pigmentaire V/R

C'est également un ratio simple, son expression est la suivante :

$$\text{R/V} = \frac{\text{Réflectance Vert}}{\text{Réflectance Rouge}}$$

Ce ratio fait appel aux réflectances les plus liées au comportement des pigments chlorophylliens. Cet indice permet d'évaluer le changement de couleur d'un couvert végétal chlorophyllien, surtout à la sénescence lorsque les feuilles se dessèchent.

2.3 L'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

L'expression du NDVI est la suivante :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{Réflectance pIR} - \text{Réflectance Rouge}}{\text{Réflectance pIR} + \text{Réflectance Rouge}}$$

Cet indice développé par Tucker (1979) est le plus connu. Le NDVI 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.

2.4 L'indice MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index)

Cet indice est issu de la modification de l'indice SAVI.

L'indice SAVI a été développé par Huete (1988) dans le but de prendre en compte la contribution spectrale du sol sous-jacent au couvert végétal étudié.

Dans le but de réduire l'effet du sol, Huete (1988) suggère d'utiliser un facteur d'ajustement L et propose l'indice SAVI dont l'expression est la suivante :

$$\text{SAVI} = \frac{\text{Réflectance pIR} - \text{Réflectance Rouge}}{\text{Réflectance pIR} + \text{Réflectance Rouge} + L} \cdot (1 + L)$$

où L est une constante égale à 0,5.

Cependant chaque sol possède des caractéristiques de réflectances spectrales propres. De plus, la contribution spectrale du sol est forcément plus importante lorsque le niveau de couverture végétale est faible. Ce facteur d'ajustement L limite l'ajustement proposé par l'indice SAVI.

C'est pourquoi l'indice MSAVI a été développé par Qi et al. (1994). L'objectif est de remplacer la constante L du SAVI par un facteur L lié aux conditions locales.

L'indice MSAVI permet au facteur L d'adopter des valeurs s'échelonnant de 0 (pour un niveau de couverture végétale très élevé) à 1 (pour un niveau faible) en fonction de la contribution spectrale du sol.

L'expression de l'indice MSAVI est la même que celle de l'indice SAVI. La modification intervient sur le facteur L qui est déterminé par une fonction :

$$\text{MSAVI} = \frac{\text{Réflectance pIR} - \text{Réflectance Rouge}}{\text{Réflectance pIR} + \text{Réflectance Rouge} + L} \cdot (1 + L)$$

avec $L = 1 - 2 \alpha \text{NDVI} \cdot \text{WDVI}$;

où :

α est la pente de la droite « soil line » du sol, établie sur le terrain

$\text{WDVI} = \text{Réflectance pIR} - \alpha \cdot \text{Réflectance Rouge}$.

L'indice WDVI (Weighted Difference Vegetation Index) a été développé lors de recherches antérieures par Richardson et Wiegand (1977).

L'utilisation de cet indice nécessite la détermination de la droite « soil line » qui est propre à chaque type de sol. La courbe « soil line » est déterminée en mesurant le réflectance du sol dans le rouge et le pIR à divers niveaux d'humidité. Les réflectances évoluent proportionnellement en fonction des contrastes du sol (sol mouillé plus sombre que sol sec).

La pente de la droite ainsi obtenue caractérise la contribution spectrale du sol dans le rouge et le pIR.

L'utilisation des indices de végétation n'est pas l'unique façon de rapprocher les valeurs de réflectances aux paramètres biologiques d'un couvert végétal. Des relations multilinéaires faisant intervenir les réflectances de plusieurs bandes spectrales du domaine visible sont également envisageables (Qi et al., 2000).

2.5 L'indice PRI (Photochemical Reflectance Index)

Cet indice a été développé par Gamon et al. (1992) dans le but d'obtenir de meilleures corrélations entre les propriétés chimiques d'un couvert végétal et ses propriétés optiques.

Son expression est la suivante :

$$\text{PRI} = \frac{\text{Réflectance 530nm} - \text{Réflectance 570nm}}{\text{Réflectance 530nm} + \text{Réflectance 570nm}}$$

L'indice PRI est un indicateur performant de l'activité photosynthétique et à l'échelle de la feuille et de la canopée. Il permet également d'évaluer l'évolution des besoins en nutriment d'une culture (Gamon et al., 1997).

Annexe 6 : Fiche technique du LAI-2000 Plant Canopy Analyzer



Photographie 4. Le LAI-2000 (LI-COR, 2003)

L'appareil est doté d'une lentille hémisphérique et d'un système optique constitué de 5 angles de visée : 7° , 23° , 38° , 53° , 68° (cf. figure 12).

Lorsqu'un rayonnement est projeté sur la lentille, le système optique le dirige vers 5 capteurs concentriques. Chaque anneau perçoit une portion différente de la canopée selon son angle de visée. C'est en intégrant ces 5 mesures que le LAI-2000 calcule le LAI et son écart-type.

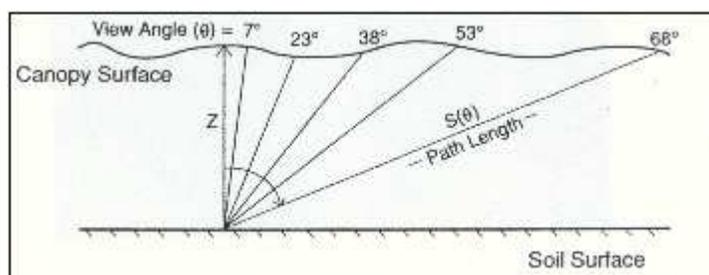


Figure 12. Les angles de visée des 5 capteurs concentriques du LAI-2000 (LI-COR, 1990)

Le calcul du LAI est basé sur 4 hypothèses concernant le couvert végétal :

- Le feuillage est noir. Cela suppose que les mesures prises sous le couvert ne prennent pas en compte le rayonnement réfléchi ou passant à travers le feuillage.
- Les éléments du feuillage occupent individuellement une faible part de l'aire mesurée par chaque anneau.
- La distribution du feuillage est homogène et contenue dans un certain volume foliaire.
- L'orientation et l'angle foliaire sont aléatoires. Ainsi, l'inclinaison du feuillage importe peu.

A partir de ces hypothèses sur les caractéristiques radiométriques et géométriques du couvert végétal, l'intensité directe du rayonnement permet de calculer le LAI.

Annexe 7 : Fiche technique du SPAD-502 de Minolta™



Photographie 5. Le SPAD-502 de Minolta™

L'appareil SPAD-502 fournit une mesure du contenu en chlorophylle des feuilles.

La valeur des mesures est calculée à partir du pourcentage de lumière traversant la feuille dans 2 longueurs d'onde spécifiques.

Dans le rouge (620 à 700 nm), l'absorptance de la chlorophylle est la plus élevée et dans le proche infra-rouge (700 à 1300 nm), elle est négligeable.

Deux sources lumineuses éclairent l'échantillon de feuille dans le rouge ($\lambda=650$ nm) et le proche infrarouge ($\lambda=940$ nm).

Les ondes électromagnétiques qui passent à travers l'échantillon sont captées par un récepteur.

L'appareil transforme et amplifie l'information en signaux digitaux.

Ces derniers sont traités par un microprocesseur, propriété de Minolta, qui indique alors le Q_u en dessous de la feuille.



Photographie 6. Prise de mesure avec le SPAD-502

Annexe 8 : Fiche technique du radiomètre de terrain Cimel CE-310

Le radiomètre de terrain CE-310 comporte 3 éléments :

- une tête de luminance destinée à viser le sol.
- une tête d'éclairement destinée à viser le ciel.
- un coffret de lecture.

Pour réaliser les mesures en plein champ, la tête de luminance et la tête d'éclairement sont fixées sur une potence. La potence comprend un mât télescopique pouvant atteindre 2 m. La canne à sucre pouvant mesurer plus de 4 m, le mât a été rallongé pour développer près de 4,5 m. Pour les hauteurs de canopée extrêmes, le mât est porté et stabilisé à mi-hauteur d'homme.

Dans tous les cas de figures, la tête de luminance est située à plus d'un mètre de la canopée.

Un bras horizontal d'une longueur de 1 m décale la zone de mesure. Les données obtenues ne sont pas parasitées par la présence de l'utilisateur. De plus, une rotule est vissée au bout de ce bras. Cette rotule assure la verticalité du capteur indépendamment de la position du mât.



Photographie 7. Le radiomètre de terrain Cimel CE-310

Le principe de calcul de la réflectance est relativement simple.

Un circuit diviseur effectue le rapport de la luminance à l'éclairement et délivre un signal proportionnel à la réflectance. Un convertisseur analogique digital détermine la réflectance sur une échelle de 0 à 100 %.

Annexe 9 : Présentation du CASI

1. Les composants du CASI

L'appareil est composé de 4 unités (cf. figure 13).

- L'unité capteur (*Sensor Head*) contient le spectrographe et le capteur CCD (*Coupled Charge Device*) bidirectionnel. Cette unité est fixée sur l'avion ou l'hélicoptère.
- L'unité vidéo (*Video Display Unit*) fournit une visualisation en temps réel. L'écran affiche également une visualisation spectrale (histogramme) permettant de rendre compte de l'intensité du signal acquis.
- L'unité de commande (*Control Unit*) permet l'interactivité entre l'appareil et l'utilisateur. A l'aide du clavier, l'utilisateur peut contrôler l'acquisition des données et les paramètres de configuration du capteur. Il est également possible de changer les canaux d'acquisition en cours de vol.
- L'unité d'alimentation (*Power Supply Unit*) fournit l'énergie nécessaire à l'ensemble du système.

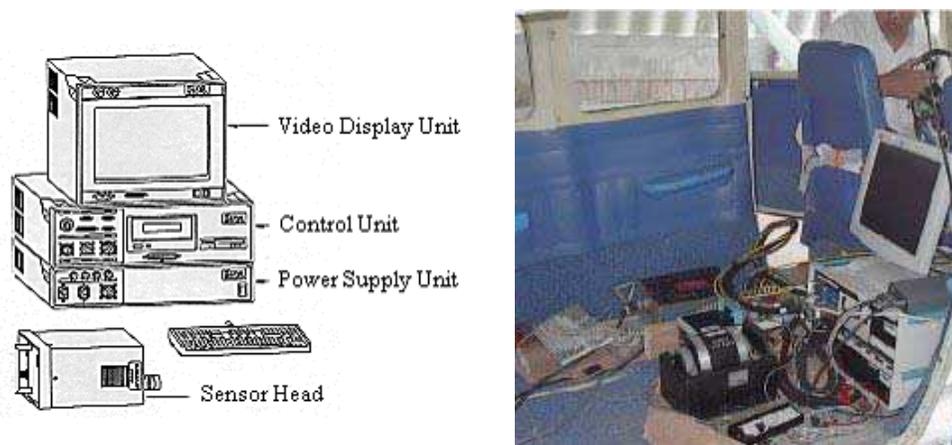


Figure 13. Les unités du système (Itres[®], 2001 ; Despinoy, 2002)

2. Mode de fonctionnement sélectionné

Le CASI possède divers modes de fonctionnement.

Nous utilisons le mode spatial qui permet d'acquérir 512 pixels en travers de la ligne de vol. A chaque pixel correspond jusqu'à 19 bandes spectrales distinctes dont on programme au préalable le centre et la largeur.

3. Principe de création d'une image brute

Le système optique du spectrographe (*Spectrograph Optics*) permet d'acquérir les données d'une ligne (*Scan line*) perpendiculaire à la ligne de vol (*Flight path*).

Le capteur CDD bidimensionnel répartit les données spatiales et spectrales selon deux axes. Il en résulte une matrice décrivant un spectre pour chacun des 512 pixels de la ligne d'acquisition (cf. figure 14).

Les données spatiales et spectrales sont synchronisées automatiquement. En effet, tous les éléments du capteur sont exposés simultanément.

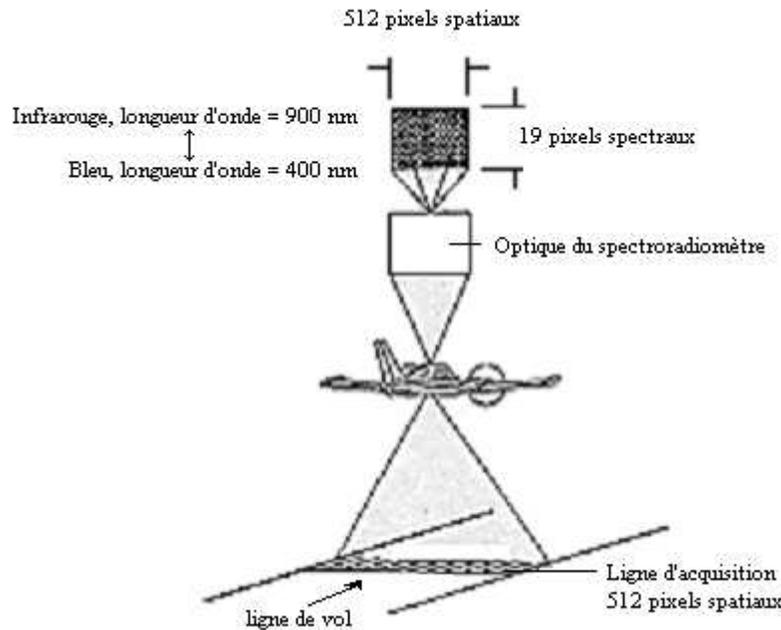


Figure 14. Principe de création d'une image brute (Source : Itres[®], 2001)

La vitesse de progression de l'avion est calée sur la fréquence de répétition des prises de données. Ainsi, le long de la ligne de vol, se dessine une image de la scène en deux dimensions avec une information spectrale.

En travers de la ligne de vol, la résolution spatiale est déterminée par l'altitude de l'avion et le champ de visée du capteur. Tandis que le long de la ligne de vol, la résolution spatiale dépend de la vitesse de l'avion et du temps d'intégration des données par le système.

4. Correction simultanée du gyroscope

Un gyroscope installé dans l'avion permet d'enregistrer les données du roulis, du tangage et des lacets de l'avion en même temps que les images.

De plus, des antennes GPS enregistrent les positions exactes de l'avion pendant l'acquisition des données.

Les données enregistrées par le gyroscope et le GPS doivent être synchronisées avec l'image.

Malgré les corrections apportées par les données du gyroscope, il est nécessaire d'effectuer une correction géométrique des images.

Les corrections sont réalisées à partir d'un logiciel de traitement d'image. On peut utiliser plusieurs sources pour corriger géographiquement l'image : des point GPS, une carte ou un fond topographique numérisé.

