

ISTOM

Ecole d'agro-développement international

32, Bvd du Port – 95 000 Cergy

Tel : 01 30 75 62 60



Rapport de stage

Estimation de la Réserve Utile des sols par couplage de données de Télédétection et d'un modèle de croissance Cas de la Canne à Sucre à La Réunion

CIRAD Réunion



7, chemin de l'IRAT – 97 410 St Pierre

Flavie de Robillard

Stage de fin d'études

Réalisé du 26/05/08 au 24/11/08

Maître de stage : Pierre Todoroff

RESUME

La réserve utile des sols dépend des caractéristiques physiques des sols et de leur profondeur. Elle est un paramètre essentiel de la croissance de la plante et un élément clé des outils que la recherche met au point pour l'amélioration de la production agricole (bilan hydrique, modélisation de croissance). La culture de la canne à sucre à la Réunion doit faire face à de nombreuses contraintes d'ordres économiques, environnementaux et territoriaux. C'est dans ce contexte que le CIRAD travaille sur l'élaboration d'outils d'aide à la décision faisant appel à la modélisation de croissance. Nous disposons d'un modèle de croissance de la canne à sucre permettant de simuler le développement d'une parcelle à partir des caractéristiques de la parcelle (RU, itinéraire technique...) et des données climatiques. Nous allons proposer dans cette étude, une méthode d'estimation de la réserve utile des sols par inversion de ce modèle, dont les simulations de l'efficacité d'interception du rayonnement seront comparées à des observations sur la parcelle. Ces observations seront extraites d'images satellites et permettront l'identification du paramètre réserve utile des parcelles étudiées.

Mots-clés : Modélisation, canne à sucre, bilan hydrique, réserve utile, système d'information géographique, télédétection.

ABSTRACT

Available water storage capacity of the soil (AWSC) is a parameter which depends on soil physical properties and soil dept. AWSC is an essential element for the plant development; likewise is an important tool (water balance, growth modeling) to take into account in order to improve the agricultural production. The sugarcane crop in Reunion Island should face to deal with many economical, environmental and territorial constraints. CIRAD is concerning about the development of tools for modeling crop growth, these tools are useful to support the decision making process. In this work we used a sugarcane growth model which enabled us to simulate the plot development from plot features such us AWSC, technical schedule and climate data. In this work, we propose an approach to estimate the AWSC by inverting this model, simulated radiations uses efficiencies are compared with plot observations. These observations will be extracted from satellite images an will allow us to identify the AWSC useful to the plants included in this study.

Key-words: Modeling, sugarcane, water balance, available water storage capacity, geographic information system, remote sensing.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Pierre Todoroff, pour son soutien dans tous les moments où ma démarche scientifique s'égarait dans les tableaux, les chiffres, les pixels... Et puis pour m'avoir introduit dans le monde des Systèmes d'Information utilisant toutes les techniques apprises pendant le stage.

Je remercie Bertrand Caruel sans qui cette étude n'aurait pu être élaborée.

Merci à Lionel Le Mézo, pour ces précieux conseils dans des moments où ils étaient si bien venus !

Merci à Michaël Mezzino qui m'a bien aidé pour certains détails informatiques, sans lesquels l'étude n'aurait pas pu aboutir.

Je remercie Raymond Nativel, Louis Paulin et Jason Hoarau pour leur précieuse aide pendant mes sorties sur le terrain, des bras comme les leurs m'ont tant aidé pour creuser les trous, et puis pour leurs bonnes humeurs qui m'ont aidé au quotidien.

Merci à Jean-Louis Chopart de m'avoir si bien accueillie au sein du Pôle Canne et de sa case, en m'intégrant à cette grande famille d'Istomiens. Merci de m'avoir montré cette passion pour les racines, pour la recherche et pour l'Afrique.

Je remercie également Héléna Renaud avec qui j'ai partagé pendant cinq mois le bureau 'Télédétection', un rayon de soleil, conseillère techniques en SIG et télédétection. Sans elle l'apprentissage des logiciels utilisés pendant le stage aurait été beaucoup plus fastidieux.

Je remercie Sylvaine Jego et Frédéric Chiroleu sans qui l'interprétation des résultats n'aurait pas été aussi facile, et qui m'ont appris à utiliser ce logiciel si puissant.

Je tiens à remercier tout particulièrement Jean-Baptiste Laurent qui m'a permis de croire à un rêve, et qui m'a engagé dans une problématique de mémoire intéressante pour les cinq mois à venir.

Merci à Marine Gratecap, colocataire dans une case à l'incroyable destin, et Emilie Diacono, camarade de pauses café, pour leurs patiences et leurs précieux conseils.

Merci à tous ceux que je n'ai pas cités et qui m'ont permis de mener ce stage à bien...

Merci à Adrien pour son soutien malgré la distance.

Enfin, je souhaite dédier une partie de ce que j'ai pu acquérir ici à la Réunion à Nicolas, ami qui s'est éteint bien trop tôt, et qui avait vu juste dans mes aspirations...

SOMMAIRE

RESUME	2
REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE	4
INTRODUCTION.....	6
2 CONTEXTE DE L'ÉTUDE	8
1.1. <i>Milieu naturel</i>	8
1.1.1. Généralités sur l'île de la Réunion.....	8
1.1.2. Un climat contrasté.....	8
1.1.3. Pédologie : une distribution caractéristique	9
1.2. <i>La production de Canne à sucre</i>	10
1.2.1. La plante.....	10
1.2.2. Economie de la filière	11
Contexte international et Européen	11
La canne à sucre à la Réunion	12
1.2.3. La recherche menée par le CIRAD et objectifs de l'étude	13
2. MATERIEL ET METHODE.....	15
2.1. <i>Présentation du site d'étude</i>	15
2.1.1. Données climatiques	15
2.1.2. Morpho-pédologie de la zone	16
2.1.3. Informations sur le parcellaire agricole.....	17
2.2. <i>Couplage des données de télédétection dans la modélisation de croissance</i>	18
2.2.1. Simulation des efficacités d'interception par MOSICAS	18
Présentation MOSICAS.....	18
Données d'entrées de simulation	19
2.2.2. Calcul de l'Efficacité d'interception par télédétection	20
Radiométrie de la Canne à sucre	20
Choix des images.....	22
Calcul de l'efficacité d'interception.....	22
2.2.3. Interpolation et calcul de la réserve utile.....	23
3. RESULTATS ET DISCUSSION	25
3.1. <i>Extraction des RU moyennes par parcelles</i>	25
3.1.1. Efficacités d'interception observées par télédétection	25
3.1.2. Comparaison des RU en fonction des années	25
Présentation des résultats	25
Effet année et repousse sur l'estimation de la RU des sols.....	27
3.1.3. Comparaison des P-ETP moyens	27
P-ETP moyens.....	27
Test de Wilcoxon sur l'année 2006	28
RU moyennes par parcelle.....	29
3.2. <i>Validation des résultats</i>	30
3.2.1. Simulation avec les RU moyennes.....	30
3.2.2. Comparaison des efficacités d'interception	30
3.2.3. Comparaison entre rendements simulés et observés	31
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	33
INDEX DES ABREVIATIONS	34
LISTE DES ILLUSTRATIONS	35

LISTE DES TABLEAUX	35
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	36
ANNEXES.....	38

INTRODUCTION

Le contexte de la culture de canne à sucre dans un pays de l'Union Européenne est aujourd'hui complexe. En effet, les directives adoptées en 2006 visent une diminution des prix, et des quotas sont fixés sur les productions et exportations. A La Réunion la culture de cette plante, transformée pour la production de sucre et de rhum, représente un double enjeu : celui de s'adapter aux nouvelles directives imposées par le contexte international et l'organisation mondiale du commerce, ainsi qu'un enjeu territorial important. L'agriculture réunionnaise entre de plus en plus en compétitivité avec l'expansion urbaine, sur une île de 2510 km² dont les pentes, au-delà d'une certaine altitude, rendent les terres incultes.

Les producteurs de canne à la Réunion font donc face à de nombreuses contraintes. D'abord ils doivent exercer une activité dont la rentabilité diminue, dans des conditions climatiques aléatoires et qui parfois peuvent entraîner des dégâts importants (saison cyclonique, sécheresses...), enfin ils doivent maintenir leurs exploitations dans une situation où la pression foncière est forte. De plus, la canne doit être transformée dans les plus brefs délais après la récolte (24 à 48 heures), ce qui oblige une organisation rigoureuse de la filière. Pour l'organisation interprofessionnelle de la canne (le CTICS) et les industriels, la situation est également complexe, les quotas de productions et le bref délai entre la récolte et la transformation exigent l'élaboration d'un planning pointu des récoltes sur les six mois de campagne sucrière. Le CIRAD, dans le cadre de ses recherches sur l'amélioration des systèmes de culture pérenne, travaille sur la mise en place d'outils d'aide à la décision visant à faciliter l'activité de la filière face à ces enjeux. Ainsi, dans le cadre du projet SUCRETTE élaboré en partenariat avec Spot Image, des prévisions de rendements par analyse temporelle d'images satellitales ont été mises au point.

Le CIRAD travaille également depuis un certain nombre d'années sur la modélisation de la croissance de la canne. Un modèle de croissance (MOSICAS) simule l'évolution des différents organes de la plante au cours du temps, parmi ceux-ci le rendement parcellaire. Cette méthode fonctionne pour des conditions hydriques et thermiques contrastées, pour la variété R570 en première repousse, et pour les caractéristiques pédologiques de La Réunion. Des prévisions peuvent donc ainsi être proposées à la filière, peu avant la récolte. Le modèle de croissance MOSICAS fonctionne à partir de données d'entrée basées sur le climat, la pédologie des parcelles et certains éléments de l'itinéraire technique, en considérant la parcelle comme homogène. Ce modèle fournit des simulations des paramètres biophysiques de plus en plus proches de la réalité.

Au vu de produire un outil d'aide à la production pour l'ensemble de l'île et pour différents niveaux d'acteurs de la filière canne (pour l'instant uniquement outil chercheur), le CIRAD travaille sur la mise à disposition de ces résultats de modélisation. L'objectif est de créer un système d'information rassemblant l'ensemble des données nécessaires à la simulation. Pour que cet outil puisse couvrir l'ensemble de l'île, il a été décidé de développer une interface où la donnée est spatialisée. La Réserve Utile est un paramètre essentiel pour la modélisation et difficile à mesurer. Son estimation et sa spatialisation entre dans le cadre de ce projet de système d'information géographique.

Cette étude propose une méthode d'estimation de la RU des parcelles agricoles utilisant deux types d'outils : les images satellitales et le modèle MOSICAS dont les résultats de simulation vont permettre d'élaborer une relation entre l'efficacité d'interception et la RU. L'identification de ce paramètre va nous permettre une estimation de la RU pour chaque parcelle étudiée.

2 Contexte de l'étude

1.1. Milieu naturel

1.1.1. Généralités sur l'île de la Réunion

La Réunion est une île d'origine volcanique située dans l'archipel des Mascareignes, 800 km à l'est de Madagascar (55°30' de longitude Est et 21°05' de latitude Sud). Sa superficie est de 2510 km². La forme particulière elliptique (allongement NO-SE) de l'île est due à la formation des deux volcans, le piton des Neiges et le piton de la Fournaise, ce dernier étant toujours en activité. La morphologie de l'île doit sa complexité aux coulées successives de laves et au régime climatique qu'elle subit. Ainsi les espaces cultivables des plaines sont largement exploités, en accord avec l'expansion des villes et la prédominance des fortes pentes.

1.1.2. Un climat contrasté

La Réunion a un climat très contrasté en raison de sa latitude australe assez basse et de sa situation océanique et également par son relief et sa haute altitude. L'île subit un régime d'alizés régulier venant de l'est, ce qui détermine une zone au vent et une zone sous le vent. Etant située dans une ZCIT, elle subit également un régime de perturbations violentes telles que les cyclones.

R. Robert (1985) distingue trois notions géographiques déterminantes dans le régime pluviométrique de l'île :

- Une diminution générale des pluies d'Est en Ouest avec un très fort gradient de pluviosité (de 600mm à 9000mm), conditionné par l'orientation et la fréquence de la circulation atmosphérique et par la disposition d'un relief insulaire.
- Un seuil altitudinal d'optimum pluviométrique, qui conditionne également les températures. Les lignes isothermes suivent le plus souvent les lignes de niveaux.
- Des effets topoclimatiques particuliers.

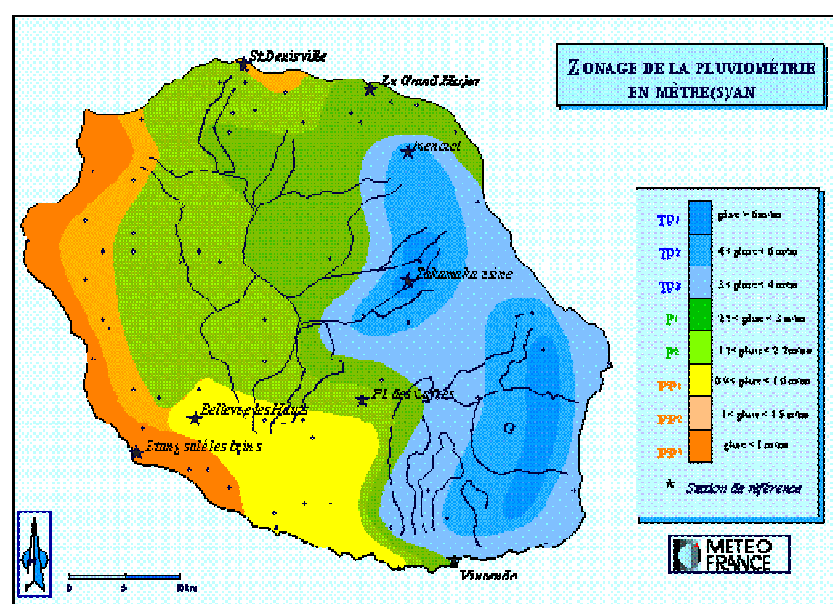


Figure 1: Zonage Pluviométrique (source: Météo France)

1.1.3. Pédologie : une distribution caractéristique

Les sols réunionnais sont caractéristiques des îles volcaniques tropicales. En effet, l'hétérogénéité des sols est due à l'action climatique, à la nature volcanique de la roche mère, à l'altitude et à la végétation. Ce sont des facteurs très variables en fonction de la localisation géographique sur l'île (cf **figure 2**).

M. Raunet (1991) définit des « clés » de distribution des sols :

- La forte pluviosité, l'âge ancien et les températures chaudes favorisent l'hydrolyse poussée des minéraux des roches et donc la pédogenèse ferrallitique. Ainsi, sur les roches des épisodes volcaniques les plus anciens exposées au vent, de basse et moyenne altitude, on trouve les sols les plus anciens, de nature ferrallitique. Cependant ces types de sols sont peu répandus car fortement érodés, ce sont les sols faiblement à moyennement ferrallitique qui sont davantage représentés.
- L'existence d'un matelas de pyroclastites cendro tuffeuses récent qui a recouvert la majeure partie du massif ancien, et une partie de La Fournaise, conditionne de façon fondamentale la zonation des sols, déterminée par l'exposition et l'altitude des sols. C'est sur ces cendres que sont constitués la majorité des andosols de l'île. Sur le versant ouest la différenciation des Andosols liée au climat et à l'altitude est particulièrement nette. Ces sols aux propriétés mécaniques, hydriques et physico-chimiques (donc agronomiques) très particulières représentent 70% de la surface cultivée de l'île.
- Dans les zones à longue saison sèche (sous le vent), à végétation peu couvrante et à moyenne et basse altitude, on trouve des sols bruns, sols bruns vertiques, vertisols, sols lithiques d'érosion.
- Tous les épisodes volcaniques supérieurs à l'épisode pyroclastique majeur du Piton des Neiges ont laissés des roches faiblement altérées et à découvert en l'absence de cendres, et donc des terres qui ne sont pas propices à la culture, selon l'âge des coulées. De même pour le Piton de la Fournaise.

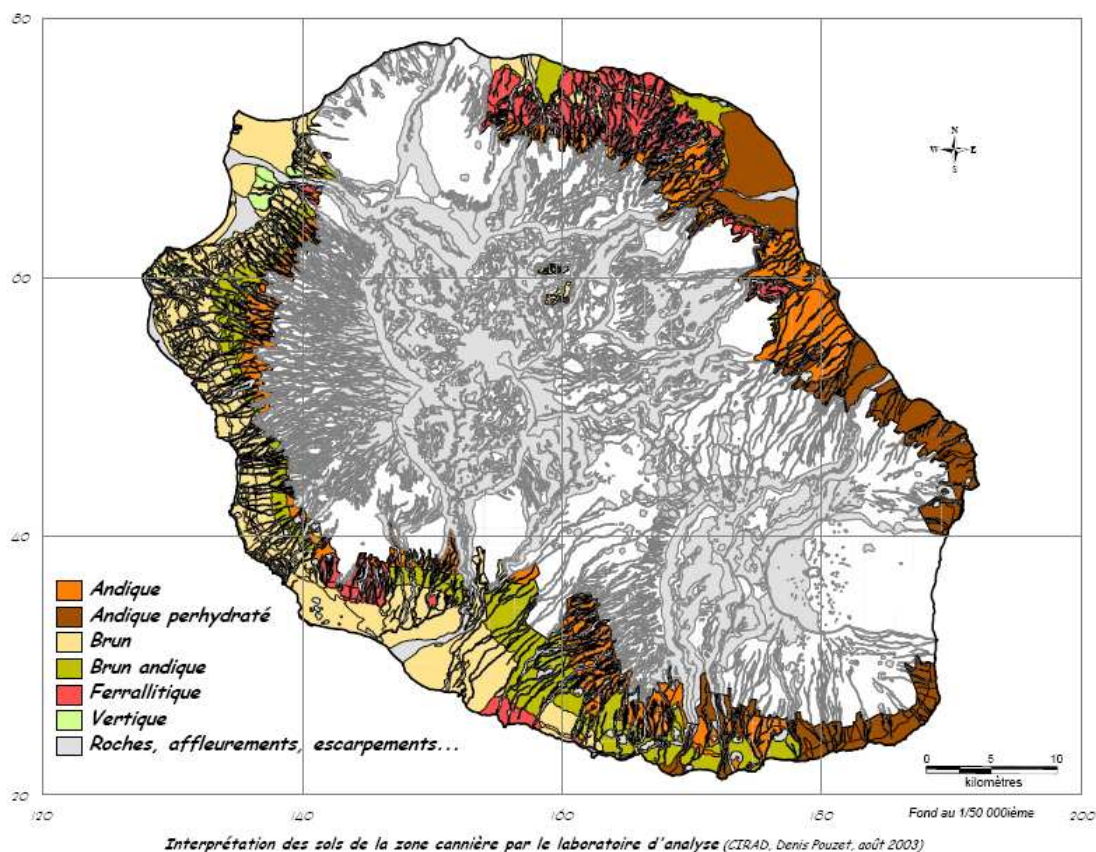


Figure 2: Interprétation des sols de la zone cannière par le laboratoire d'analyse (CIRAD, D.Pouzet, 2003)

1.2. La production de Canne à sucre *La plante*

La Canne à sucre est une plante herbacée tropicale et subtropicale, de la famille des Poacées (Graminées). Le genre *Saccharum* comprend six espèces dont trois sucrées (*S. Officinarum*, *S. Sinense*, *S. Barberi*). Elle est cultivée pour ses tiges qui contiennent un jus riche en saccharose, sucre cristallisé pour la commercialisation ou fermenté pour la production de rhum.