Annexe 10 : Indices de végétation hyperspectraux utilisés dans cette étude

(R γ correspond à la réflectance à γ nm)

Indices de structure d'un couvert végétal :

Normalized Difference Vegetation Index (Rouse et al., 1974) :

$$\text{NDVI} = \frac{(R_{794} - R_{679})}{(R_{794} + R_{679})}$$

Renormalized Difference Vegetation Index (Rougean et Breon, 1995) :

$$\text{RDVI} = \frac{(R_{794} - R_{679})}{\sqrt{(R_{794} + R_{679})}}$$

Modified Simple Ratio (Chen, 1996) :

$$\text{MSR} = \frac{\left(\frac{R_{794}}{R_{679}} + 1\right)}{\sqrt{\left(\frac{R_{794}}{R_{679}} + 1\right)}}$$

Soil Adjusted Vegetation Index (Huete, 1988) :

$$\text{SAVI} = \frac{(1 + L) \times (R_{794} - R_{679})}{(R_{794} + R_{679} + L)}$$

avec $L = 0.5$

Modified Soil Adjusted Vegetation Index (Qi et al., 1994) :

$$\text{MSAVI} = \frac{1}{2} \left[2R_{794} + 1 - \sqrt{((2R_{794} + 1)^2 - 8(R_{794} - R_{679}))} \right]$$

Soil and Atmospherically Resistant Vegetation Index (Kaufman et Tanre, 1992) :

$$\text{SARVI} = \frac{(1 + L)(R_{794} - R_{rb})}{(R_{794} + R_{rb} + L)}$$

avec $R_{rb} = R_{679} - (R_{410} - R_{679})$

Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (Kim *et al.*, 1994) :

$$\text{MCARI} = [(R704 - R679) - 0.2(R704 - R557)] \times \frac{R704}{R679}$$

Triangular Vegetation Index (Broge et Leblanc, 2000) :

$$\text{TVI} = 0.5[120(R739 - R557) - 200(R679 - R557)]$$

Triangular Vegetation Index 1 (Haboudane *et al.*, 2004) :

$$\text{TVI1} = 1.2[1.2(R794 - R557) - 2.5(R679 - R557)]$$

Indices de la composition biochimique d'un couvert végétal :

Simple Ratio Pigment Index (Peñuelas *et al.*, 1995) :

$$\text{SRPI} = \frac{R410}{R679}$$

Photochemical Reflectance Index (Gamon *et al.*, 1997) :

$$\text{PRI} = \frac{(R524 - R575)}{(R524 + R575)}$$

Normalized Pigment Chlorophyll ratio Index (Peñuelas *et al.*, 1994) :

$$\text{NPCI} = \frac{(R679 - R410)}{R679 + R410}$$

Single Ratio (Carter, 1994) :

$$\text{SR} = \frac{R784}{R679}$$

Lichtenthaler indice (Lichtenthaler, 1988) :

$$\text{Lich} = \frac{(R794 - R679)}{(R794 + R679)}$$

Vogelmann indices (Vogelmann *et al.*, 1993) :

$$\text{Vogel1} = \frac{R739}{R719} \quad \text{Vogel2} = \frac{(R739 - R784)}{(R704 - R719)}$$

Annexe 11 : Tableau récapitulatif des mesures enregistrées lors de la première expérimentation

Localisation et variété	Points	Stade (mois)	LAI (m ² /m ²)	% Couverture	% Trou	Spad	Taux d'azote (g/kg m.s.)
Est-R579							
	C11,P1	2	0,83	*	*	38,3	15,88
	C11,P2	2	*	*	*	40,5	16,80
	C11,P4	2	*	*	*	37,2	15,43
	C11,P1	3	2,22	*	*	40,1	16,63
	C11,P2	3	2,18	*	*	38,9	16,13
	C11,P4	3	2,02	*	*	37,8	15,68
	C11,P1	4	2,18	*	*	39,9	16,55
	C11,P2	4	2,63	*	*	40,4	16,75
	C11,P4	4	2,21	*	*	39,9	16,55
	MARIE	4	2,56	*	*	29,1	12,07
	MARIE	5	2,84	*	*	32,4	13,44
	MARIE	6	*	*	*	37,1	15,39
	C25,P2	7	3,86	0,82	0,18	35,4	14,68
	C25,P3	7	3,86	0,86	0,14	37,4	15,51
	C25,P4	7	3,84	0,78	0,22	37,7	15,63
	C25,P1	8	3,84	0,85	0,16	36,8	15,26
	C25,P2	8	3,84	0,74	0,26	36,5	15,14
	C25,P3	8	3,84	0,71	0,29	37,3	15,47
	C25,P4	8	3,29	0,74	0,27	38	15,76
	C25,P1	9	5,09	*	*	35,8	14,85
	C25,P2	9	3,91	*	*	34,8	14,43
	C25,P3	9	4,05	*	*	35,3	14,64
	C25,P4	9	3,96	*	*	36	14,93
	C03, P1	10	3,97	0,82	0,18	29	12,03
	C03,P2	10	4,02	0,86	0,14	26,4	10,95
	C03,P3	10	4,06	0,86	0,14	34,1	14,14
	C03,P1	11	4,19	0,89	0,11	34,7	14,39
	C03,P2	11	4,19	0,87	0,13	31,5	13,06
	C03,P3	11	*	*	*	36,7	15,22
	C07,P1	12	3,90	*	*	33	13,69
	C07,P2	12	4,02	0,87	0,13	32,6	13,52
	C07,P3	12	4,22	0,88	0,12	32,1	13,31
	C07,P4	12	4,05	0,89	0,11	30,1	12,48
	C07,P1	13	4,10	0,84	0,16	34,6	14,35
	C07,P2	13	4,06	0,83	0,17	35,9	14,89
	C07,P3	13	4,31	0,93	0,07	36,3	15,05
	C07,P4	13	4,32	0,94	0,07	35,1	14,56

Est-R570	B66	2	0,43	*	*	40,9	16,96
	B66	3	1,60	*	*	37,05	15,36
	B66	4	0,79	*	*	39,7	16,46
	B05,P1	8	3,84	0,75	0,25	32,1	13,31
	B05,P2	8	3,99	0,83	0,17	30,7	12,73
	B05,P3	8	4,07	0,86	0,14	29,9	12,40
	B05,P4	8	4,08	0,90	0,10	29,7	12,32
	B05,P1	9	3,75	0,89	0,11	30,3	12,57
	B05,P2	9	*	0,95	0,05	29,9	12,40
	B05,P3	9	4,21	0,94	0,06	30,4	12,61
	B05,P4	9	4,00	0,91	0,09	28,7	11,90
	B30,P1	9	4,01	0,85	0,15	32,4	13,44
	B30,P2	9	3,90	0,83	0,17	32,9	13,64
	B30,P3	9	3,98	0,86	0,14	31	12,86
	B30,P4	9	3,99	0,90	0,10	30,3	12,57
	B30,P1	10	3,62	0,84	0,16	30,3	12,57
	B30,P2	10	4,21	0,92	0,08	30,5	12,65
	B30,P3	10	4,13	0,89	0,11	29,5	12,23
	B30,P4	10	3,97	0,91	0,10	29,8	12,36
	B03,P1	11	3,72	0,91	0,09	29,5	12,23
	B03,P2	11	3,07	0,78	0,22	30,5	12,65
	B03,P3	11	3,63	0,90	0,11	31,1	12,90
	B03,P4	11	4,19	0,88	0,12	31,8	13,19
	B03,P1	11	4,04	0,80	0,20	30,3	12,57
	B03,P2	11	3,84	0,78	0,22	30,1	12,48
	B03,P3	11	4,06	0,87	0,14	32,1	13,31
	B03,P4	11	4,15	0,93	0,07	32,5	13,48
	Ouest-R579	CUV2,P1	7	3,57	0,47	0,53	33,1
CUV2,P2		7	3,73	0,67	0,33	34,1	14,14
CUV2,P1		8	3,81	0,69	0,31	31,4	13,02
CUV2,P2		8	3,92	0,74	0,26	31,8	13,19
CUV3,P1		9	3,78	0,79	0,21	31,1	12,90
CUV3,P2		9	3,88	0,73	0,27	27,2	11,28
CUV3,P1		10	4,11	0,84	0,16	27,8	11,53
CUV3,P2		10	4,28	0,91	0,09	30	12,44
CUV1,P1		12	3,89	0,86	0,15	30	12,44
CUV1,P2		12	3,81	0,77	0,23	32,4	13,44
CUV1,P1		13	3,97	0,87	0,13	26,2	10,87
CUV1,P2		13	4,02	0,90	0,10	28,6	11,86
Ouest-R570		KALI3	8	3,48	0,37	0,63	19,2
	KALI3	9	2,65	0,64	0,36	17,6	7,30
	KALI2,P1	10	3,89	0,75	0,25	29,4	12,19
	KALI2,P2	10	4,04	*	*	28,7	11,90

KALI2,P3	10	3,96	0,57	0,43	25,9	10,74
KALI2,P1	11	4,05	0,91	0,09	28,9	11,98
KALI2,P2	11	4,36	0,94	0,06	23,3	9,66
KALI2,P3	11	4,09	0,91	0,09	24	9,95

Annexe 12 : Caractéristique des capteurs embarqués sur SPOT

1. Les Capteurs HRV et HRVIR

Cinq satellites SPOT ont été lancés jusqu'à présent : SPOT1 lancé le 26 février 1986, SPOT2 lancé le 22 janvier 1990, SPOT3 le 26 septembre 1993, SPOT4 lancé le 20 mars 1998 et SPOT5 en 2002. Quatre sont en fonctionnement ; la défection de SPOT3 en fin 1996 a amené la remise en service de SPOT1 en janvier 1997. SPOT1, 2 et 3 sont équipés de capteurs dits HRV, pour Haute Résolution Visible, SPOT4 de capteurs HRVIR pour Haute Résolution Visible et InfraRouge et d'un radiomètre grand champ appelé VÉGÉTATION. SPOT5 diffère de ses prédécesseurs, entre autres par ses caméras permettant une vue stéréoscopique.

2. Caractéristiques

2.1 Orbitographie

L'orbite des satellites SPOT est héliosynchrone et quasi polaire (nœud descendant à 10h30 en temps local). Ils se trouvent à une altitude de 822 km et ont un cycle de 26 jours.

2.2 Répétitivité

Les miroirs de SPOT permettent une inclinaison de $\pm 27^\circ$ par rapport au nadir, perpendiculairement à la trace et le champ de visée est d'environ 4 degrés (60 kilomètres au sol). Ceci permet une répétitivité des mesures d'environ trois jours.

2.3 Bandes spectrales

SPOT1 et SPOT2 comportent deux caméras, HRV1 et HRV2, avec chacune leur système de filtres. Deux modes d'observation sont utilisés :

- le mode multispectral, qui comprend les bandes B1 (510 à 610 nm), B2 (610 à 680 nm) et B3 (790 à 890 nm), utilise 3000 détecteurs CCD et a une résolution au sol de 20 mètres
- le mode panchromatique, qui comprend une unique bande (510 à 730 nm), utilise 6000 détecteurs CCD et a une résolution au sol de 10 mètres.

SPOT4 dispose de deux caméras HRVIR et du radiomètre Végétation. Les deux caméras HRVIR utilisent quatre canaux : B1, B2 et B3, semblables à ceux de SPOT1 et 2, et d'un quatrième canal, MIR (pour Mid Infra-Red). Végétation a quatre canaux : B2, B3, MIR, plus un canal B0 centré à 450 nm.

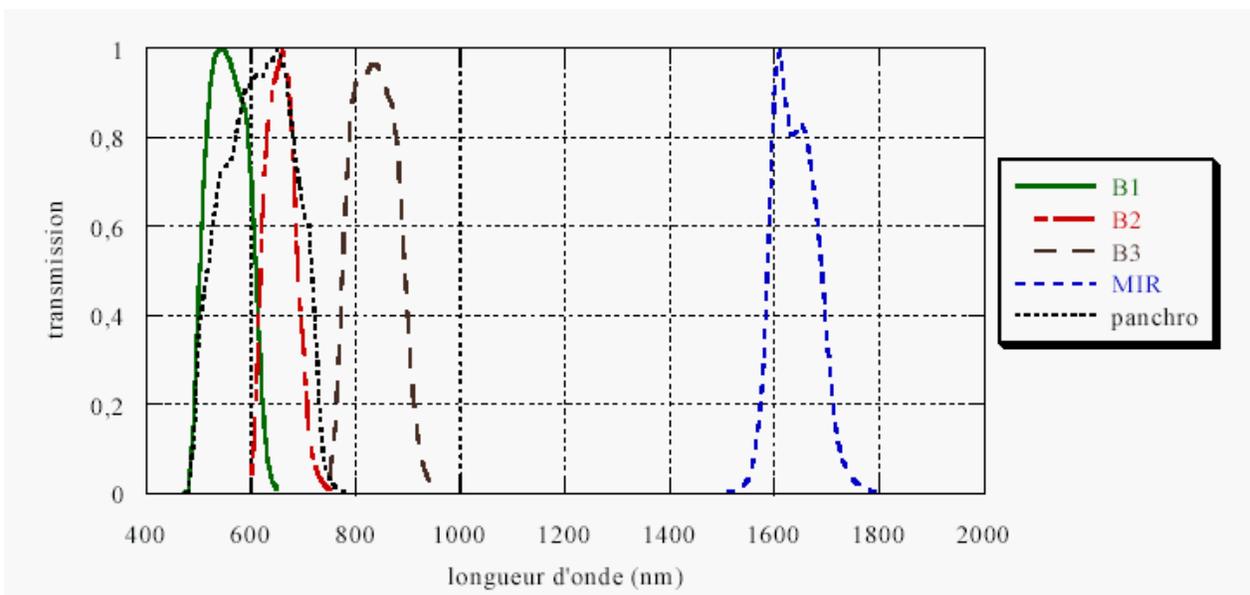


Figure 15. Transmission des bandes de HRVIR1-SPOT4 et de la bande panchromatique de HRV1-SPOT1

La figure 15 représente la transmission des quatre canaux de HRVIR1 sur SPOT4 (Meygret *et al.*, 1999).

Annexe 13 : Résultats de l'analyse de variance sur les effets « variété » et « lieu »

Analyse de l'effet « lieu » sur les valeurs de T_N

Variable : Teneur en azote R579, Nord-Est et Ouest (5 à 6 mois et 8 à 10 mois)

HISTOGRAMME DES RESIDUS

```

5          223
4          222  211
3          221  123
2          213  212  122
1          121  112  111  113

```

EFFECTIF 1 2 5 4

BORNES -2,1 -1,23 -.35 .52
à à à à
-1.23 -.35 .52 1.4

MINIMUM -2,1 MAXIMUM 1,4 INTERVALLE 0,88

INDICES DE NORMALITE (coefficients de K.PEARSON)

SYMETRIE (valeur idéale théorique = 0) : BETA 1 = 0.57 PROB : 0.23762

APLATISSEMENT (valeur idéale théorique = 3) : BETA 2 = 2.96 PROBA : 0.97248

RESIDUS SUSPECTS (méthode de GRUBBS)

NIL

ECARTS-TYPES DES RESIDUS

ECARTS-TYPES FACTEUR 1 = lieu

1 (Nord-Est)	2 (Ouest)
1,3	0,62

KHI2 = 2.28

PROB =0.1265

ECARTS-TYPES FACTEUR 2 = stade de croissance

1 (âge 5-6 mois)	2 (âge 8-10 mois)
0,83	1,18

KHI2 = 0.55

PROB =0.46298

ECARTS-TYPES INTER F1*2 = lieu stade de croissance

	1 (Nord-Est)	
1 (âge 5-6 mois)	0,89	0,96
2 (âge 8-10 mois)	1,85	

KHI2 = 5.53

PROB =0.13527

ANALYSE DE VARIANCE

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F		E.T.	
VAR.TOTALE	120,2	11	10,93				
VAR.FACTEUR 1		1		51,87	0,00013		
VAR.FACTEUR 2	42,56	1	42,56		0,00052		
VAR.INTER F1*2		1		0,04	0,83818		
VAR.RESIDUELLE 1	10,37	8	1,3			1,14	