C'est une culture pluriannuelle cultivée à partir de boutures et en monoculture. Le cycle de la canne peut durer de 4 à 10 ans en fonction des espèces et des conditions du milieu, elle est coupée annuellement jusqu'à ce que les rendements soient jugés insuffisants. La plantation se fait en général au début de la saison des pluies (de janvier à mars à La Réunion), après un labour.

La canne possède un enracinement vigoureux et résistant aux parasites et aux maladies, peu exigeante en traitements phytosanitaires, elle assure également une bonne protection des sols contre l'érosion. En revanche, cette culture nécessite de gros besoins en eau et en chaleur, notamment pendant la phase végétative de croissance (cf **figure 3**). Il faut environ 2000 mm de pluie pendant la croissance pour obtenir de bons rendements. C'est la maturation qui est déterminante dans le processus d'enrichissement de la tige en saccharose (transformation du glucose et du fructose en saccharose). En effet, ici les besoins s'inversent par rapport à la phase de croissance, et c'est une disponibilité en eau réduite et une diminution relative des températures qui vont permettre de bons rendements en sucre (Fauconnier, 1991).

La récolte dure quatre à six mois, elle demande une logistique importante puisque les conditions climatiques conditionnent la croissance mais également la phase de maturation. De plus le broyage des tiges doit être réalisé dans un délai de 24 à 48 heures (selon le mode de récolte, manuel ou mécanique) après la récolte. Sinon, l'apparition de sucres non cristallisables affecte les rendements en sucre.

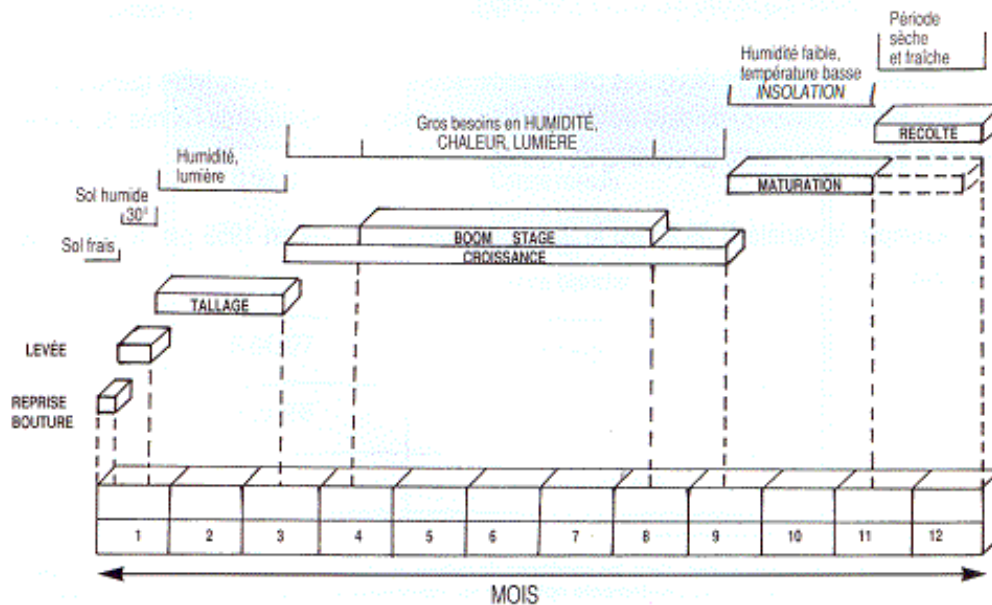


Figure 3: Décomposition du cycle annuel de la Canne (Fauconnier, 1991)

1.2.2. Economie de la filière

Contexte international et Européen

Le marché libre du sucre est étroit car il est principalement sujet à la consommation dans les pays de production, à des accords préférentiels tels que l'Initiative « Tout sauf les armes » de l'Union Européenne (UE) signé avec 48 pays les moins avancés qui vise à augmenter les échanges avec ces pays ACP (Afrique Caraïbes Pacifique), ou encore l'OCM sucre (Organisation commune des marchés). L'OCM sucre assure depuis la campagne 1968/1969 la régulation du marché du sucre au sein de la Politique Agricole Commune. Ce mécanisme de stabilisation du marché est soutenu par trois principes : un règlement d'importation, un règlement de production et un règlement d'exportation, en fixant les régimes des prix, des quotas et des échanges avec les pays tiers. Les OCM se sont réformées depuis 1992 pour mieux répondre aux exigences et aux évolutions des financements, la filière Canne est l'une des dernières à être réformée.

En effet, depuis 2004, la Communauté européenne s'est attaquée à la réforme du secteur sucrier. Tout d'abord, le but est de répondre aux engagements pris par l'UE devant l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC) pour limiter les exportations subventionnées créatrices de distorsions sur le marché international, ensuite de découpler les aides et la production, c'est-à-dire de favoriser l'aide à l'exploitation et non au produit, et enfin de prendre en compte plus qu'avant les attentes des consommateurs. Ainsi le nouveau Règlement sucre adopté au premier trimestre 2006 pour une

durée de 9 ans propose d'atteindre un équilibre du marché en diminuant les productions et les prix, en tenant compte des obligations internationales de l'UE. Ainsi trois mesures sont prises:

- Les *prix du sucre* (canne à sucre) doivent baisser de 36% sur quatre ans à partir de la campagne 2006/07, les planteurs reçoivent une aide directe (compensation à hauteur de 60% pour les trois premières années), pas de prix minimum fixé pour la canne à sucre dans les DOM ;
- Un *quota de production* est attribué à chaque pays producteur de sucre, il est réparti entre les fabricants de sucre. Un quota est également fixé sur les exportations de l'UE respectant les engagements pris auprès de l'OMC ;
- Un renforcement du *fonds de restructuration* incitant à l'abandon des quotas et à la diversification, ce fonds est alimenté par un montant de restructuration prélevé sur les quotas des sucreries, il n'est pas appliqué dans les DOM.

La canne à sucre à la Réunion

La production de canne à sucre occupe une place prépondérante à la Réunion, c'est la première zone de production de sucre pour la France. La surface cultivée en 2005 était de 25988 ha (source : la statistique agricole Agreste Réunion), soit environ 52% de la SAU, c'est la principale culture de l'île et elle touche près de 4800 agriculteurs. Les plantations s'étendent sur le littoral Est (zone chaude et humide) et sur les pentes de la côte Ouest et Sud, entre 300 et 800 mètres d'altitude. A l'Ouest, en dessous de 300 mètres, la canne ne peut pousser que grâce à l'irrigation. En effet, le basculement des eaux d'est en ouest a permis de rendre cultivable les terres plus littorales et sèches et d'améliorer la productivité de la zone.

La production cannière s'élève à 1,8 millions de tonnes en moyenne, et a même atteint plus de 1,9 millions en 2004 (cf **figure 4**). Cette filière garantit un équilibre économique non négligeable puisqu'elle représente près de 15000 emplois.

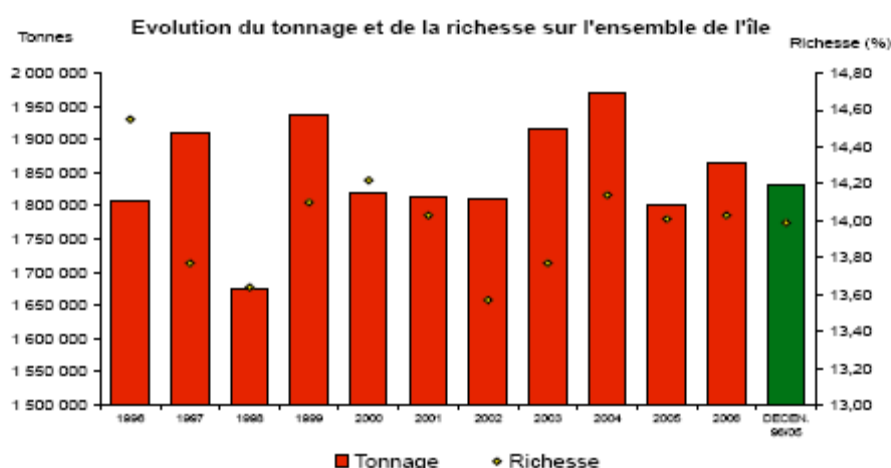


Figure 4: Les dernières campagnes de canne (Source: DAF)

La transformation de la canne est réalisée par deux usines appartenant à deux industriels: l'usine Le Gol pour les planteurs du Sud et de l'Ouest de l'île et l'usine de Bois Rouge pour les parcelles du Nord et de l'Est (cf **figure 5**). Afin d'améliorer la logistique des transports et transformations en période de récolte, les usines traitent les cannes de 14 centres de réception (ou balances) au sein des 5 bassins canniers (Beaufonds, Bois Rouge, Savanna, Le Gol, Grand Bois). Le CTICS supervise la campagne de récolte grâce au suivi des coupes, à des estimations de rendements sur des échantillons de chacun des bassins (à l'aide d'analyse de richesses) et à l'établissement d'un calendrier de récolte. Sont affectés aux planteurs des quotas journaliers de livraison au cours de la campagne qui dure 5 à 6 mois à partir de fin juin.