MOYENNES

MOYENNE GENERALE = 13.98

MOYENNES FACTEUR 1 = lieu

Nord-Est	Ouest
16,35	11,62

MOYENNES FACTEUR 2 = stade de croissance

1 (âge 5-6 mois)	2 (âge 8-10 mois)
15,87	12,1

MOYENNES INTER F1*2 = lieu stade de croissance

	1 (Nord-Est)	2 (Ouest)
1 (âge 5-6 mois)	18,3	
2 (âge 8-10 mois)	14,4	9,8

PUISSANCE DE L'ESSAI

FACTEUR 1 : lieu

		RISQUE de 1ere ESPECE		
ECARTS	ECARTS	5%	10%	20%
En %	V.Absolue	PUISSANCE A PRIORI		
5%	0,7	14%	23%	36%
10%	1,4	33%	71%	83%
		PUISSANCE A POSTERIORI		
Moyennes observées		96%	98%	99%

FACTEUR 2 : stade de croissance

		RISQUE de 1ere ESPECE		
ECARTS	ECARTS	5%	10%	20%
En %	V.Absolue	PUISSANCE A PRIORI		
5%	0,7	14%	23%	36%
10%	1,4	33%	71%	83%
		PUISSANCE A POSTERIORI		
Moyennes observées		93%	97%	99%

INTER F1*2 : lieu-stade de croissance

		RISQUE de 1ere ESPECE		
ECARTS	ECARTS	5%	10%	20%
En %	V.Absolue	PUISSANCE A PRIORI		
5%	0,7	7%	13%	25%
10%	1,4	14%	24%	38%
		PUISSANCE A POSTERIORI		
Moyennes observées		97%	99%	99%

COMPARAISONS DE MOYENNES

TEST DE NEWMAN-KEULS - SEUIL = 5%

FACTEUR 1 : lieu

NOMBRE DE MOYENNES 2
VALEURS DES PPAS 1,52

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
1.0	Nord-Est	16,35	A
2.0	Ouest	11,62	B

FACTEUR 2 : stade de croissance

NOMBRE DE MOYENNES 2
VALEURS DES PPAS 1,52

F2	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
1.0	âge 5-6 mois	15,87	A
2.0	âge 8-10 mois	12,1	B

Données pour des regroupements d'essais

1 (Nord-Est)	1 (âge 5-6 mois)	18,3	Résiduelle	DDL	Nb Blocs
1 (Nord-Est)	2 (âge 8-10 mois)	14,4	1,29999995	8	3
2 (Ouest)	1 (âge 5-6 mois)	13,43			
2 (Ouest)	2 (âge 8-10 mois)	9,8			

Analyse de l'effet « lieu » sur les valeurs de LAI

ATTENTION : les hypothèses de l'analyse de variance ne sont pas bien respectées

Il existe un résidu suspect

Les variances intra-traitements ne sont pas homogènes

Variable : LAI R570, Nord-Est et Ouest (5 à 6 mois et 10 à 12 mois)

HISTOGRAMME DES RESIDUS

5			223	
4			222	221
3			213	122
2		123	212	113
1	111	121	211	112
EFFECTIF 1 2 5 4				
BORNES -.84 -.5 -.16 .17				
à à à à				
-.5 -.16 .17 .51				

MINIMUM -0,84 MAXIMUM 0,51 INTERVALLE 0,34

INDICES DE NORMALITE (coefficients de K.PEARSON)

SYMETRIE (valeur idéale théorique = 0) : BETA 1 = 0.5 PROB : 0.26768

APLATISSEMENT (valeur idéale théorique = 3) : BETA 2 = 3.53 PROBA : 0.66921

RESIDUS SUSPECTS (méthode de GRUBBS)

1er résidu suspect : Observation No 1

facteur 1 = lieu. niveau 1 = Nord-Est

facteur 2 = stade de croissance. niveau 1 = âge 5-6 mois répétition N° 1

ECARTS-TYPES DES RESIDUS

ECARTS-TYPES FACTEUR 1 = lieu

1 (Nord-Est)	2 (Ouest)
0,52	0,14

KHI2 = 6.15

PROB =0.01265

ECARTS-TYPES FACTEUR 2 = stade de croissance

1 (âge 5-6 mois)	2 (âge 8-10 mois)
0,47	0,26

KHI2 = 1.6

PROB =0.20264

ECARTS-TYPES INTER F1*2 = lieu stade de croissance

	1 (Nord-Est)	2 (Ouest)
1 (âge 5-6 mois)	0,73	0,15
2 (âge 8-10 mois)	0,37	0,17

KHI2 = 5.21

PROB = 0.15496

ANALYSE DE VARIANCE

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	14,93	11	1,36				
VAR.FACTEUR 1	0,03	1	0,03	0,15	0,70749		
VAR.FACTEUR 2	13,35	1	13,35	74,41	0,00004		
VAR.INTER F1*2	0,12	1	0,12	0,66	0,44361		
VAR.RESIDUELLE 1	1,44	8	0,18				13,43%

MOYENNES

MOYENNE GENERALE = 3.15

MOYENNES FACTEUR 1 = lieu

Nord-Est	Ouest
3,11	3,2

MOYENNES FACTEUR 2 = stade de croissance

1 (âge 5-6 mois)	2 (âge 8-10 mois)
2,1	4,21

MOYENNES INTER F1*2 = lieu stade de croissance

	Nord-Est	Ouest
1 (âge 5-6 mois)		2,05
2 (âge 8-10 mois)	4,06	4,36

PUISSANCE DE L'ESSAI

FACTEUR 1 : lieu

		RISQUE de 1ere ESPECE		
ECARTS	ECARTS		10%	20%
En %	V.Absolue	PUISSANCE A PRIORI		
5%	0,16		15%	27%
10%	0,32	18%		68%
		PUISSANCE A POSTERIORI		
	Moyennes observées		12%	23%

FACTEUR 2 : stade de croissance

		RISQUE de 1ere ESPECE		
ECARTS	ECARTS	5%	10%	20%
En %	V.Absolue	PUISSANCE A PRIORI		
5%		8%	15%	27%
10%		18%		68%
		PUISSANCE A POSTERIORI		
	Moyennes observées	98%	99%	99%

INTER F1*2 : lieu-stade de croissance

		RISQUE de 1ere ESPECE		
ECARTS	ECARTS	5%	10%	
En %	V.Absolue	PUISSANCE A PRIORI		
5%	0,16	6%	11%	22%
10%	0,32	8%	15%	27%
		PUISSANCE A POSTERIORI		
	Moyennes observées	96%	98%	99%

COMPARAISONS DE MOYENNES

TEST DE NEWMAN-KEULS - SEUIL = 5%

FACTEUR 2 : stade de croissance

NOMBRE DE MOYENNES 2
VALEURS DES PPAS 0,56

F2	LIBELLES	MOYENNES	HOMOGENES	
2.0	âge 8-10 mois	4,21	A	
1.0	âge 5-6 mois	2,1		B

Données pour des regroupements d'essais

1 (Nord-Est)	1 (âge 5-6 mois)	2,15	Résiduelle	DDL	Nb Blocs
1 (Nord-Est)	2 (âge 8-10 mois)	4,06	0,1800001	8	3
2 (Ouest)	1 (âge 5-6 mois)	2,05			
2 (Ouest)	2 (âge 8-10 mois)	4,36			

Analyse de l'effet « variété » sur les valeurs de T_N

Variable : Teneur azote zone Nord-Est

HISTOGRAMME DES RESIDUS

```
7          231
6          223
5         212  213
4          132  211
3         233  122  123  232
2         221  121  112  222
1         133  113  111  131

EFFECTIF  3    5    7    3

BORNES   -2.37 -1.12 .13  1.38
         à     à     à     à
         -1.12 .13  1.38  2.63
```

MINIMUM -2,37 MAXIMUM 2,63 INTERVALLE 1,25

INDICES DE NORMALITE (coefficients de K.PEARSON)

SYMETRIE (valeur idéale théorique = 0) : BETA 1 = 0.04 PROB : 0.71877
APLATISSEMENT (valeur idéale théorique = 3) : BETA 2 = 2.39 PROBA : 0.55647

RESIDUS SUSPECTS (méthode de GRUBBS)

NIL

ECARTS-TYPES DES RESIDUS

ECARTS-TYPES FACTEUR 1 = variété

1 (R570)	2 (R579)
	1,36

KHI2 = 0.02

PROB =0.89154

ECARTS-TYPES FACTEUR 2 = stade de croissance

1 (âge 5-6 mois)	2 (âge 8- 10 mois)	3 (âge 10-12 mois)
0,8	1,33	1,95

KHI2 = 3.3

PROB =0.18969

ECARTS-TYPES INTER F1*2 = variété stade de croissance

	1 (R570)	
1 (âge 5-6 mois)	0,9	0,89
2 (âge 8- 10 mois)	1	1,85
3 (âge 10-12 mois)	2,51	1,78

KHI2 = 3.2

PROB =0.67171

ANALYSE DE VARIANCE

	S.C.E	DDL		TEST F	PROBA	E.T.	C.V.
VAR.TOTALE	120,48	17	7,09				
	31,34	1		12,13	0,0045		
VAR.FACTEUR 2	48,2	2	24,1	9,33	0,00369		
VAR.INTER F1*2	9,94	2		1,92	0,18729		
VAR.RESIDUELLE 1	31	12	2,58			1,61	11,66%

MOYENNES

MOYENNE GENERALE = 13.78

MOYENNES FACTEUR 1 = variété

1 (R570)	2 (R579)
12,46	15,1

MOYENNES FACTEUR 2 = stade de croissance

1 (âge 5-6 mois)	2 (âge 8- 10 mois)	
15,99	13,27	12,08

MOYENNES INTER F1*2 = variété stade de croissance

	1 (R570)	2 (R579)
5-6 mois	13,68	18,3
8-10 mois	12,13	14,4
10-12 mois	11,57	12,6

PUISSANCE DE L'ESSAI

FACTEUR 1 : variété

		RISQUE de 1ere ESPECE		
ECARTS	ECARTS	5%		20%
	V.Absolue	PUISSANCE A PRIORI		
5%	0,69	13%	21%	33%
10%	1,38	30%	71%	83%
		PUISSANCE A POSTERIORI		
Moyennes observées		85%		97%

FACTEUR 2 : stade de croissance

		RISQUE de 1ere ESPECE		
ECARTS	ECARTS	5%	10%	20%
En %	V.Absolue	PUISSANCE A PRIORI		
	0,69	8%	15%	27%
10%	1,38	19%	30%	63%
		PUISSANCE A POSTERIORI		
		87%	93%	97%

INTER F1*2 : variété-stade de croissance

		RISQUE de 1ere ESPECE			
ECARTS	ECARTS			10%	20%
En %	V.Absolue	PUISSANCE A PRIORI			
5%	0,69	6%	11%	22%	
10%	1,38	8%	15%	28%	
		PUISSANCE A POSTERIORI			
Moyennes observées		89%		98%	

COMPARAISONS DE MOYENNES

TEST DE NEWMAN-KEULS - SEUIL = 5%

FACTEUR 1 : variété

NOMBRE DE MOYENNES 2
VALEURS DES PPAS 1,65

F1	LIBELLES	MOYENNES	HOMOGENES	
2.0	R579	15,1	A	
1.0	R570	12,46		B

FACTEUR 2 : stade de croissance

NOMBRE DE MOYENNES 2 3
VALEURS DES PPAS 2,02 2,47

F2	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES	
1.0	âge 5-6 mois	15,99	A	
2.0	âge 8- 10 mois	13,27		B
3.0	âge 10-12 mois			B

Données pour des regroupements d'essais

1 (R570)	1 (âge 5-6 mois)	13,68	Résiduelle	DDL	Nb Blocs
1 (R570)	2 (âge 8- 10 mois)	12,13	2,57999992	12	3
1 (R570)	3 (âge 10-12 mois)	11,57			
2 (R579)	1 (âge 5-6 mois)	18,3			
2 (R579)	2 (âge 8- 10 mois)	14,4			
2 (R579)	3 (âge 10-12 mois)	12,6			

Analyse de l'effet « variété » sur les valeurs de LAI

Variable : LAI zone Nord-Est

HISTOGRAMME DES RESIDUS

```

7          232
6         233 231
5         223 222
4         221 212
3          133 132 213
2         211 122 131 123
1         111 121 113 112
  
```

EFFECTIF 2 6 7 3

BORNES -1.21 -.66 -.12 .43
à à à à
-.66 -.12 .43 .98

MINIMUM -1,21 MAXIMUM 0,98 INTERVALLE 0,55

INDICES DE NORMALITE (coefficients de K.PEARSON)

SYMETRIE (valeur idéale théorique = 0) : BETA 1 = 0.12 PROB : 0.51478

APLATISSEMENT (valeur idéale théorique = 3) : BETA 2 = 2.76 PROBA : 0.82077

RESIDUS SUSPECTS (méthode de GRUBBS)

NIL

ECARTS-TYPES DES RESIDUS

ECARTS-TYPES FACTEUR 1 = variété

1 (R570)	2 (R579)
0,68	0,43

KHI2 = 1.54

PROB =0.21146

ECARTS-TYPES FACTEUR 2 = stade de croissance

	3 (âge 10-12 mois)
	0,3

KHI2 = 4.52

PROB =0.10213

ECARTS-TYPES INTER F1*2 = variété stade de croissance

	1 (R570)	2 (R579)
1 (âge 5-6 mois)	1,11	0,73
2 (âge 8- 10 mois)	0,69	0,37
3 (âge 10-12 mois)	0,39	0,27

KHI2 = 4.42

PROB =0.49234

ANALYSE DE VARIANCE

	S.C.E	DDL	C.M.	TEST F	PROBA	E.T.	
VAR.TOTALE	23,05	17					
	4,62	1	4,62		0,00668		
VAR.FACTEUR 2	11,7	2	5,85	13,49	0,00092		
VAR.INTER F1*2	1,53	2	0,76	1,76	0,21298		
VAR.RESIDUELLE 1	5,21	12	0,43			0,66	16,78%

MOYENNES

MOYENNE GENERALE = 3.93

MOYENNES FACTEUR 1 = variété

1 (R570)	2 (R579)
4,43	

MOYENNES FACTEUR 2 = stade de croissance

1 (âge 5-6 mois)	2 (âge 8- 10 mois)	3 (âge 10-12 mois)
2,84	4,16	4,78

MOYENNES INTER F1*2 = variété stade de croissance

	1 (R570)	2 (R579)
5-6 mois	3,53	2,15
8- 10 mois	4,25	4,06
10-12 mois	5,51	4,04

	R570	R579
5-6 mois	3,53	2,15
8- 10 mois	4,25	4,06
10-12 mois	5,51	4,04

PUISSANCE DE L'ESSAI

FACTEUR 1 : variété

		RISQUE de 1ere ESPECE		
ECARTS	ECARTS	5%	10%	20%
En %	V.Absolue	PUISSANCE A PRIORI		
5%	0,2	9%	15%	27%
10%	0,39	19%	29%	72%
		PUISSANCE A POSTERIORI		
Moyennes observées		83%	90%	96%

FACTEUR 2 : stade de croissance

		RISQUE de 1ere ESPECE		
ECARTS	ECARTS	5%	10%	20%
En %	V.Absolue	PUISSANCE A PRIORI		
5%	0,2	7%	13%	23%
10%	0,39	12%	20%	33%
		PUISSANCE A POSTERIORI		
Moyennes observées		93%	97%	99%

INTER F1*2 : variété-stade de croissance

		RISQUE de 1ere ESPECE		
ECARTS	ECARTS	5%	10%	20%
En %	V.Absolue	PUISSANCE A PRIORI		
5%	0,2	5%	11%	21%
10%	0,39	7%	13%	24%
		PUISSANCE A POSTERIORI		
Moyennes observées		92%	96%	99%