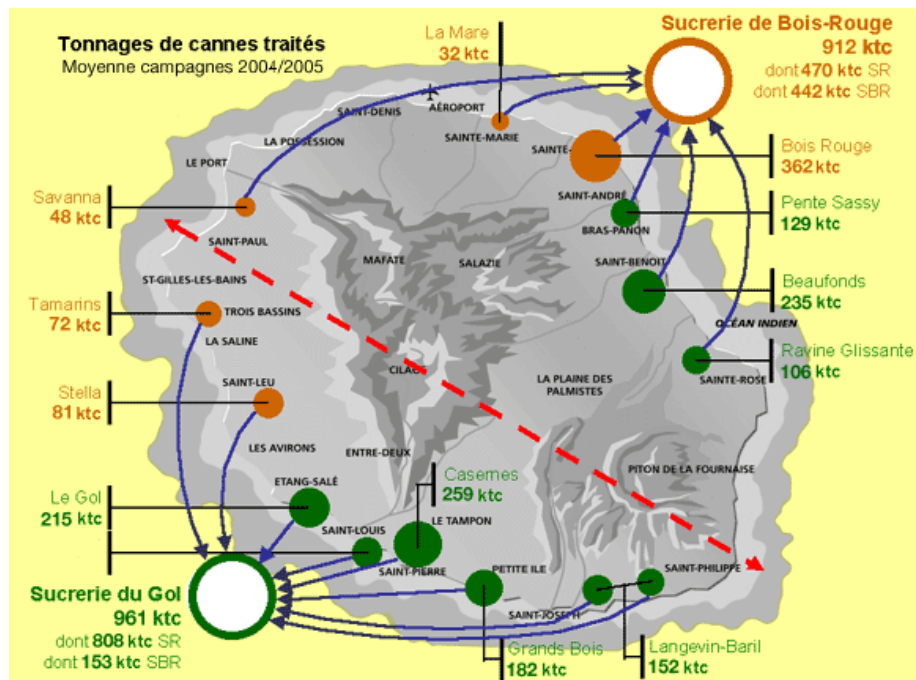


Figure 5: Répartition des centres de livraison (source: <http://www.sucredelareunion.com/images/carte3.gif>)

La filière se trouve aujourd'hui confrontée à plusieurs difficultés. D'abord, les deux usines doivent maintenir une production supérieure à leur seuil de rentabilité, imposant aux acteurs une certaine rigidité dans leur fonctionnement et peu d'initiatives individuelles. D'autre part, les terres agricoles subissent une pression foncière importante, en raison de l'extension des zones urbaines, de la reconversion des terres pour l'élevage. Ceci va nécessiter une augmentation des rendements avec une même surface cultivable, voire réduite. Autrement dit, augmenter les teneurs en sucre, et/ou augmenter le tonnage à l'hectare. Les planteurs réunionnais vont également devoir surmonter les réformes de l'OCM Sucre et donc augmenter leur productivité.

1.2.3. La recherche menée par le CIRAD et objectifs de l'étude

C'est dans ce contexte complexe que va devoir s'organiser la filière canne. La recherche menée par le CIRAD à la Réunion a pour but de développer des outils d'aide à la décision spatialisés pour la gestion de la production de canne à sucre. L'acquisition de données spatialisées issues de la télédétection, des mesures biophysiques, et des traitements de données en Système d'Information Géographique (SIG) seront intégrées à un système d'information (SI) global. Celui-ci va permettre la

diffusion et la communication des données aux acteurs de la filière, au travers d'interfaces individualisés (sécurisation de l'accès aux bases de données) accessible via Internet par exemple.

Le deuxième volet du projet consiste au développement d'applications faisant appel aux données du SI. La mise à disposition d'outils de simulation et de produits issus de la télédétection, reliés au parcellaire agronomique, aux données météorologiques et aux données de production, va permettre de fournir un certain nombre de supports optimisant les décisions des acteurs de la filière (prévision de récolte, diagnostic agronomique de la croissance des parcelles, optimisation de l'irrigation).

Le modèle de croissance de la canne à sucre MOSICAS est une des applications qui va faire appel à ce SI. En effet, pour fonctionner le modèle doit prendre en compte les données bioclimatiques et agronomiques existantes et ainsi donner résultats de simulations adaptées aux parcelles agricoles. Les données manquantes qui vont permettre d'améliorer les résultats du modèle seront complétées durant la mise en œuvre du projet.

Ainsi la Réserve Utile (RU), objet de notre étude, est un paramètre difficile à déterminer et qui est essentiel pour la précision des résultats issus de la modélisation de croissance. Toute la difficulté de la réserve utile du sol vient de l'hétérogénéité des milieux. Il existe plusieurs méthodes d'estimation de la réserve utile des sols. L'une consiste à définir la RU comme un déficit maximal en eau d'un sol, soit la quantité maximale d'eau qu'un sol peut céder à une culture. Elle correspond alors à la différence entre l'humidité à la capacité de rétention (toute l'eau gravitaire s'est écoulée, assimilée à l'humidité au pF 2,5) et l'humidité au point de flétrissement (taux d'humidité au-delà duquel les plantes se fanent de façon permanente, assimilée à l'humidité au pF 4,2, pression maximale que peut exercer une plante pour prélever de l'eau dans le sol). Cette méthode « classique » est toutefois destructive puisqu'elle nécessite les mesures de profondeur du sol, de densité apparente et d'humidités pondérales. Une autre méthode prend en compte les éléments grossiers du sol et le développement racinaire de la culture. La mesure du taux d'accès racinaire à l'eau du sol par comptage d'impacts racinaires sur le profil (Chopart, 2004) prend en compte non seulement les caractéristiques du sol mais également la physiologie du système racinaire, directement lié à la réserve en eau du sol. Cette méthode nécessite l'existence de profils racinaires sur parfois plus de trois mètres de profondeur, elle est également destructive.

Nous avons choisi une approche non destructive, applicable à grande échelle et nécessitant peu de main d'œuvre : l'analyse du couvert végétal par télédétection couplée à la simulation de croissance de biomasse par MOSICAS. Nous allons proposer une méthode qui consiste à interroger l'efficacité d'interception du couvert et à utiliser le modèle MOSICAS pour traduire cette mesure en valeur de RU.

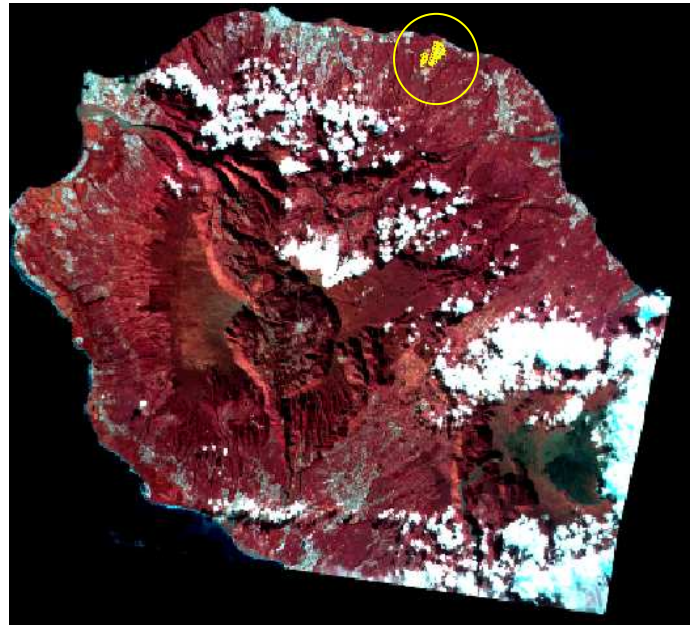
2. Matériel et méthode

2.1. Présentation du site d'étude

Afin de mener à bien cette étude, nous avons travaillé sur l'exploitation de Mr Caruel, composée d'une trentaine de parcelles de canne à sucre, située au Nord-Est de l'île (latitude : entre 20°53' S et 20°56' S ; longitude : entre 55°34 E et 55°36' E), sur la commune de Ste Suzanne. Les parcelles sont situées entre 35 et 235 mètres d'altitudes. Elles sont réparties sur 180 hectares, chacune faisant environ 5 hectares. Nous avons choisi de travailler sur ces parcelles car nous disposons des informations nécessaires à la mise en place de la méthode, et la composition des sols sur la zone est relativement homogène. Ces terres ont des pentes dépassant rarement les 10% et possèdent des surfaces planes, ce qui permet une mécanisation complète de l'exploitation. Les variétés cultivées sont la R570 et la R579 sur l'ensemble des parcelles.

2.1.1. Données climatiques

Pour la simulation, nous avons utilisé les données climatiques issues de l'extraction de la base de données météorologiques des 45 stations de Météo France et du CIRAD, et visualisées à l'aide de l'outil Gesmet 2. Ainsi les données pluviométriques ont été extraites de la station pluviométrique de Grand-Hazier, proche de l'exploitation (cf **figure 7**), car celle des Trois Frères (également très proche) a été fermée en 2001. Pour le reste des données climatiques (températures, Rayonnement Global, Evapotranspiration, vitesse du vent, humidité...), c'est la station de La Mare qui a été utilisée, également la plus proche station de l'exploitation.



**Figure 6: Localisation de l'exploitation M.Caruel
(Image SPOT4 du 17/05/2006)**

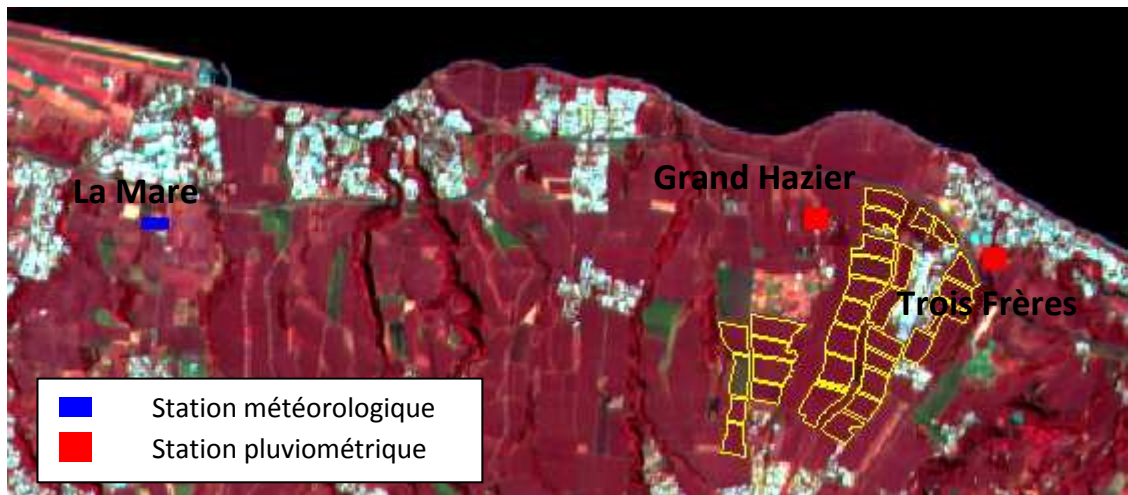


Figure 7: Localisation des stations météorologiques (Image SPOT4 du 17/05/2006)

Ces données climatiques ont également été un critère de sélection des périodes étudiées. Le modèle de croissance utilisé pour notre étude fonctionne grâce à deux modules : un module de croissance et un module de bilan hydrique (cf paragraphe 2.2.1). Pour que le paramètre RU influence le modèle et donc la croissance de biomasse, il faut que le module de bilan hydrique ait un impact sur le module de croissance. Pour cela, les simulations doivent avoir lieu en condition de stress hydrique. L'étude des données météorologiques au cours du cycle va donc permettre de sélectionner les années pour lesquelles nous allons modéliser les parcelles d'étude.

2.1.2. Morpho-pédologie de la zone

L'exploitation repose sur deux principaux types de sols soit trois unités morpho-pédologique selon M.Raunet (1991). Ces trois unités ont des caractéristiques très proches, leur altitude les différencie : les unités 17 et 18 ne dépassent pas les 200 mètres d'altitude et l'unité 30 s'étend jusqu'aux parcelles les plus hautes de l'exploitation (cf ANNEXE 1). L'altération des mugéarites, roches mères que l'on trouve dans cette zone, est très avancée, c'est déjà le stade ferrallitique : les sols montrent un horizon B épais souvent mélangés à des poches et placages de matériaux remaniés mixtes, englobant des altérations ferrallitiques et des cendres andiques, contribuant à épaissir encore davantage la couche meuble.

Unités 17 et 18 : zones de basse altitude au vent

Bande qui s'étend de St Denis à St André et ne dépassant pas 200 mètres d'altitude. A la base, la roche pourrie est sous la forme d'éléments anguleux issus de « gratons ». Au-dessus, la matrice argileuse halloysitique de l'horizon B (1 à 2 mètres d'épaisseur) est brune à brun rougeâtre, bien structurée. Ont été différenciées :

- l'unité 17 : Sols ferrallitiques faiblement désaturés, à horizon B épais brun à brun rougeâtre.
- l'unité 18 : Sols ferrallitiques érodés jusqu'à l'horizon d'altération, de couleur brun-foncé ; cailloutis altérés dès la surface, cette unité correspond aux zones rabotées par la dynamique de glissement des altérations.

En monoculture de canne, les sols ferrallitiques de ces deux unités sont qualifiés de « terres franches » car elles sont épaisses, sans cailloux, faciles à travailler et intégralement mécanisables. En revanche, en raison des argiles à halloysite prédominantes, ces sols sont très sensibles au compactage du aux passages répétés des engins lourds de récoltes.

Unité 30 : Sols ferrallitiques Andiques

Cette unité concerne le Nord de l'île, et est uniquement cultivées en CAS. L'unité 30 est peu accidentée. Ce sont des formations superficielles composées de deux matériaux :

- une couche d'altérites ferrallitiques développées directement sur les mugéarites
- une couche de cendres de la phase V, à caractères andiques

Les sols peuvent présenter jusqu'à 3,50 mètres d'épaisseur. Le matériau est globalement homogène. Les sols sont profonds, sans cailloux, bien structurés et bien drainés. La texture est moins argileuse que celle des sols ferrallitiques non andiques donc moins sensibles au compactage.

Nous disposons également d'une carte des réserves utiles du parcellaire cannier (D.Pouzet, 2006, carte non publiée, cf ANNEXE 2). Elle complète les informations pédologiques par les caractéristiques hydriques des parcelles d'études. Les RU estimées sont de l'ordre de 100 mm pour l'unité 17, de 70 mm pour l'unité 18 et de 80 mm pour l'unité 30.

2.1.3. Informations sur le parcellaire agricole

Les dates de coupes marquant le début de croissance des cannes de chaque parcelle sont nécessaires aux simulations de MOSICAS. Elles sont fournies par l'exploitant (cf ANNEXE 3) ainsi que d'autres informations qui vont permettre d'apporter un complément d'information :

- Le *tonnage récolté*, qui donne une idée de la productivité relative des parcelles ;
- *La technique de labour* utilisée par l'exploitant. Celui-ci effectue des labours légers, à des profondeurs relativement faibles (20 cm environ) ;
- *L'âge ou numéro de la repousse*, ceci va nous permettre de réaliser une première sélection des parcelles à étudier en fonction des années. En effet, le modèle MOSICAS étant calé pour un stade de première repousse (cf paragraphe 2.2.1), nous avons restreint notre étude aux parcelles proches du domaine de validité du modèle. Nous avons ainsi éliminé les parcelles de la dernière repousse, avant l'arrachage ; les parcelles en cours de replantation ; et la

première année de culture puisque le premier cycle est plus long que celui des autres repousses.

2.2. Couplage des données de télédétection dans la modélisation de croissance

2.2.1. Simulation des efficacités d'interception par MOSICAS

Présentation MOSICAS

Le modèle MOSICAS est composé d'un module de croissance de la canne à sucre (① sur la figure 9), relié à un bilan hydrique (②). Le module de croissance est basé sur l'interception du rayonnement, sa conversion en biomasse puis la partition de cette dernière en ses différentes composantes que sont les tiges (rendement) et le sucre (qualité). Il prend en compte dans ces processus les stress thermiques et hydriques (Martiné, 2003). Le module de bilan hydrique permet de moduler la simulation de la croissance grâce à des coefficients de stress calculés selon les disponibilités de l'eau dans le sol. Le fonctionnement est basé sur le remplissage et la vidange de la réserve utile du sol (réserve facilement utilisable et difficilement utilisable) en fonction des entrées et des sorties d'eau (pluie, irrigation, drainage et évapotranspiration).

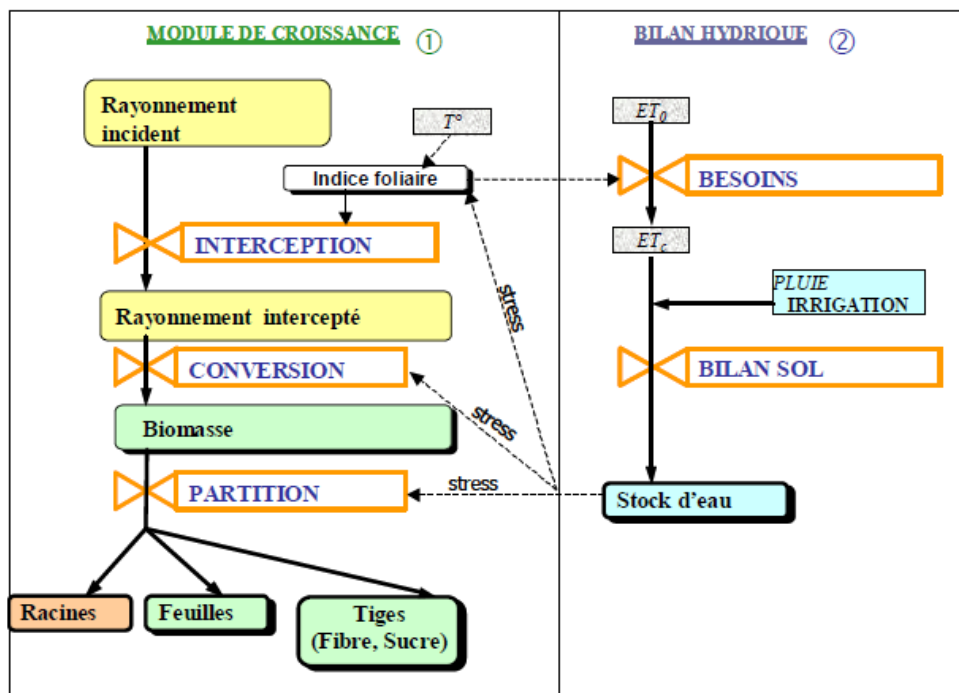


Figure 8: Fonctionnement des deux modules de MOSICAS, d'après Martiné, Combres, Mézino

Le modèle est calé pour les conditions pédoclimatiques de la Réunion, pour la variété R570 cultivée en première repousse sur des cycles maximum de 13 mois, avec un écartement proche de 1,5 m, sans enherbement, ni maladies ou ravageurs. Il simule au pas de temps journalier différentes variables en rapport avec la croissance de la canne : hauteur de tige, rendements, lai, matières sèche usinable, somme des évapotranspirations etc...