COMPARAISONS DE MOYENNES

TEST DE NEWMAN-KEULS - SEUIL = 5%

FACTEUR 1 : variété

NOMBRE DE MOYENNES 2
VALEURS DES PPAS 0,68

F1	LIBELLES	MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
1.0	R570	4,43	A
2.0	R579		B

FACTEUR 2 : stade de croissance

NOMBRE DE MOYENNES 2 3
VALEURS DES PPAS 0,83 1,01

F2		MOYENNES	GROUPES HOMOGENES
3.0	âge 10-12 mois	4,78	A
2.0	âge 8- 10 mois	4,16	A
1.0	âge 5-6 mois	2,84	B

Données pour des regroupements d'essais

1 (R570)	1 (âge 5-6 mois)	3,53	Résiduelle	DDL	Nb Blocs
1 (R570)	2 (âge 8- 10 mois)	4,25	0,4300001	12	3
1 (R570)	3 (âge 10-12 mois)	5,51			
2 (R579)	1 (âge 5-6 mois)	2,15			
2 (R579)	2 (âge 8- 10 mois)	4,06			
2 (R579)	3 (âge 10-12 mois)	4,04			

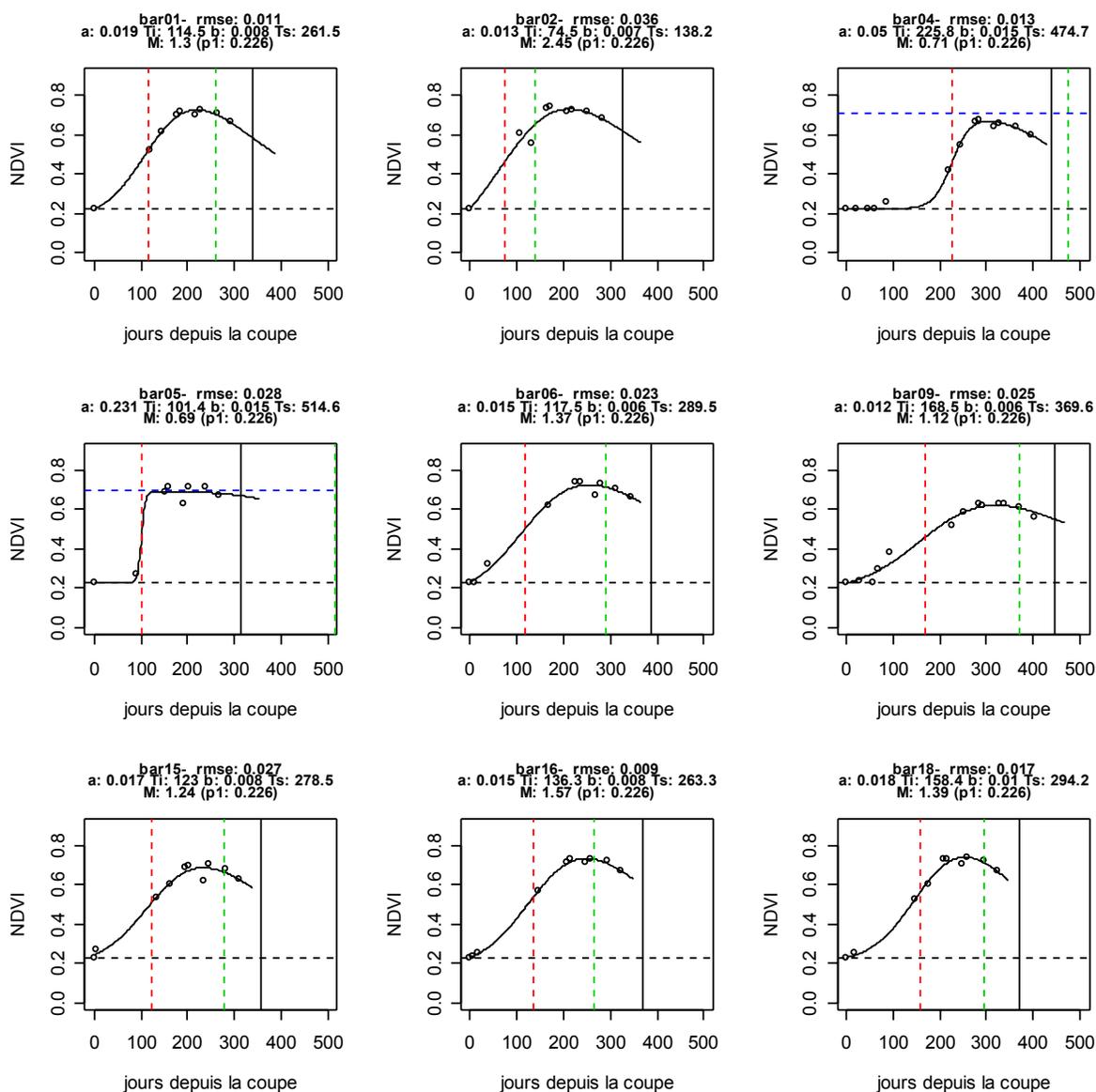
Annexe 14 : Détail des parcelles utilisées pour l'analyse de l'évolution des réflectances

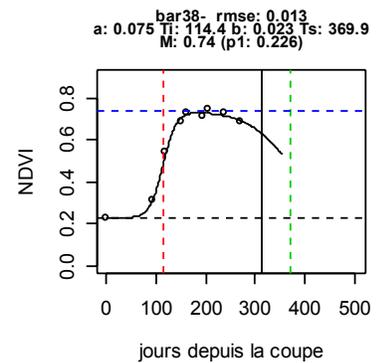
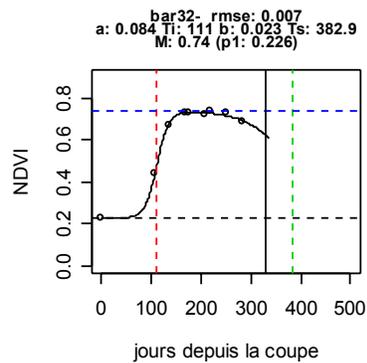
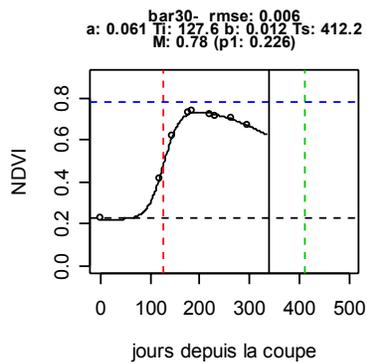
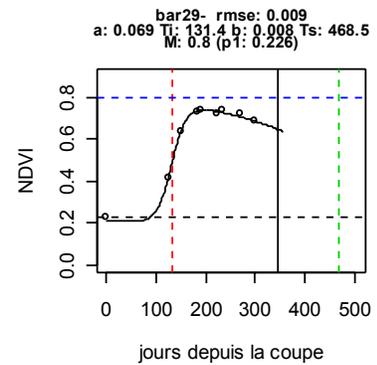
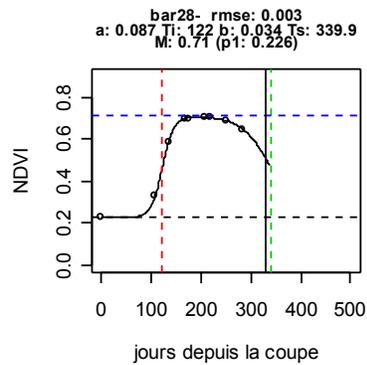
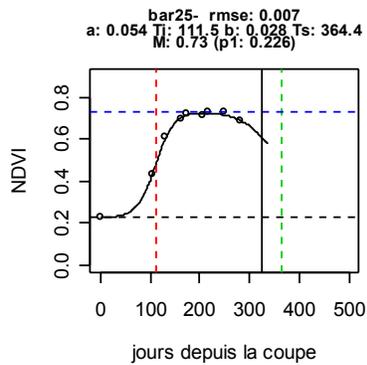
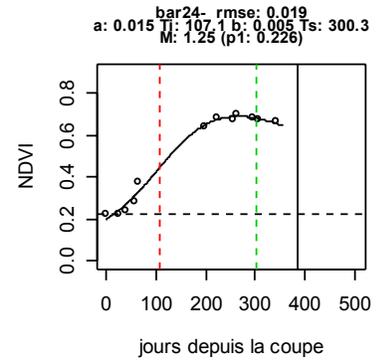
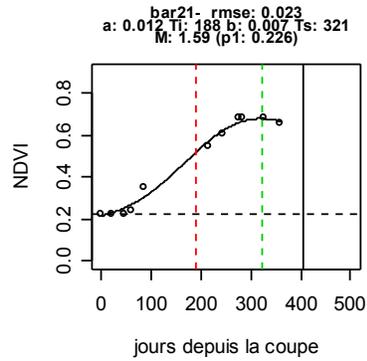
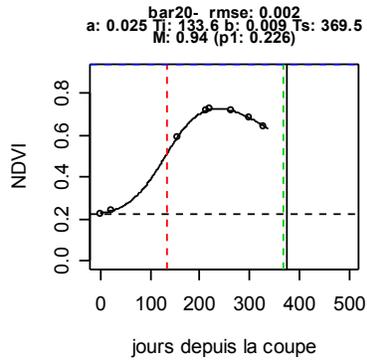
PARCELLE	Surf. (ha)	Coupe 2002	Coupe 2003	PARCELLE	Surf. (ha)	Coupe 2002	Coupe 2003
bar01-	3,56	31/10/02	21/11/03	car03-	5,15	29/10/02	08/10/03
bar02-	0,92	12/11/02	11/11/03	car07-	5,29	12/09/02	24/09/03
bar04-	2,05	23/07/02	24/09/03	car08-	6,41	30/09/02	26/09/03
bar05-	4,75	26/11/02	13/11/03	car11-	4,31	20/08/02	07/08/03
bar06-	7,63	11/09/02	10/09/03	car12-	6,16	02/10/02	08/08/03
bar09-	2,50	15/07/02	24/10/03	car17-	5,57	26/11/02	10/10/03
bar15-	3,00	14/10/02	17/09/03	car26-	6	12/10/02	03/11/03
bar16-	0,79	02/10/02	16/09/03	car27-	6	31/10/02	19/11/03
bar18-	2,06	30/09/02	12/09/03	car28-	6,61	19/09/02	09/09/03
bar20-	0,78	25/09/02	26/08/03	car29-	6,77	28/08/02	05/09/03
bar21-	1,88	26/07/02	23/07/03	car31-	8,29	28/11/02	21/11/03
bar24-	1,88	14/08/02	04/08/03	car35-	2,8	09/10/02	10/10/03
bar25-	2,90	13/11/02	15/10/03	car39-	2,6	09/10/02	13/10/03
bar28-	1,33	11/11/02	14/10/03	car46-	6,2	12/11/02	24/10/03
bar29-	4,87	25/10/02	15/10/03	car47-	6	11/11/02	25/10/03
bar30-	3,02	30/10/02	29/09/03	car50-	7,59	24/10/02	25/08/03
bar32-	2,69	11/11/02	13/10/03	car52-	6,28	25/10/02	14/10/03
bar38-	9,88	25/11/02	12/11/03	car53-	7,22	23/11/02	20/11/03
bar39-	7,30	11/11/02	10/11/03	car54-	4,77	28/09/02	29/09/03
bar43-	8,67	26/09/02	26/09/03	car58-	9,53	15/11/02	17/11/03
bar44-	6,80	08/10/02	13/10/03	car60-	5,23	07/08/02	12/09/03
bar45-	0,89	13/11/02	14/11/03				
bar47-	6,12	30/07/02	05/08/03				
bar49-	7,36	23/10/02	28/10/03				
bar50-	0,95	14/11/02	27/10/03				
bar51-	10,26	22/11/02	25/11/03				
bar53-	4,25	09/09/02	26/08/03				
bar54-	1,39	10/10/02	08/10/03				
bar56-	1,56	27/09/02	27/08/03				
bar57-	0,58	07/08/02	06/08/03				
bar59-	8,37	15/08/02	25/08/03				
bar60-	3,67	02/12/02	29/10/03				
bar61-	0,63	08/07/02	30/06/03				
bar63-	2,02	18/11/02	06/11/03				
bar64-	2,43	19/08/02	06/08/03				
bar65-	1	10/08/02	06/08/03				
bar66-	3,4	07/08/02	24/07/03				

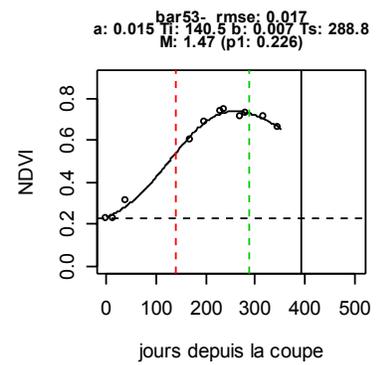
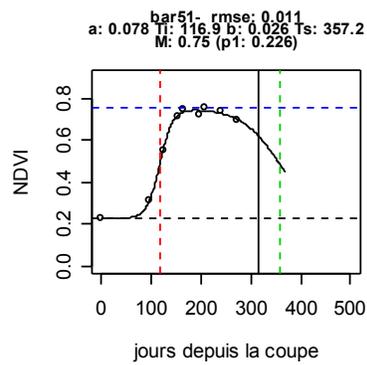
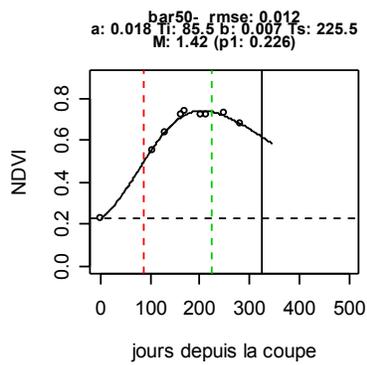
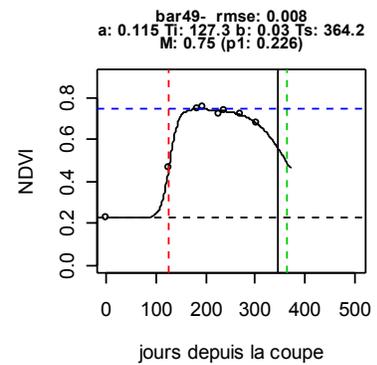
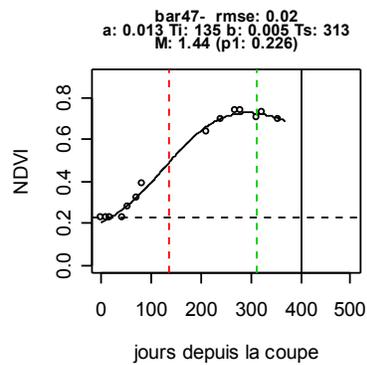
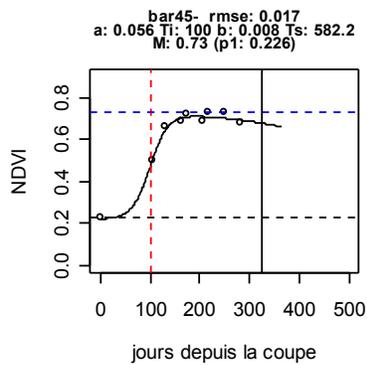
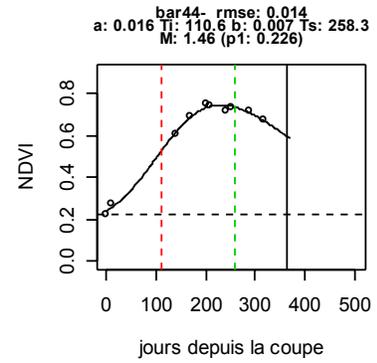
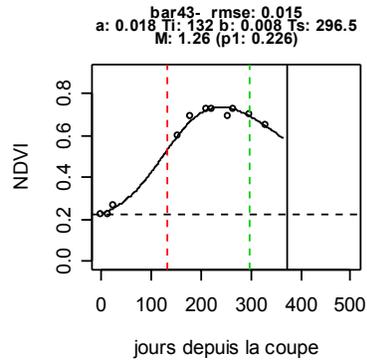
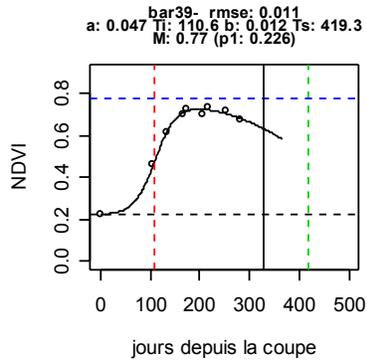
Annexe 15 : Détail des 29 parcelles utilisées pour les simulations Mosicas