Les applications réalisées jusqu'à présent concernent la prévision des productions (Todoroff, 2000) ; le diagnostic agronomique sur les exploitations (Pouzet et al., 2004) ; et les potentialités de l'irrigation sur la production (Todoroff et al., 2002).

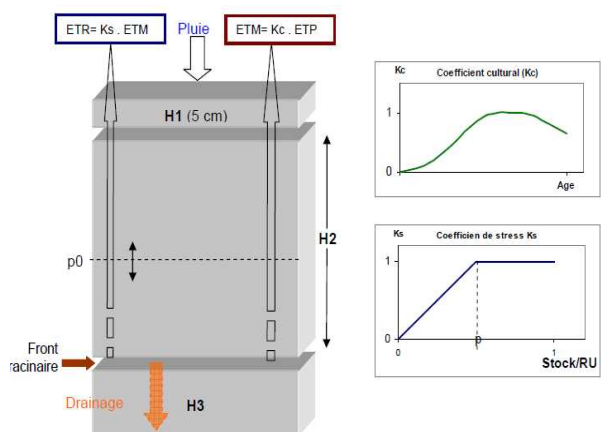
Données d'entrées de simulation

Les entrées sont réunies dans une base de données de type Access. Cette base contient les tables correspondantes aux différents types d'entrée. Les paramètres nécessaires à notre étude sont les suivants :

- *Le climat* renseigné à l'aide des données pluviométriques de la station Grand-Hazier et des données climatiques de la station de La Mare (cf paragraphe 2.1.1) ;
- *Parcelles / essai* : C'est dans cette table que l'on va entrer les paramètres descriptifs des parcelles : ses coordonnées géographiques, son altitude, le sol auquel elle est associée, les stations climatiques et pluviométriques associées et les poids relatifs correspondants. Sur l'onglet ou dans la table *traitement*, on intégrera les données relatives à l'année de culture étudiée avec la date de début correspondant au début de la repousse suite à la coupe précédente, et la date de fin correspondant à la date de coupe, ou dans le cadre de cette étude la date de l'image SPOT à partir de laquelle les efficacités d'interception ont été calculées. Ceci dans le but d'avoir les résultats de simulations jusqu'à cette date. Cette table intègre également les conditions initiales de simulation : le coefficient cultural (K_c de 0.2 pour un sol couvert à 0.4 pour un sol nu) ; l'humidité du sol, fraction de la réserve utile remplie (0 si la réserve est vide, 1 si elle est remplie) ; on peut également indiquer la profondeur d'enracinement ; l'écartement entre ligne, choisi à 1,5 m ; et le code du cycle.

- *Sol* : On traitera de sols monocouches uniquement, faisant appel au module hydrique pFactor (Allen et al., 1998). Ce modèle classique à deux réservoirs considère que la réserve utile se compose de deux parties, la réserve facilement utilisable (RFU) et la réserve difficilement utilisable (RDU) avec $RU=RDU+RFU$. La RFU concerne l'eau de rétention la plus rapidement mobilisable pour répondre à la demande de la plante. Cette eau se trouve donc à des succions proches de la capacité de rétention. Le module hydrique considère que tant que la RFU n'est pas épuisée, la plante évapotranspire à l'ETM ($ETR/ETM=1$). Sinon $ETR/ETM=vaRDU/capaRDU$. Ce

modèle remplit prioritairement la RDU avant la RFU. On peut également paramétrer le P_0 ou seuil de stress hydrique, c'est le rapport entre la Réserve difficilement utilisable et la Réserve Utile ($P_0=RDU/RU$). En général : $RFU= 2/3 RU$. Donc $P_0=0,33$.



Le modèle calcule l'efficacité d'interception (E_i) à l'aide de l'indice foliaire (L_{ai}) et d'un coefficient K_e . L'indice foliaire permet de définir les besoins en eau de la canne et de relier ainsi le bilan hydrique au modèle de croissance. Il est modélisé en fonction de la température selon un bilan d'accroissement moins sénescence de surface foliaire (Martiné, 1996, 1998). Pour le calage du modèle, K_e a été estimé à 0,48 (Martiné, 2003).

$$E_i = 1 - \exp(-K_e * L_{ai})$$

2.2.2. Calcul de l'efficacité d'interception par télédétection

Radiométrie de la Canne à sucre

Le cycle de la canne à sucre étant variable dans le temps et dans l'espace (au sein même de la parcelle), la culture est difficile à caractériser au travers d'une seule image satellite. En revanche, son profil temporel radiométrique est caractéristique.

Sur les images SPOT, les canaux Rouge(R), Proche Infra Rouge (PIR) et Moyen Infra Rouge (MIR) permettent de différencier au mieux la réponse spectrale de la canne (Begué et al., 2006). Plus de 90% de l'information sur un couvert végétal est contenue dans les canaux rouges et PIR (Baret et al., 1988).

Dans le visible (380-700 nm), les végétaux présentent une réflectance faible. Cela est dû aux pigments, principalement les chlorophylles a et b, qui présentent respectivement une bande d'absorption dans le bleu (450 nm) et le rouge (660 nm).

Dans le PIR (700 nm – 1,3 μ m), les pigments n'interviennent plus dans le comportement spectral, la quantité de rayonnement absorbée par la feuille est très faible. C'est la structure du feuillage, principalement les différents tissus et les arrangements de cellules et d'espaces intercellulaires qui sont responsables des valeurs de réflectances.

Les changements physiologiques qui accompagnent les phénomènes de maturation et de sénescence sont responsables de changements importants du comportement spectral dans le visible et le PIR. Au champ, à ces variations de réflectances en fonction de l'état physiologique de la plante, se rajoute les effets du sol, qui selon la couverture plus ou moins grande de la canopée et le port des feuilles (angle d'inclinaison de la feuille par rapport à l'horizontale), aura un effet plus ou moins important sur la réflectance. La canne est une plante érectophylle (angle de 90° par rapport à l'horizontale) et présente donc une sensibilité à l'effet de rang dans le PIR pour des visées inclinées de plus ou moins de 30° par rapport à la verticale (Girard et Girard, 1999).

Dans le MIR (1,3 – 2,5 μ m), le comportement spectral des feuilles est principalement affecté par la teneur en eau des cellules. L'eau présente trois bandes d'absorption dans ce domaine. Ainsi le MIR permet de détecter les résidus de culture et donc les parcelles coupées.

Grâce à la combinaison de des canaux R et PIR, on peut calculer l'indice de végétation normalisé ou NDVI (Rouse et al., 1974 ; Tucker, 1979).

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$$

Cet indice couramment utilisé reflète l'activité photosynthétique du couvert (Tomas et al., 1999) et se base sur la part d'information retenue dans les canaux Rouge et Proche Infrarouge, bandes dans lesquelles le contraste entre le sol et la végétation est le plus grand.

Plus la valeur de NDVI est élevée, plus la végétation sera développée. Dans le cas d'une repousse après la coupe, le NDVI d'une parcelle de canne augmente très rapidement pour atteindre son maximum en moins de 4 mois ; dans le cas des plantations, l'augmentation du NDVI est plus douce (maximum atteint en 8 ou 9 mois) en raison de la mise en place du système racinaire (cf **figure 8**).

Bien que le NDVI permette de réduire en partie les effets des variations angulaires de la réflectance, il doit être utilisé avec beaucoup de prudence compte tenu de sa sensibilité aux effets atmosphériques.

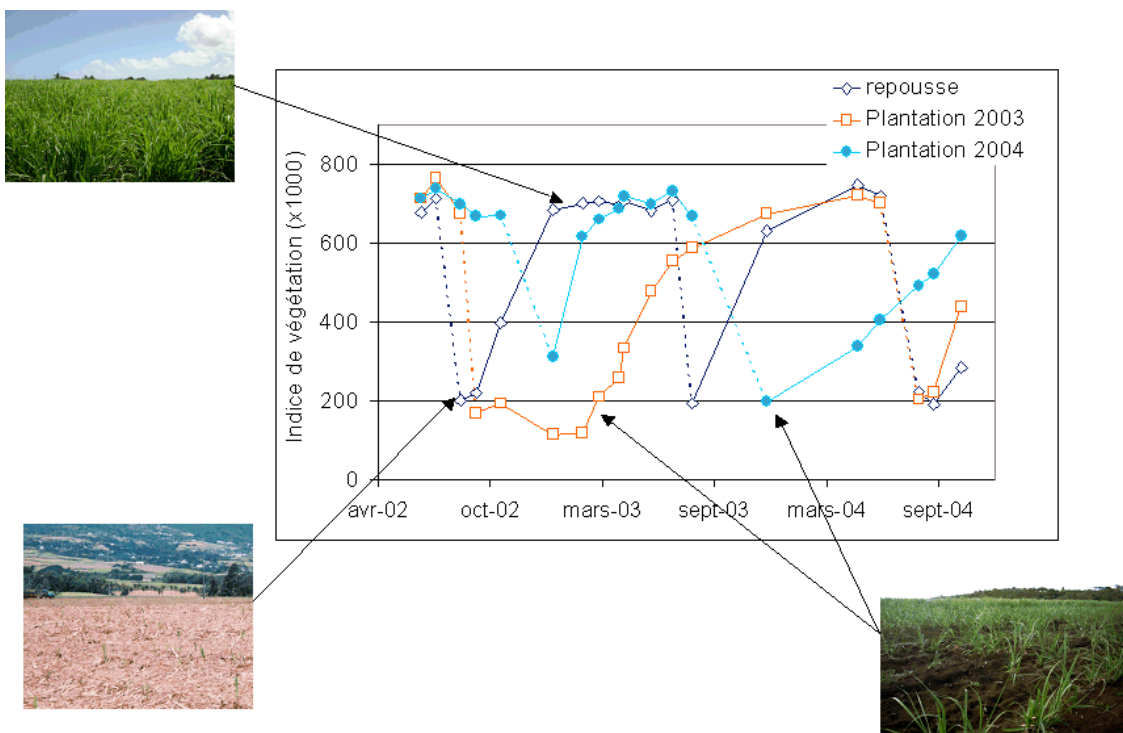


Figure 9: Evolution du NDVI de 3 parcelles de canne à la Réunion (A. Begué, source: projet SUCRETTE)

Les images utilisées pour cette étude sont issues de la base de données Kalideos ISLE Réunion (Information Satellitaire pour l'Environnement). Créée en 2002 à l'initiative du CNES, elle a pour objectif de « promouvoir auprès de scientifiques de divers domaines l'utilisation de la télédétection » (<http://kalideos.cnes.fr/>). Les images et produits sont disponibles à différents niveaux de traitement : 1a (corrections radiométriques) et 3a (ortho-images corrigées du relief), à différentes dates et pour différents capteurs (images des satellites SPOT 1 à 5). Pour cette étude, ce sont les images des satellites SPOT 4 et 5 qui sont utilisées.