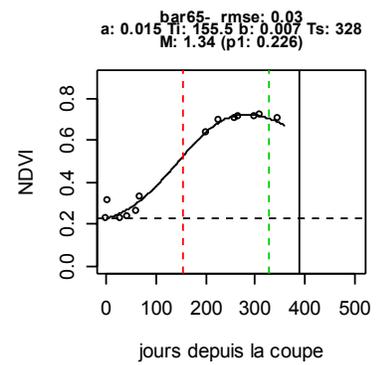
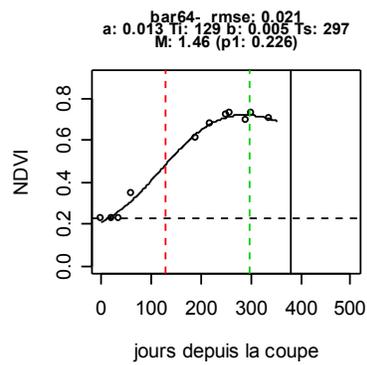
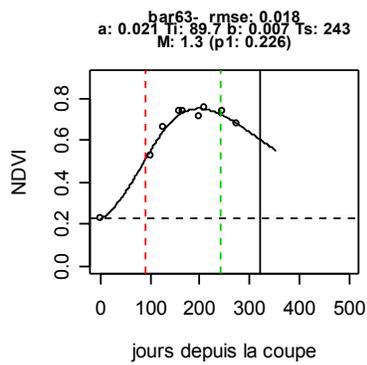
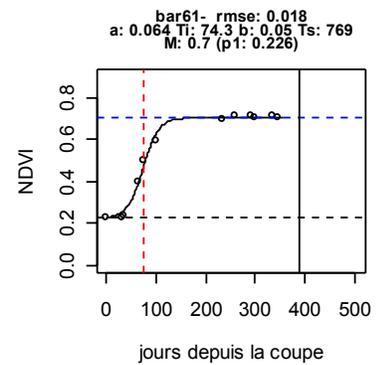
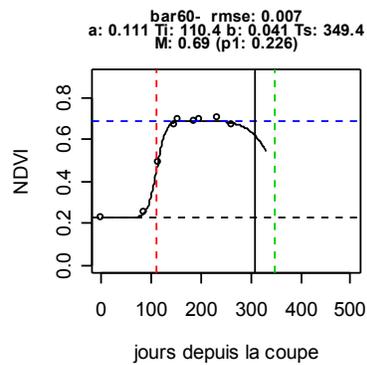
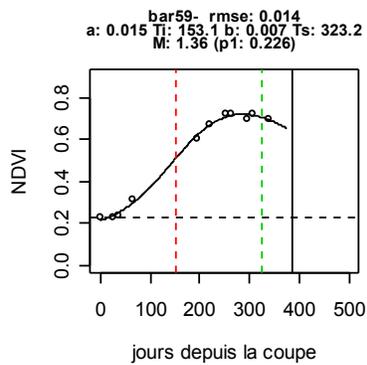
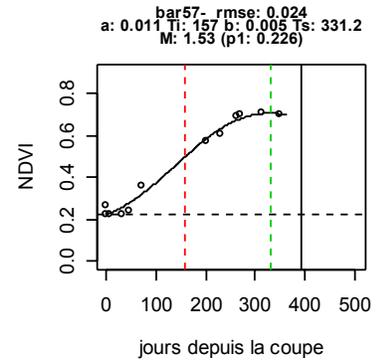
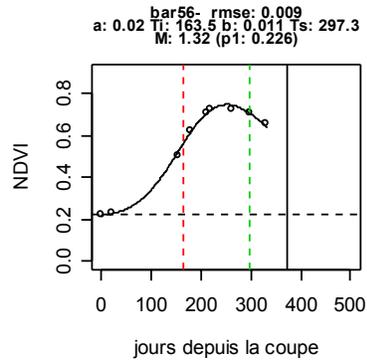
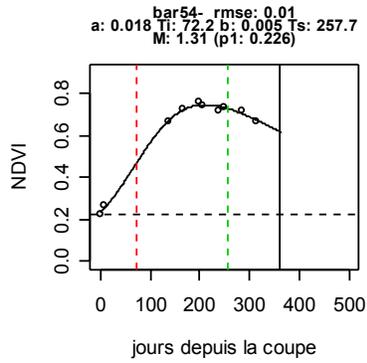
Exploitation	Parcelle	Surface (ha)	Date coupe 2003	Rdt canne (t/ha)	Richesse
b a r a u	bar04-03	2,05	24/09/03	111,842	11,498
	bar05-03	4,75	13/11/03	77,004	11,393
	bar15-03	3,00	17/09/03	98,497	12,488
	bar18-03	2,06	12/09/03	97,843	11,804
	bar20-03	0,78	26/08/03	86,342	12,909
	bar21-03	1,88	23/07/03	98,279	11,949
	bar24-03	1,88	04/08/03	108,997	13,17
	bar30-03	3,02	29/09/03	83,223	12,047
	bar43-03	8,67	26/09/03	121,843	12,866
	bar47-03	6,12	05/08/03	121,491	11,856
	bar53-03	4,25	26/08/03	104,451	13,162
	bar56-03	1,56	27/08/03	81,343	13,158
	bar57-03	0,58	06/08/03	103,731	13,6
	bar59-03	8,37	25/08/03	122,988	12,848
	bar61-03	0,63	30/06/03	117,687	9,131
	bar64-03	2,43	06/08/03	102,046	12,734
	bar65-03	1	06/08/03	110,483	13,149
bar66-03	3,4	24/07/03	117,875	12,646	
C a r u e l	car07-03	5,29	24/09/03	124,161	-
	car08-03	6,41	26/09/03	113,847	-
	car11-03	4,31	07/08/03	115,689	-
	car12-03	6,16	08/08/03	103,077	-
	car28-03	6,61	09/09/03	115,07	-
	car29-03	6,77	05/09/03	121,379	-
	car46-03	6,2	24/10/03	107,401	-
	car47-03	6	25/10/03	109,262	-
	car50-03	7,59	25/08/03	97,837	-
	car54-03	4,77	29/09/03	117,409	-
	car60-03	5,23	12/09/03	120,34	-

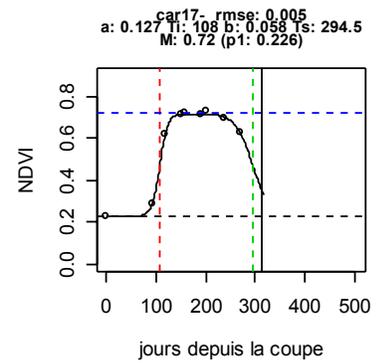
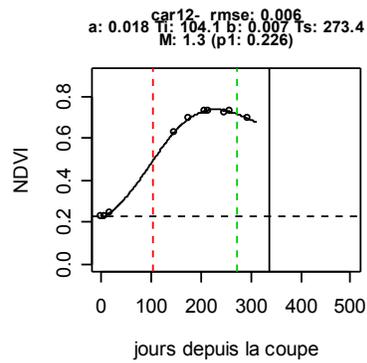
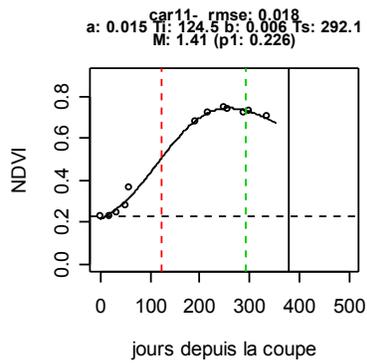
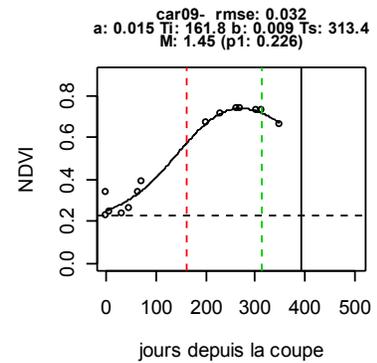
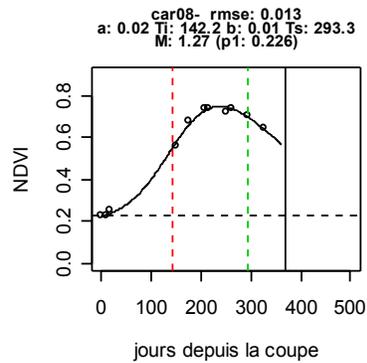
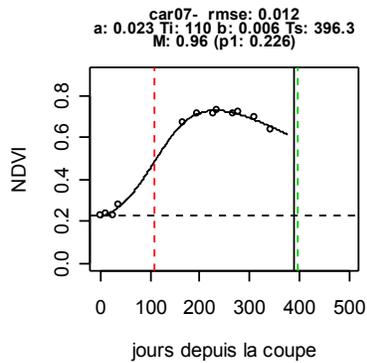
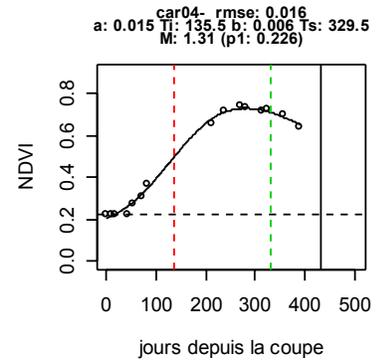
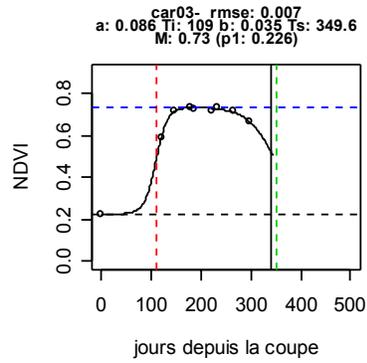
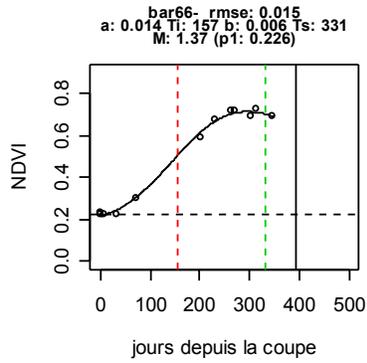
Annexe 16 : Ajustements NDVI obtenus pour chacune des parcelles en repousse

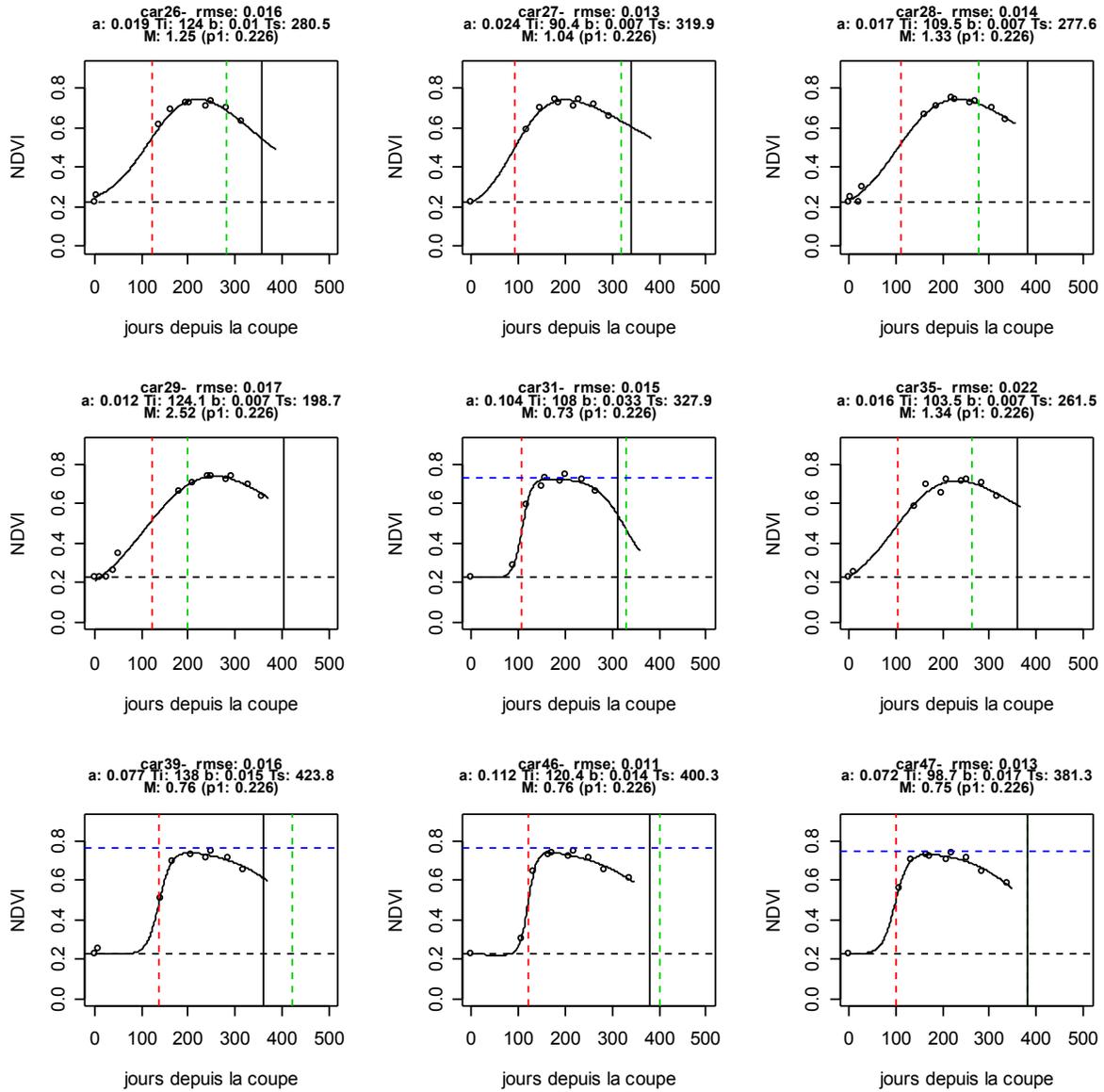


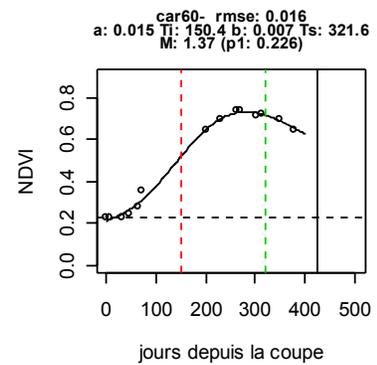
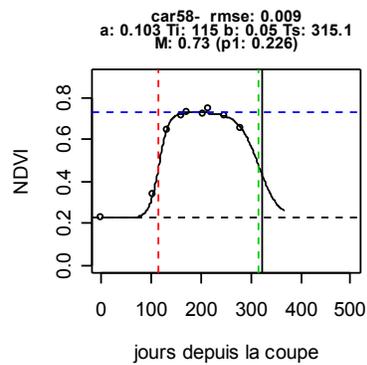
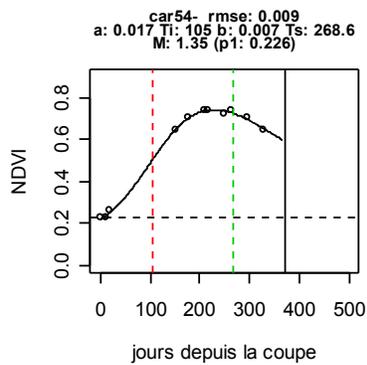
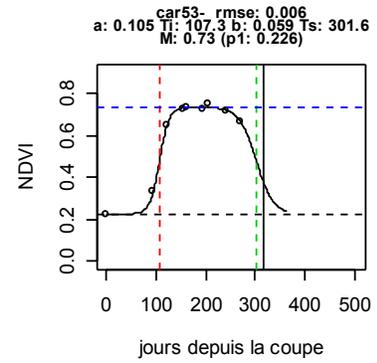
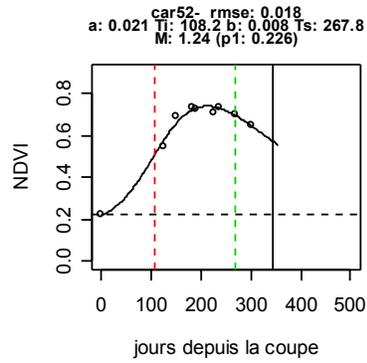
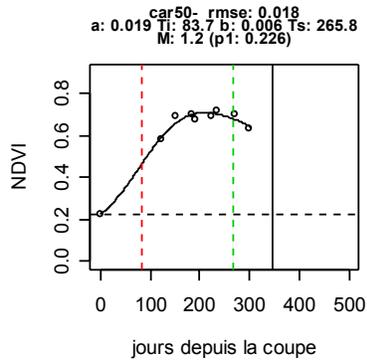












Annexe 17 : Coefficients de pondération des réflectances SPOT 4&5 en fonction des dates des mesures terrain de LAI et de taux d'azote

Points de mesure date mesure	B05P 22-jul-02	B03P 23-jul-02	B30P 24-jul-02	C25P 25-jul-02	C03&C07P 25-jul-02	CUV1P 01-août-02	CUV2&3&4P 02-août-02	K4L1&2&3P 13-août-02	C07P 19-août-02	C03P 26-août-02	C25P 27-août-02
date image											
06-jul-02	0,68	0,55	0,63	0,50	0,41	0,34	0,32				
08-août-02					0,59			1,00		0,52	
14-août-02	0,42	0,45	0,47	0,50		0,66	0,68		1,00		0,48
09-sept-02										0,48	0,52

Points de mesure date mesure	B05&B03&B03P 30-août-02	CUV2&3&4P 09-sept-02	CUV5casi 25-sept-02	BA6&Acasi 24-sept-02	C25&C03casi 24-sept-02	BU&B05&B30casi 26-sept-02	CUV2&4casi 25-sept-02	C25&C11P 04-oct-02	MaineP 08-oct-02	B66P 11-oct-02
date image										
14-août-02	0,36									
09-sept-02	0,64	1,00	0,47							
22-sept-02				1,00	1,00	1,00	1,00			0,27
09-oct-02			0,53					1,00	1,00	
18-oct-02										0,73

Points de mesure date mesure	B04&B56&B27&C06&C09&C25 14-avr-03	B04&B56&B27&C06&C09&C25 13-mai-03	SP1&S P2&S P3 22-mai-03
date image			
25-mai-03	0,39		
26-avr-03	0,61		
4-mai-03		0,79	0,68
17-juin-03		0,21	0,42
21-jul-03			

Points de mesure date mesure	B04&B56&B27&C06&C09&C25 15-juin-03	SP1&S P2&S P3 04-juin-03	SP1&S P2&S P3 16-juin-03	SP1&S P2&S P3 01-jul-03
date image				
4-mai-03		0,30		
17-juin-03	1,00	0,70	1,00	0,59
21-jul-03				0,41

Annexe 18 : Détail des parcelles utilisées pour la cartographie des rendements estimés par télédétection, exploitations Barau et Caruel, cycles culturaux 2002 et 2003

Exploitations Barau et Caruel, cycle cultural 2002 :

Barau	Date coupe 2002	surface (ha)	Rdt réel (t/ha)	Rdt estimé (t/ha)
1	31/10/02	3,56	72,30	77,02
2	12/11/02	0,92	95,43	91,96
5	26/11/02	4,75	91,47	71,00
6	11/09/02	7,63	89,09	86,50
16	02/10/02	0,79	110,43	77,02
18	30/09/02	2,06	85,04	82,46
20	25/09/02	0,78	68,15	79,15
25	13/11/02	2,90	77,22	85,91
26	20/09/02	3,30	74,42	97,75
28	11/11/02	1,33	56,50	45,43
29	25/10/02	4,87	80,42	93,22
30	30/10/02	3,02	83,27	67,75
32	11/11/02	2,69	76,87	56,62
37	23/09/02	1,29	90,03	49,49
38	25/11/02	9,88	74,30	50,00
39	11/11/02	7,30	78,26	99,07
40	24/11/02	2,37	78,40	43,71
44	06/10/02	6,80	100,46	93,86
45	13/11/02	0,89	50,43	89,50
47	30/07/02	6,12	104,46	84,74
49	23/10/02	7,36	75,56	97,75
50	14/11/02	0,95	94,29	84,74
51	22/11/02	10,26	85,04	73,94
53	09/09/02	4,25	89,32	87,68
54	10/10/02	1,39	118,52	112,45
56	27/09/02	1,56	81,45	80,79
57	07/08/02	0,58	70,34	66,85
63	18/11/02	2,02	106,80	102,46
64	19/08/02	2,43	92,95	87,09

Caruel	Date coupe 2002	surface (ha)	Rdt réel (t/ha)	Rdt estimé (t/ha)
3	29/10/02	5,15	103,22	105,94
7	12/09/02	5,29	139,42	107,36
8	30/09/02	6,41	116,66	97,09
12	02/10/02	6,16	116,34	97,75
16	03/09/02	6,45	87,96	108,08
17	26/11/02	5,57	88,90	103,15
26	12/10/02	6,00	109,42	98,41
27	31/10/02	6,00	116,89	103,84
29	28/08/02	6,77	119,54	95,78
31	28/11/02	8,29	102,10	115,44
35	09/10/02	2,80	113,87	88,89
36	28/11/02	3,50	75,60	72,45
46	12/11/02	6,20	99,61	114,69
47	11/11/02	6,00	110,76	93,86
52	25/10/02	6,28	96,67	90,11
53	23/11/02	7,22	95,92	116,96
54	28/09/02	4,77	115,46	98,41
58	15/11/02	9,53	99,63	114,69

Exploitations Barau et Caruel, cycle cultural 2003 :

Barau	Date coupe 2003	Surface (ha)	Rdr réel (t/ha)	Rdt estimé (t/ha)
1	21/11/03	3,56	79,38	94,50
2	11/11/03	0,92	102,48	97,75
4	24/09/03	4,75	61,23	58,03
5	13/11/03	4,75	90,59	89,90
6	10/09/03	7,63	104,28	101,77
9	24/10/03	2,50	73,02	52,19
13	10/11/03	1,35	113,55	101,77
15	17/09/03	3,00	60,15	82,74
16	16/09/03	0,79	110,46	95,14
18	12/09/03	2,06	91,73	101,09
20	26/08/03	0,78	82,79	84,17
21	23/07/03	1,88	72,07	72,95
24	04/08/03	1,88	82,33	65,11
25	15/10/03	2,90	79,15	99,07
26	08/09/03	3,30	94,36	106,65
28	14/10/03	1,33	73,51	87,68
29	15/10/03	4,87	88,38	99,74
30	29/09/03	3,02	84,92	90,11
32	13/10/03	2,69	95,65	101,77
37	28/08/03	1,29	66,73	69,12
38	12/11/03	9,88	81,16	109,52
39	10/11/03	7,30	85,4	103,84
43	26/09/03	8,67	117,09	100,42
44	13/10/03	6,80	106,74	103,84
45	14/11/03	0,89	83,8	100,42
47	05/08/03	6,12	103,79	99,07
49	28/10/03	7,36	98,61	108,80
50	27/10/03	0,95	127,69	95,14
51	25/11/03	10,26	91,79	116,20
53	26/08/03	4,25	87,48	98,41
54	08/10/03	1,39	126,5	105,94
56	27/08/03	1,56	64,38	99,07
57	06/08/03	0,58	81,03	89,50
59	25/08/03	8,37	95,7	95,80
60	29/10/03	3,67	73,52	73,44
61	30/06/03	0,63	124,16	87,09
63	06/11/03	2,02	110,69	113,94
64	06/08/03	2,43	88,26	97,09
65	06/08/03	1	101,27	92,59
66	24/07/03	3,4	81,1	92,59
67	01/09/03	1	105,08	83,02

Caruel	Date coupe 2003	Surface (ha)	Rdr réel (t/ha)	Rdt estimé (t/ha)
3	08/10/03	5,15	115,48	106,94
7	24/09/03	5,29	138,77	94,50
8	26/09/03	6,41	113,82	109,52
11	07/08/03	4,31	127,91	97,09
12	08/08/03	6,16	111,99	103,15
17	10/10/03	5,57	84,1	100,42
26	03/11/03	6	118,52	103,15
27	19/11/03	6	116,35	108,08
28	09/09/03	6,61	133,38	103,84
29	05/09/03	6,77	128,01	105,24
31	21/11/03	8,29	90,23	113,94
35	10/10/03	2,8	112,63	97,09
39	13/10/03	2,6	97,72	110,25
46	24/10/03	6,2	93,7	111,71
47	25/10/03	6	114,45	102,46
50	25/08/03	7,59	110,55	91,96
52	14/10/03	6,28	110,27	106,65
53	20/11/03	7,22	94,32	113,94
54	29/09/03	4,77	126,48	108,08
58	17/11/03	9,53	92,57	116,20
60	12/09/03	5,23	124,37	97,09

Annexe 19 : Communication internationale IGARSS 2003, Toulouse

Spectral indices as bio-indicators of sugar cane crop condition from hyperspectral CASI data

E. Bappel¹, A. Bégué¹, M. Despinoy¹, Y. Buchon¹, B. Siegmund²

¹ CIRAD, Maison de la Télédétection, 500, rue J.F. Breton, 34093 Montpellier Cedex 5, France

Phone : +(33) 4 67 54 87 39 ; Fax : +(33) 4 67 54 87 00 ; email : bappel@teledetection.fr

² CIRAD, Station de la Bretagne, BP20, 97408 Saint Denis Messagerie Cedex 9, Ile de La Réunion, France

Phone : +(33) 2 62 52 80 22 ; Fax : +(33) 2 62 52 80 21 ; email : bertrand.siegmund@cirad.fr

ABSTRACT- This paper illustrates the advantages of the hyperspectral data for sugar cane crop management. In 2002, a *casi* airborne campaign and a ground measurement experiment were set up over sugar cane sites in Réunion Island. Early results indicate that LAI and biomass are significantly correlated with some narrow spectral bands in the NIR and that chemical leaf contents are well correlated with the PRI index. A multi-regression procedure was used to calculate transfer functions in order to produce thematic maps of LAI, biomass and nitrogen.

I. INTRODUCTION

Hyperspectral remote sensing has gone through rapid development over the past two decades. A considerable amount of literature was accumulated in geological and environmental applications [1]. Interest is growing in the application of hyperspectral data to agriculture. However, crop growth is very dynamic and monitoring the condition of agricultural crops is challenging. Several studies are underway to investigate the potential of hyperspectral remote sensing data products for use in precision farming [2].

Predictions of canopy biophysical parameters from airborne or satellite canopy reflectance are generally carried out through four different methodologies: a) directly studying the statistical relationships between ground-measured biochemical data and canopy-measured reflectance [3]; b) applying the leaf-level relationships derived between optical indices and the pigment content directly to canopy-measured reflectance [4]; c) *scaling-up* the leaf-level relationships based on optical indices related to pigment content through models of canopy reflectance or infinite reflectance [5]; and d) inverting the observed canopy reflectance through a canopy reflectance or infinite reflectance model coupled with a leaf model to estimate the optimum pigment content [6].

Traditional statistical methods have demonstrated successful retrievals of pigment content from hyperspectral reflectance, such as from multivariate analysis between Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer (AVIRIS) reflectance and total nitrogen, lignin, starch, chlorophyll content and LAI [3] and with nitrogen and chlorophyll [7] through application of a stepwise multiple-regression procedure using the AVIRIS spectral bands.

In the context of the SUCRETTE (Système de sUivi de la Canne à sucRE par TélédéTEction) project which proposes to

study technical skills and economic viability of remote sensing for the sugar cane crop management, the CIRAD (Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement) has set up in September 2002, an airborne *casi* (Compact Airborne Spectrographic Imager) campaign over sites in Réunion Island.

II. METHODOLOGY

The study site was centered on the town of Sainte-Suzanne (55°60' E longitude, 20°90' S latitude), located in northern Réunion Island. The site covers an area of approximately 10 km (north-south) per 3 km (east-west). The land use is agricultural crop mainly sugar cane, first crop production of Réunion Island.

From September 21-22, spatial mode (19 bands; 410 nm to 932 nm) *casi* data were gathered over the Sainte-Suzanne sites. Imageries were collected at 2 meter x 2 meter ground resolution. During the week of the *casi* over flights, field crews collected information on crop growth across 27 pre-selected fields. The fields were 6 month old at least, and has a close canopy cover. On each of the 27 fields, ground measurement sites (4 meter x 4 meter) were planned across the fields, in which sample sites were located. The location of all within-field sample areas were recorded using an Omnistar differential GPS. Positional accuracies for this GPS model are generally within an image pixel, less than 2 meters in XY direction.

At each sample area, a number of specific measurements and samples were gathered:

1. Leaf Area Index (LAI): measured with a PCA Licor 2000.
2. Sugar cane height: strongly correlated with fresh biomass
3. Plant chlorophyll: at each site, 30 chlorophyll measurements were made using a chlorophyll meter SPAD 502 to provide a mean chlorophyll measurement per site. These measurement were taken on upper leaves (F3) within the crop canopy.
4. Leaf nutrient content: at each site 30 leaves within the sugar cane canopy were collected and transported to the CIRAD laboratory for chemical analyses in order to

obtain a mean N, P, K and leaf water content measurement per site.

Using the *casi* navigation data, in-flight GPS data and more than 250 ground control points per images, the flight lines were geometrically corrected using ERDAS Imagine software. The atmospheric correction was done using ACORN software package.

GPS sample locations were overlaid on the *casi* imagery and average reflectance was extracted for a 3 x 3 pixels area centered on each of the 27 sample areas.