Choix des images

Trois paramètres ont motivés le choix des images :

- La présence d'un *stress hydrique* proche de la date de l'image (cf paragraphe 2.1.1), et ayant lieu pendant la période de croissance de la biomasse
- La disponibilité des données de l'exploitant pour l'année de l'image
- L'âge de la canne à la date de l'image. En effet, comme nous l'avons vu dans le paragraphe 2.1.1, l'efficacité d'interception déduite des valeurs de NDVI est un paramètre très sensible et faible en début de croissance. L'évolution du NDVI au cours du cycle (cf **figure 8**) montre que pour une repousse, la valeur maximale est atteinte en mai.

Nous avons donc sélectionné quatre images SPOT prise au mois de mai, alors que le couvert végétal de la canne est déjà avancé. Ceci pour 2000, 2006, 2007 et 2008. Les caractéristiques des images figurent dans l'ANNEXE 4.

Les images utilisées sont de type tc (top of canopy, correction des effets atmosphériques). Elles sont importées et traitées sous ERDAS Imagine. On traduit l'image brute en « image des NDVI ». On calcule la moyenne des valeurs de NDVI de chaque parcelle, c'est-à-dire la moyenne des pixels contenus dans chacune des parcelles (grâce à la fonction ZONAL Attributes).

Calcul de l'efficacité d'interception

L'efficacité d'interception conditionne la production de biomasse d'une culture. Le modèle de Monteith (1977), adapté à l'utilisation de données radiométriques (Kumar et Monteith, 1981) calcule la production de matière sèche en fonction du rayonnement solaire incident par l'intermédiaire de trois efficacités. Parmi celles-ci, l'efficacité d'interception du rayonnement représente la capacité du couvert à intercepter le rayonnement photosynthétique. Dépendante des propriétés optiques du couvert, elle peut ainsi être dérivée des mesures de réflectances ou de combinaisons de réflectances.

L'étude menée sur les estimations de rendement en canne à sucre à partir des données de télédétection (Pellegrino, 2004) considère que l'efficacité d'interception est nulle lorsque le NDVI est égal à celui d'un sol nu ou couvert de pailles, et égale à 1 lorsque le NDVI atteint sa valeur maximale. Ainsi nous calculerons les valeurs des efficacités d'interception des parcelles étudiées à l'aide d'une régression linéaire simple.

Pour établir cette relation, nous avons pris en considération les moyennes des valeurs de NDVI par parcelle sur la totalité de la sole cannière pour les images de mai 2007 et mai 2008. Nous avons également vérifié les fréquences par valeur de NDVI pour éliminer les valeurs aberrantes ou non représentatives (parcelles sous nuages ou présence de bâtiments sur le parcellaire).

Ainsi la relation retenue est : **$E_i = 1.408 * NDVI - 0.282$**

Avec comme valeur de NDVI pour un sol nu 0.2 et comme valeur de NDVI maximale 0.910. Nous appliquons cette relation aux valeurs moyennes de NDVI extraites pour chaque parcelle.

Nous obtenons des valeurs d'efficacité d'interception mesurée par télédétection à une date donnée (celle des images SPOT). Nous comparons ces valeurs à celles simulées par le modèle de croissance MOSICAS. Nous pouvons alors identifier la valeur de Réserve Utile qui conduit à la valeur d'efficacité d'interception simulée la plus proche possible de l'observation.

2.2.3. Interpolation et calcul de la réserve utile

Pour la simulation, il est possible de faire varier un paramètre afin d'obtenir les résultats correspondants. C'est ainsi que nous allons chercher à obtenir des efficacités d'interception simulées les plus proches possible des valeurs observées par télédétection. En faisant varier le paramètre réserve utile de 50 à 200 mm, avec une valeur centrale de 125 mm et un pas de 10%, nous obtenons une sortie de simulation à la date choisie (dates des images SPOT) pour chacun des 85 traitements avec les valeurs d'efficacité simulées pour chaque valeur de réserve utile.

Ainsi, nous obtenons des distributions $RU=f(E_i)$ pour chaque traitement. A partir de ces graphiques, nous allons utiliser les efficacités d'interception observées par télédétection pour avoir une estimation de la réserve utile pour chaque traitement. Les courbes ne répondant pas à un modèle mathématique précis, nous avons choisi d'interpoler les valeurs de RU de manière linéaire, par portions de segment, pour chaque traitement (exemple : **figure 10**).

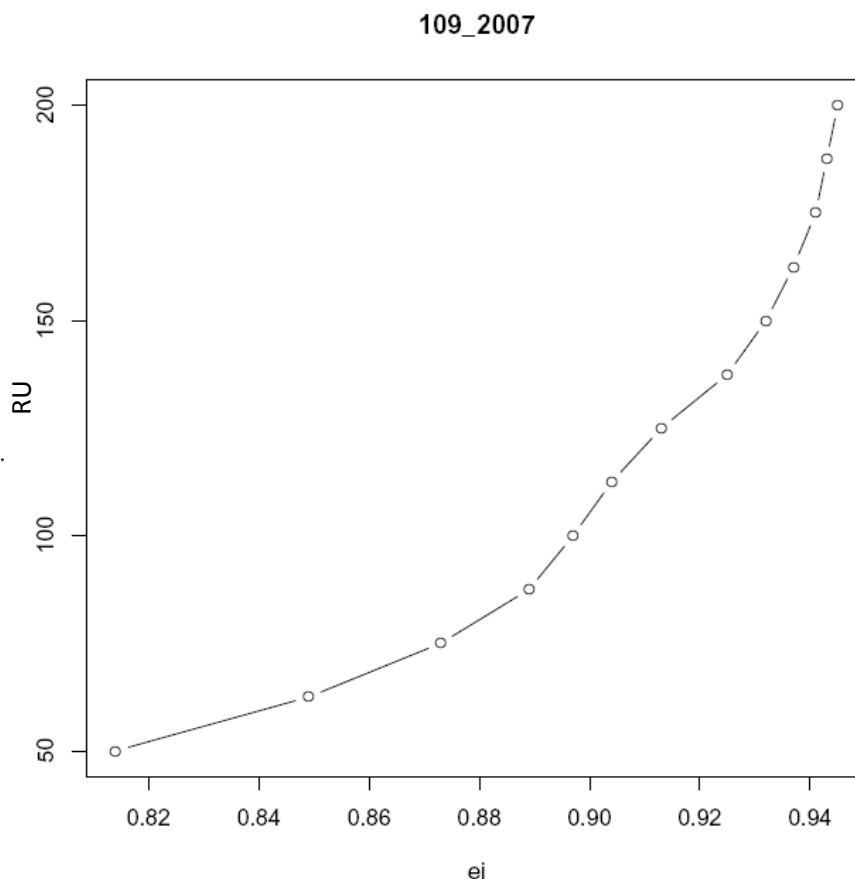


Figure 10: Courbe $RU=f(E_i)$ servant pour l'interpolation de la RU du traitement 109_2007 grâce à l' E_i de l'image SPOT du 11/05/2007