III. RESULTS

Reflectance values for each of the sample points are graphed in Fig. 1. Large variations in near-infrared reflectances are observed, with lower reflectance values corresponding to younger growth stage of sugar cane (6 months) and higher reflectance values corresponding to older sugar cane (9-12 months). Age of sugar cane has contribution to reflectance values in near-infrared corresponding to the amount of fresh biomass in the canopy structure.

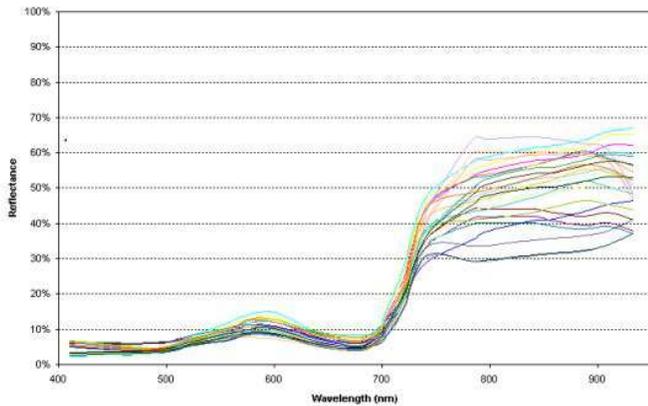


Figure 1. *Casi* reflectances for each sample point

To determine the relationship between reflectance and crop biophysical characteristics, reflectances from individual bands were regressed against ground measurements (N=27).

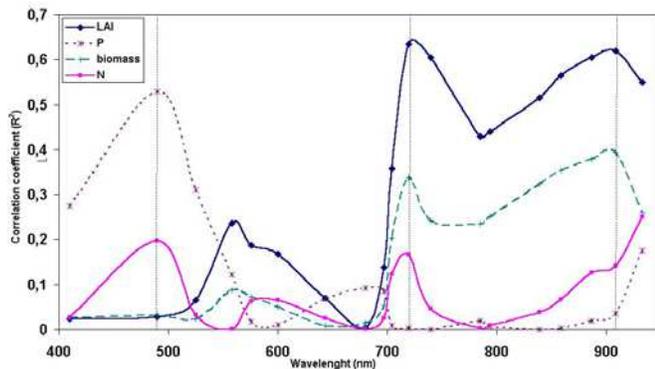


Figure 2. Wavelength correlation coefficients for LAI, N, P and biomass

Fig 2. shows that reflectances for the single band centred at 719 nm and 908 nm correlate well with the indicators of sugar cane crop condition, respectively the LAI ($R^2 = 0.63$) and the fresh biomass (0.40). Phosphate content gives good correlation with the single band regression at 489 nm ($R^2 = 0.53$). Variables like chlorophyll or nitrogen content give poor correlation with single band reflectance regression.

We then calculated several optical indices to identify relationships between *casi* reflectances and leaf nutrients components according to [8] (Fig. 3, Table 1). Fig. 3 shows the correlation coefficient results from regression between the components and the indices and Table 1 summarizes the results. The PRI (Photochemical Reflectance Index) calculated using $(R_{524}-R_{575})/(R_{524}+R_{575})$ from [8] gave the highest correlation coefficients with SPAD, N, P and K values.

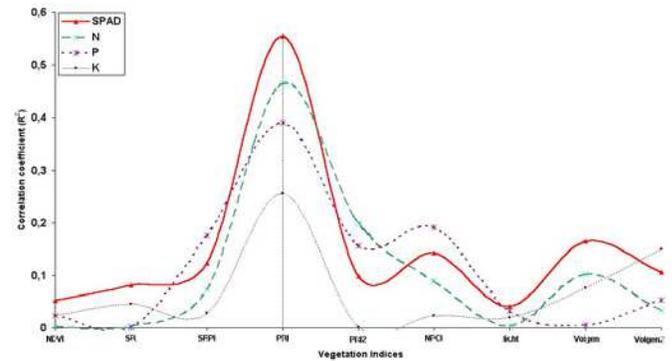


Figure 3. Vegetation indices correlation coefficient for SPAD, N, P and K

TABLE 1
Correlation coefficient values (R^2) for PRI regression against chlorophyll and nutrient leaf content

	SPAD	N	P	K
PRI	0.55	0.46	0.39	0.25

Leaf water content has done poor correlation from both single band and indices regression.

These results, sensitive bands or indices to specific parameters, by inverting simple regression equations and applying to image, allows to create thematic maps of predicted LAI, biomass, SPAD or Nitrogen. This process allows us to describe transfer functions between the more correlated *casi* reflectances or optical indices and bio-indicators of sugar cane crop condition. Multiple linear regression method is used to estimate biophysical parameters according to [9].

TABLE 2
Transfer functions obtained with *casi* data

LAI	$15.82 \times R_{719} + 4.2 \times R_{739} + 4.56 \times R_{908} - 3.45$
Biomass	$251.7 \times R_{719} - 686.2 \times R_{839} + 917.2 \times R_{858} - 120.2 \times R_{886} - 79.1$
SPAD	$-676.51 \times PRI^2 - 181.33 \times PRI + 23.323$
N	$5.77 \times R_{908} - 191.98 \times R_{886} + 185.66 \times R_{858} - 22.34 \times R_{719} + 19.11$

The correlation coefficient and RMSE for each function is described in Table 3. Root Mean Square Error were obtained using cross validation method between predicted (by transfer functions) and observed (ground measurements) values for each parameter.

TABLE 3
Transfer function correlation coefficient and RMSE

Variab le	Correlation coefficient	Range	R.M.S.E.
LAI	0.75	1 - 6	0.58
Biomass	0.78	0 - 100	9.56 t/ha
SPAD	0.62	15 - 40	3.17 SPAD units
N	0.65	0 - 20	1.83 g/kg Leaf dry matter

Thematic maps of each parameter is generated using the transfer functions and the selected *casi* bands. Predicted biomass and Nitrogen leaf content maps are shown in Fig. 4.

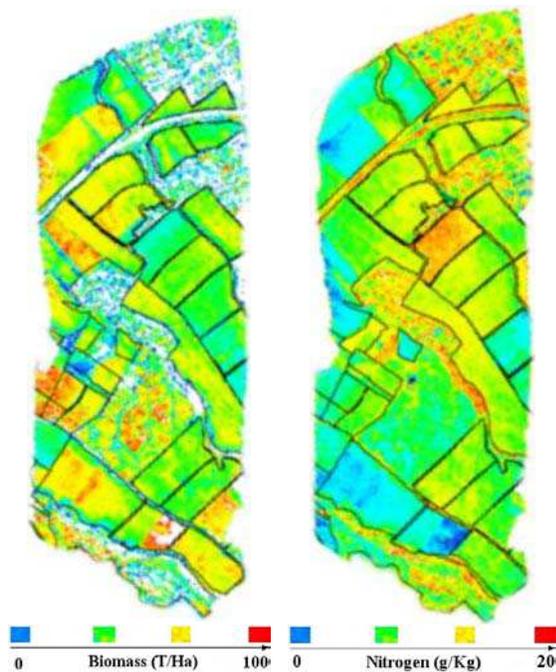


Figure 4. Biomass and Nitrogen thematic maps

Biomass or crop vigor can vary dramatically across a field, depending on site conditions and management practices.

IV. CONCLUSION

The results demonstrate that hyperspectral data allow to estimate bio-physical parameters, indicators of the sugar cane crop conditions. The sugar cane biomass is the highest correlated variable with *casi* reflectances ($R^2 = 0.78$). The

four wavelengths used are mainly located in the near infrared spectrum, more sensitive to the amount of biomass.

Thematic maps produced could be useful for the crop management. For examples, estimate leaf nitrogen content could be used to locate the sugar cane fields with highest sugar content as biological relationships link nitrogen content and sugar concentration in the maturation step [10]. LAI spatial variations could be used to identify low production areas inside the field and then help for crop management practices.

Both estimation of biomass and nitrogen leaf content are key parameters to be used as input in a geographical decision-making tool to manage sugar cane harvest in order to maximize sugar production. Further analysis of this data set is planned to establish nitrogen - sugar concentration - leaf water content relationship.

The use of hyperspectral data may not be cost-effective nowadays, but should become a tool for precision farming when satellite-based hyperspectral data will be available in the near future.

REFERENCES

- [1] Lévesque, J., Staenz, K. and T. Szeredi (2000), The Impact of Spectral Band Characteristics on Unmixing of *casi* Data for Monitoring Mine Tailings Site Rehabilitation., *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26(3):231-240.
- [2] Pacheco A., A. Bannari, J.-C. Deguise, H. McNairn, K. Staenz (2001), Contribution of Hyperspectral Remote Sensing for LAI Estimation in Precision Farming; Proceedings of the 23rd Canadian Symposium on Remote Sensing, Ste-Foy, Québec, August 20-24, 2001, pp. 281 - 287
- [3] Johnson, L. F., Hlavka, C. A. and Peterson, D. L. (1994), Multivariate analysis of AVIRIS data for canopy biochemical estimation along the Oregon transect. *Remote Sensing of Environment*, 47:216-230.
- [4] Zagolski, F., Pinel, V., Romier, J., Alcayde, D., Fotanari, J., Gastellu-Etchegorry, J. P., Giordano, G., Marty, G., and Joffre, R. (1996), Forest canopy chemistry with high spectral resolution remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 17:1107-1128.
- [5] Zarco-Tejada, P. J. (2000), Hyperspectral remote sensing of closed forest canopies: Estimation of chlorophyll fluorescence and pigment content, Ph.D. Dissertation, *Graduate Program in Earth and Space Science*, York University, Toronto.
- [6] Weiss, M., Baret, F., Myneni, R.B., Pragnere, A. and Knyazikhin, Y. (2000), Investigation of a model inversion technique to estimate canopy biophysical variables from spectral and directional reflectance data, *Agronomie*, 20:3-22.
- [7] Matson, P., Johnson, L., Billow, C., Miller, J. and Pu, R. (1994), Seasonal patterns and remote spectral estimation of canopy chemistry across the Oregon transect. *Ecological Applications*, 4:280-298.
- [8] Gamon, J. A., Serrano, L., and Surfus, J. S. (1997), The photochemical reflectance index: An optical indicator of photosynthetic radiation-use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*. 112:492-501.
- [9] Grossman, Y. L., Ustin, S. L., Jacquemoud, S., Sanderson, E. W., Schmuck, G., and Verdebout, J., 1996. Critique of Stepwise Multiple Linear Regression for the Extraction of Leaf Biochemistry Information from Leaf Reflectance Data. *Remote Sensing of Environment*, 56, pp. 182-193
- [10] Van Dillewijn (1952), Physiology: Nutrition. p 207-246. In Van Dillewijn. ed. *Botany of sugarcane*. Waltham Mass. USA.

**REAL-TIME SUGARCANE HARVEST MONITORING USING SPOT
4&5 SATELLITE DATA**

**ASSIMILATION OF A BIOPHYSICAL PARAMETER ESTIMATED BY
REMOTE SENSING USING SPOT 4&5 DATA INTO A SUGARCANE
YIELD FORECASTING MODEL**

REAL-TIME SUGARCANE HARVEST MONITORING USING SPOT 4&5 SATELLITE DATA

By

E. BAPPEL¹, A. BÉGUÉ¹, P. DEGENNE¹, V. LEBOURGEOIS², AND B. SIEGMUND²

¹CIRAD, Maison de la Télédétection, 500 rue J.F. Breton, 34093 Montpellier Cedex 5, France.

²CIRAD, Station de la Bretagne, BP20, 97408 Saint Denis Messagerie Cedex 9,
Ile de La Réunion, France.

bappel.teledetection@caramail.com

KEYWORDS: remote sensing, real-time, harvest monitoring, SPOT 4&5 satellites

Abstract

In the context of the SUCRETTE project, (Système de sUivi de la Canne à sucRE par TélédéTEction) the Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) has set up a sugarcane harvest monitoring program using satellite data on Reunion Island. The methodology was based on the study of the time series SPOT 4&5 reflectance images during the 2003 harvest season from June to December. By analysing SPOT 4&5 satellites images, harvested fields and standing cane were easily identified. A multi spectral classification of the scene was used to produce a harvest map. It was possible to generate a sugarcane harvest map and statistics ten days after image acquisition. The methodology allowed for the determination of the harvest advance rate during the six months of the harvesting campaign. In the study this was obtained by producing sugarcane harvest maps at four times (03/07/21, 03/08/21, 03/10/14 and 03/11/20). The overall classification accuracy of the harvested fields reached 98.8% using 82 ground control fields. The harvest advance rate estimated by remote sensing was close to the mill observation, with a maximum error of 8%. Furthermore, the mill records and the harvested area can be used to estimate sugarcane yield. These results indicated that remote sensing technology could be adapted to monitor harvest schedules in real-time, using SPOT 4&5 data. Information extracted from satellite images could be a decision support tool for mill opening and closing dates as well as for crushing rates, which could have a significant economic impact.

Introduction

The principal use of remote sensing for sugarcane monitoring is visual interpretation or image classification for sugarcane area mapping (McDonald and Routley, 1999; Narciso and Schmidt, 1999; Hadsarang and Sukmuang, 2000). The results are generally very acceptable (accuracy of 90% or more) when high resolution satellite data (Landsat, SPOT) are acquired prior to the harvest season, when the crop canopy is fully developed. Literature references showed that remote sensing could be used to characterize sugarcane phenology, variety or water stress (Schmidt *et al.*, 2000; Gers, 2003).

In contrast, there are very few publications (Gers and Schmidt, 2001) on the use of remote sensing for cutting or planting surveys. This is because current satellite solutions are unable to

provide the large number of image acquisitions during several consecutive months. In addition, due to cloudy tropical conditions, only satellites with a spatial resolution and programming capabilities adapted to the field-scale, like Spot satellites, offer an acquisition frequency high enough to monitor these dynamic processes.

On Reunion Island, two mills process the two millions tons of sugarcane produced annually. Each farmer has to harvest according to a quota of sugarcane per week. But sometimes, when rainy conditions are present farmers are not able to cut their weekly quotas. This is due to mechanization of the harvest process, and the soil compaction problems that could reduce future yields in the field.

Every year, some farmers are not able to harvest and deliver their whole quota due to the fixed mill opening and closing dates. In this context, CIRAD has conducted research to estimate the technical and economical feasibility of using remote sensing data for sugarcane harvest monitoring with SPOT 4&5 satellite data.

Methodology

A methodology has been developed to estimate areas of harvested sugarcane, bare soil and standing cane from the Spot 4&5 satellites images (10 metres ground resolution) within sugarcane production areas. The goal is to provide, in quasi real-time, information on sugarcane harvest rate. This information must be available quickly after image acquisition to be useful as a decision support tool for harvest management and monitoring.

This methodology is based on the difference in spectral signatures between harvested sugarcane, bare soil and standing cane, allowing a maximum likelihood multi spectral classification. Prior classifications of bare soil were done to identify planted fields in 2003 before the beginning of the harvest season. These areas are not concerned by the next classification process. Training fields were selected by visual interpretation, and three classes were finally considered: bare soil, crop residues over bare soil and standing cane. The crop residues and bare soil classes were considered as harvested cane. The classified images and the vector layer of field boundaries are used to extract the percentage of harvested area for each geographical delivery unit.

The results are in statistical and cartographical form: harvest rate for each delivery centre and maps of harvested and standing cane on a field scale.

Results and validation

In the 2003 harvest season, harvesting was monitored four times using Spot 4&5 images as described in Figure 1.

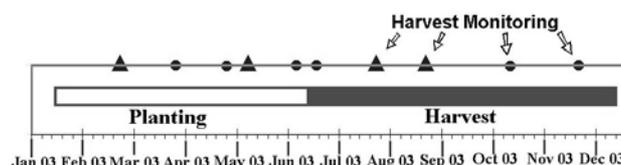


Fig 1. – Date and type of Spot Images recorded over Reunion Island in 2003. Triangle symbols represent Spot 5 and circle symbols are for Spot 4 image acquisition.

The true harvest rate was calculated as the ratio of the tonnage accumulated on the date of interest to the final tonnage delivered at each delivery centre (data available from CTICS¹¹). This value was compared to the harvest rate estimated by remote sensing.

Table 1- Results of the harvest monitoring done for the 2003 Reunion Island milling season, ground data (CTICS), estimated by remote sensing and RMSE.

Images acquisition	Monitored sugarcane area (ha)	Harvest rates Ground data (%)	Harvest rates Spot4&5 (%)	RMSE (%)
03/07/21	19591	8.9	10.9	2.8
03/08/21	11611	34.8	34.4	4.6
03/10/14	11449	62.3	63.9	6.1
03/11/20	7808	86.78	81.75	8.0

Validation of statistical and cartographical products by ground observations has been done on the four data sets. The results obtained for the harvest rate monitoring of the harvest season 2003 in Reunion Island and their comparisons with ground data are presented in Table 1. The Root Mean Square Error is expressed in harvest rate, i.e. for the 03/07/21, the harvest rate of each centre followed were estimated with an error more or less equal to 2.8%.

Validation of the harvest maps (Figure 2) is done with the Overall Accuracy Classification (the total precision of classification) which reaches 98.8%.

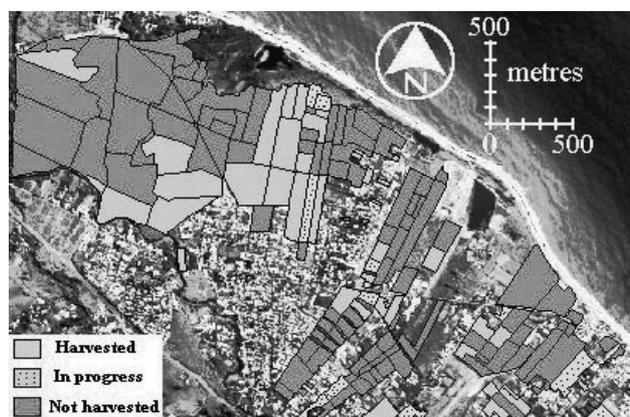


Fig 2. – Post processed image of harvested field classification overlapping a Spot 5 image, 2.5 metre ground resolution, real colour composite.

Conclusion

The validation of these results indicates that it is possible to use Spot 4&5 satellites data to estimate the sugarcane harvest rate, during the harvest season, in near real-time. Maps deduced from the satellite images can be distributed to the sugar industry through a tailored GIS which is used to edit monthly spatial statistics of the sugarcane management practices. A small java mapping program is embedded in a HTML page, providing the possibility to distribute the interactive map to any final user without having to install a GIS software package on the final user's computer system. A web browser is the only requirement to view the maps dynamically. Information extracted from satellite images could be used as a decision

¹¹ CTICS: Centre Technique Interprofessionnelle de la Canne à Sucre, La Réunion.

support tool for mill closing dates as well as crushing rates, which could have a significant economic impact.

Acknowledgements

This research was supported by a “Région Réunion” Phd Grant and was done in the context of the project ISLE_Reunion © CNES : a remote sensing reference database developed by CNES (Centre National d’ Etudes Spatiales) for scientific and R&D studies, on "la Réunion" island. http://medias.obs-mip.fr/isle_reunion/

References

Gers, C. and Schmidt, E. (2001). Using SPOT4 satellite imagery to monitor area harvested by small scale sugarcane farmers at Umfolozi. *Proc S Afr Sug Technol Ass* 75: 28-33.

Gers, C.J. (2003). Remotely sensed sugarcane phenological characteristics at Umfolozi South Africa, Proceedings of the 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, July 2003, 3 pp [CD-ROM].

Hadsarang, W. and Sukmuang, S. (2000). Utilization of landsat-5 (TM) imagery for sugarcane area Survey and mapping in Thailand. Asian Conference on Remote Sensing (ACRS), Taipei (Taiwan).

McDonald, L. and Routley, S. (1999). Use of satellite imagery, remote sensing and spatial analysis to determine the area under cane prior to and during the harvest season. Cooperative Research Centre Report No. 03/99. Herbert Cane Protection and Productivity Board. 28 pp.

Narciso, G. and Schmidt, E. (1999). Identification and classification of sugarcane based on satellite remote sensing. *Proc S Afr Sug Technol Ass* 73: 189-194.

Schmidt, E.J., Narciso, G., Frost, P. and Gers, C. (2000). Application of remote sensing technology in the South African sugar industry: Review of recent research findings. *Proc S Afr Sug Technol Ass* 74: 192-200.

ASSIMILATION OF A BIOPHYSICAL PARAMETER ESTIMATED BY REMOTE SENSING USING SPOT 4&5 DATA INTO A SUGARCANE YIELD FORECASTING MODEL

BY

E. BAPPEL¹, A. BÉGUÉ¹, J.F. MARTINÉ², A. PELLEGRINO¹, B. SIEGMUND²

¹ CIRAD, Maison de la Télédétection, 500 rue J.F. Breton, 34093 Montpellier Cedex 5, France.

² CIRAD, Station de la Bretagne, BP20, 97408 Saint Denis Messagerie Cedex 9, Ile de La Réunion, France.

Email : bappel.teledetection@caramail.com

KEYWORDS : SPOT satellite, NDVI, LAI, growth model

Abstract

In the context of the SUCRETTE project, (*Système de sUivi de la Canne à sucRE par TélédéTEction*) CIRAD (*Centre International de Recherche Agronomique pour le Développement*) has initiated a project to monitor growth of sugarcane in Reunion Island (55°60' E longitude, 20°90' S latitude). Ground measurements (Leaf Area Index) using a PCA Licor 2000 were taken from June 2002 to December 2002, coupled with SPOT 4&5 (Satellite Pour l'Observation de la Terre) images acquired during the same period. Yield estimates could be improved by combining remotely sensed data with growth models. The objective of this study was to determine a relationship between leaf area index (LAI) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) generated from SPOT 4&5 images, and to establish whether there is a benefit in using remotely estimated LAI instead of simulated LAI to estimate yield. A strong relationship between LAI and NDVI was obtained using an exponential function ($R^2=0.86$). A time series of 12 Spot images was used to produce NDVI profiles for each field. Gaps between dates were filled by fitting an empirical curve. LAI was estimated at a daily time step from the NDVI curve. The growth model Mosicas was forced using the estimated LAI. Actual yields were compared with yields simulated with and without LAI forcing. The coefficient of determination results indicate that R^2 between observed and simulated yields is equal to 0.42 and 0.66 for simulation without forcing and for simulation with LAI forcing, respectively. The root mean square error of 19.3 t/ha without LAI forcing decreased to 12.8 t/ha using LAI forcing.

Introduction

Remote sensing tools can provide information about vegetation in various wavelengths: the solar spectrum (Guyot, 1996), the active and passive microwave (for example, for radar: Prévot *et al.*, 1993) and the thermal range (Moran *et al.*, 1994). It appears that remotely sensed measurements can be related to instantaneous values of various canopy variables.

Rudorff and Batista (1990) showed that yield estimations by Landsat MSS data (linear model with vegetation index) based only on one date or only on agro-meteorological data were less accurate than those based on the combined agro-meteorological-spectral model. The combined model consisted of a multiple linear regression integrating vegetation index and

simulated yield, with a standard error ranging between 10 and 14 t/ha for a mean yield of 75 t/ha.

The objective of this study was (1) to establish the relationship between the LAI of sugarcane and its radiometric response formalized by the NDVI, and (2) to establish whether yield estimations from a growth model could be improved by using these data.

Methodology

Several pre-processing steps were needed to use 12 Spot 4&5 multispectral images, ten metre resolution including: ortho-rectification, topographic normalization, numerical count to reflectance values, and finally, inter-calibration of the various sensors. This method involved establishing the relation between the LAI and corresponding NDVI values. NDVI values were calculated using the following equation according to Rouse *et al.* (1974):

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

where PIR and R are reflectance recorded by Spot 4&5 satellites in the near infra-red and red part of the solar spectrum, respectively. The relationship between LAI and NDVI was established by comparing 65 ground measurements of LAI with corresponding NDVI values. Each LAI observation was a field mean of three or four 20 m by 20 m sample areas within the field. Thirty LAI2000 measurements were taken on a diagonal line within each sample area.

A NDVI curve was fitted to 12 NDVI data points for each field by the square difference sum method with the R package used to fill gaps between dates. The resulting daily NDVI values were then used to estimate daily LAI values. These values were used as inputs for the Mosicas agro meteorological mechanistic growth model (Martiné, 2003).

Mosicas was used to simulate the final sugarcane yield obtained on 29 sugarcane fields, for both methods namely with and without LAI forcing (updating of LAI variable of the model derived from remote sensing). These fields were selected due to the availability of final NDVI and yield data and SPOT 4&5 images that were not restricted by cloud cover. The range of the field size is from 1.3 to 11 ha with a mean equal to 4.5 ha. The measured yields are from the mill records of sugarcane delivery for each field.

Results

Figure 1 shows the relationship between the NDVI calculated from Spot 4&5 reflectance and ground measured LAI.

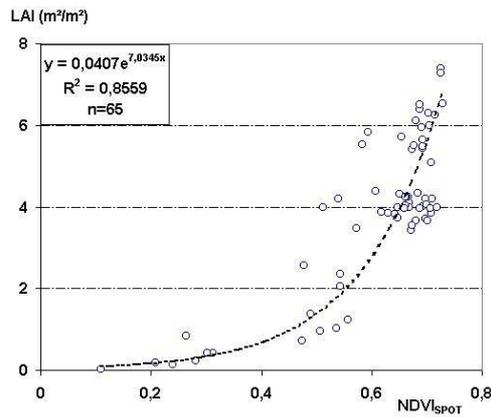


Fig. 1 – Relationship between sugarcane Leaf Area Index (LAI) and SPOT (Satellite Pour l’Observation de la Terre) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

The coefficient of determination was equal to 0.86 and was significant at $P < 0.001$ ($n=65$). The relationship is described by an exponential function with the following formula:

$$\text{LAI} = 0.0407 \times \text{EXP}(7.0345 \times \text{NDVI}_{\text{SPOT}})$$

Figure 2 shows an example of the fitted NDVI curve obtained for a field. A logistic equation gave the best fit.

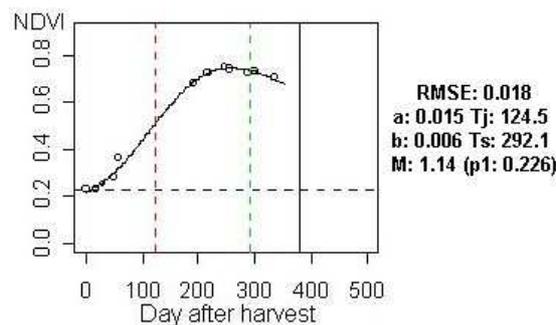


Fig. 2 – Empirically fitted Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) curve and NDVI data points for a field grown in the 2002-2003 season.

Yields estimated with and without the LAI forcing strategy are compared with measured yields. Results are presented in Figure 3.

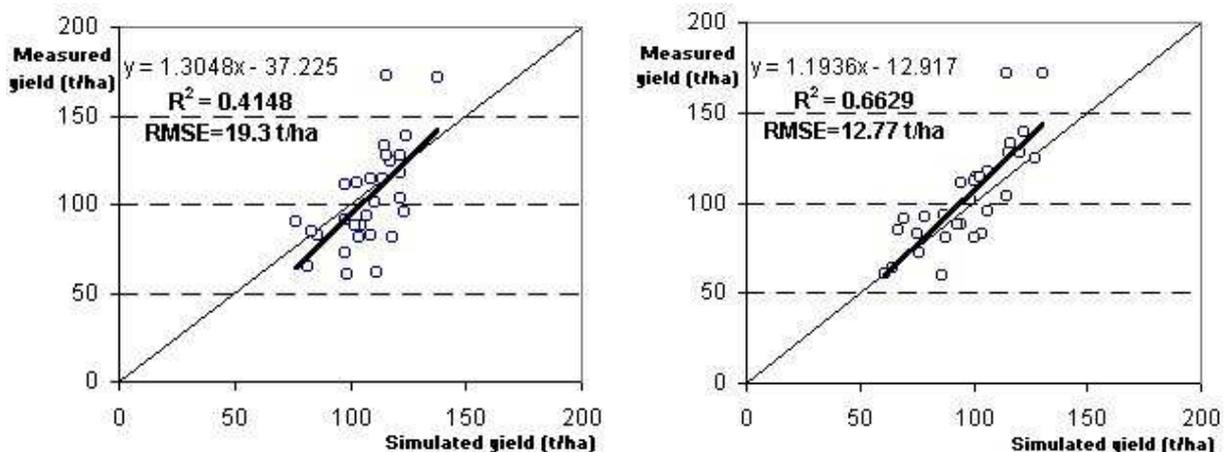


Fig. 3 – Comparison of Mosicas (agro meteorological mechanistic growth model) simulated to observed sugarcane yield with and without leaf area index (LAI) forcing.

The root mean square error of 19.3 t/ha for simulations without forcing decreased to 12.8 t/ha for simulations with LAI forcing (Figure 3). Moreover, the coefficient of determination increased considerably to reach the value of 0.67 with LAI forcing compared to 0.42 without LAI forcing.

Conclusion

A strong relationship was established between sugarcane LAI and the NDVI generated from SPOT 4&5 data. In addition, we could calculate the adjusted NDVI for each field, necessary for obtaining the NDVI values at a daily time step. The root mean square error obtained between the observed NDVI and the NDVI logistic functions was at maximum equal to 0.03 for a mean NDVI of 0.45. Finally, sugarcane yield estimated using growth models like Mosicas could be improved significantly by forcing the model with LAI values estimated from NDVI data from SPOT data. Our research turns to the study of the relationship which can exist between the maximum of NDVI and the final yields of sugarcane. If the relationship between the maximum of NDVI and the final yields is significant, it will be possible to estimate final yields only from the radiometric SPOT data, using fewer images.

Acknowledgements

This research was supported by a “Région Réunion” Phd Grant and was done in the context of the project ISLE_Reunion © CNES : a remote sensing reference database developed by CNES (Centre National d’ Etudes Spatiales) for scientific and R&D studies, on "la Réunion" island. http://medias.obs-mip.fr/isle_reunion/

References

- Guyot, G. (1996). Agriculture et statistiques agricoles, in Précis de télédétection: Tome 2, Applications thématiques, edited by F. Bonn (Sainte Foy (Québec)) : Presses de l’université de Québec), pp. 269-316.
- 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, pp. 11-38.
- Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y. and Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49: 246-263.
- Prévoit, L., Dechambre, M., Taconet, O., Vidal-Madjar, D., Normand, M., and Galle, S. (1993). Estimating the characteristics of vegetation canopies with airborne radar measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 2803-2818.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. and Harlan J.C. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In: *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Greenbelt: NASA SP-351, pp. 301-317.
- Rudorff, B.F.T. and Batista, G.T. (1990). Yield estimation of sugarcane based on agro-meteorological-spectral models. *Remote Sensing of Environment*, 33: 183-192.