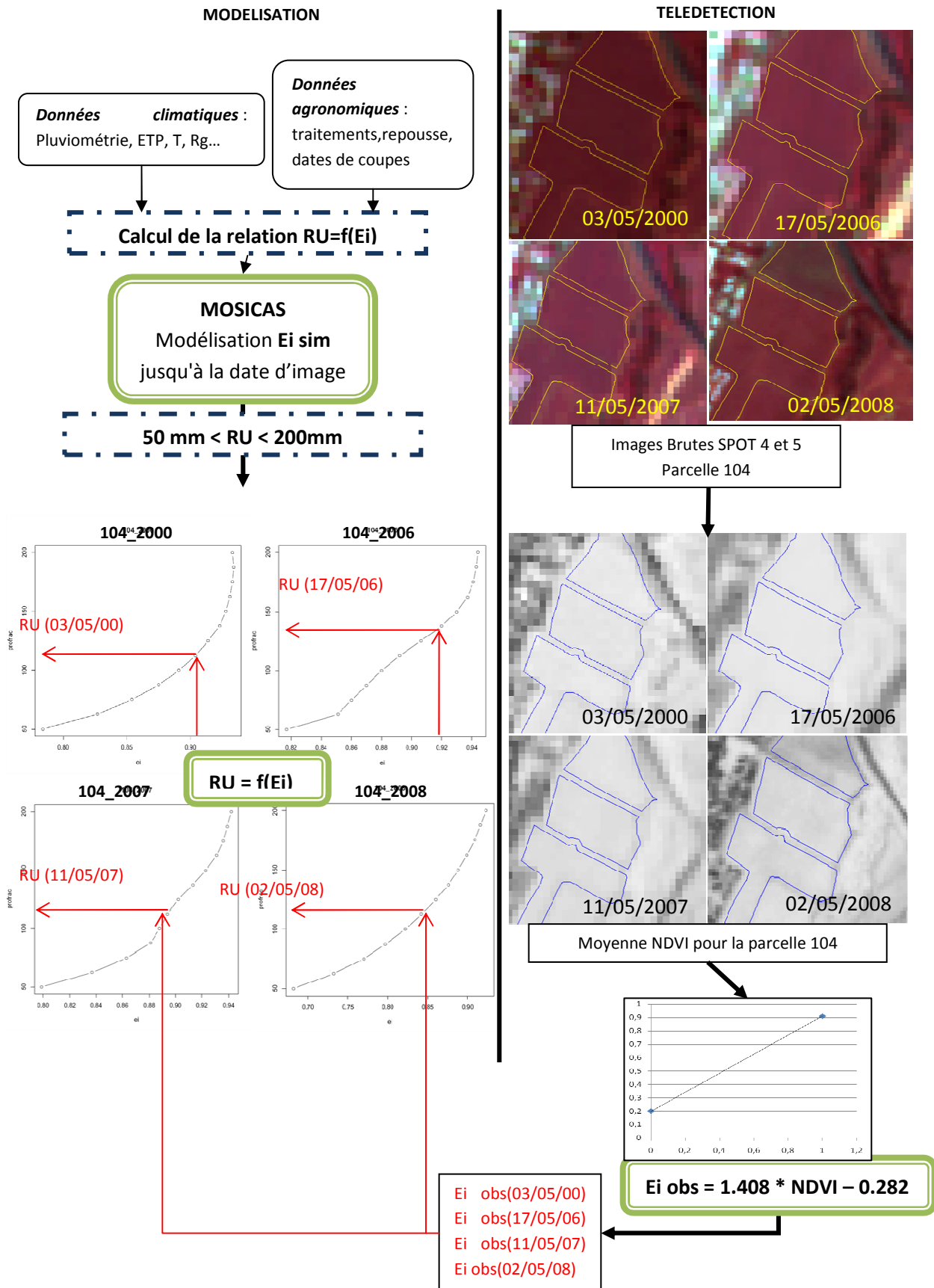


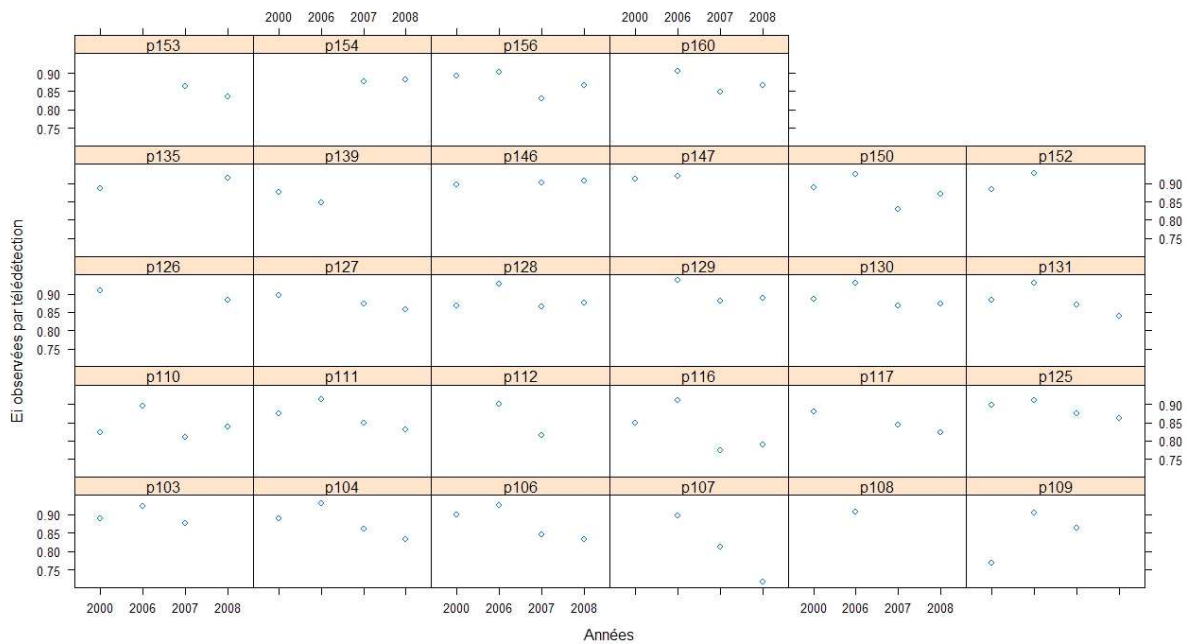
Figure 11: Schéma récapitulatif de la méthode d'estimation de la RU des sols par couplage de données de télédétection et de MOSICAS

3. Résultats et discussion

3.1. Extraction des RU moyennes par parcelles

3.1.1. Efficiences d'interception observées par télédétection

Comme décrit dans la méthode, nous avons calculé les efficacités d'interception pour chaque parcelle à la date des images (pour 2000, 2006, 2007 et 2008). L'ensemble des traitements statistiques et des représentations graphiques qui ont servi à l'interprétation des résultats ont été réalisés à l'aide du logiciel R (R Development Core Team, 2008).



Remarque : p103, p104, p106... sont les noms attribués aux parcelles d'études.

Figure 12: Ei observées par télédétection pour chacune des parcelles aux dates d'images SPOT

Avec ces efficacités d'interception obtenues par télédétection et les courbes $RU=f(Ei)$ (Cf le cas de la parcelle p104 dans la **figure 10**), nous pouvons réaliser une interpolation par segments des valeurs de RU correspondantes aux efficacités observées.

On élimine les parcelles présentant des valeurs d'efficacité d'interception extrêmes en dehors de la gamme des Ei simulées.

3.1.2. Comparaison des RU en fonction des années

Présentation des résultats

Les résultats des RU obtenues par interpolation linéaire figurent sur la **figure 13**. On obtient des valeurs uniques de RU pour chaque parcelle et chaque année.

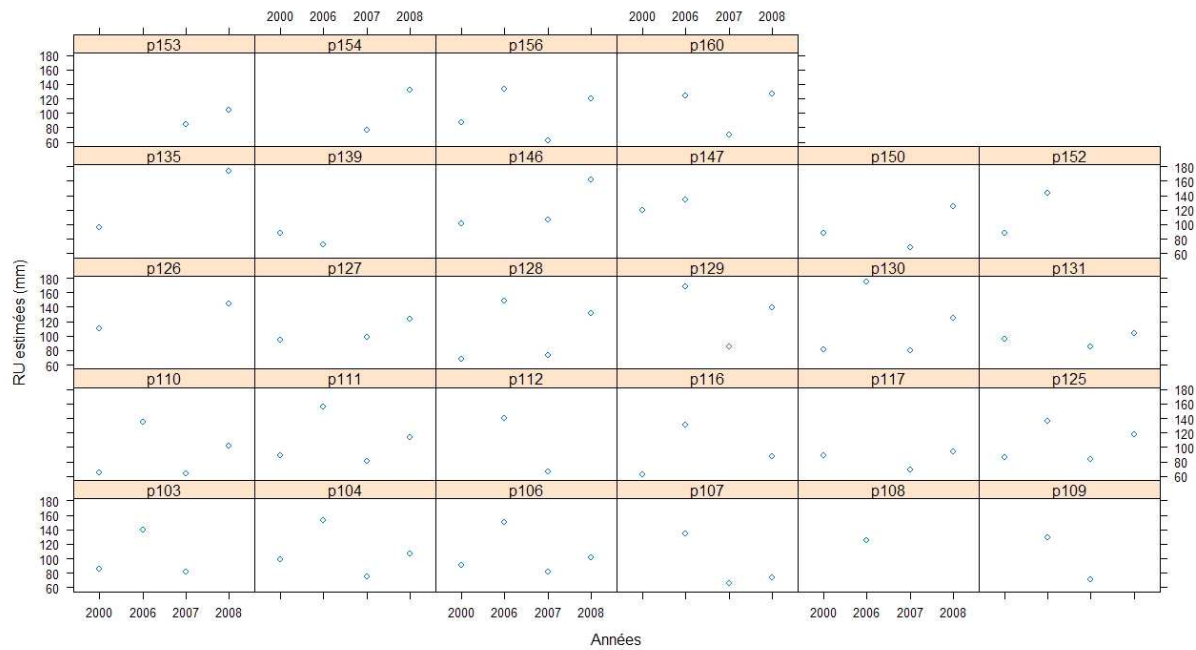


Figure 13: Résultats de RU (en mm) par parcelle et par an

La RU moyenne sur la totalité des traitements est de 105,53 mm, avec un minimum à 62 mm et un maximum à 175 mm. Si l'on considère les résultats en fonction des années, on obtient les valeurs moyennes suivantes :

Tableau 1: Moyenne des RU estimées par années

Année	RU moyenne (mm)
2000	89.25
2006	138.48
2007	77.38
2008	119.39

On remarque que les résultats de l'année 2006 sont sensiblement supérieurs à ceux des autres années.

Les années 2000 et 2007 montrent des résultats de RU relativement proches.

Les résultats paraissent cohérents d'une manière globale par rapport aux études pédologiques et hydriques qui ont été réalisés sur l'ensemble de l'île (D.Pouzet définit des RU de l'ordre de 70 à 100 mm pour cette zone).

Afin de chercher les sources d'erreur d'estimation de RU, nous allons étudier différents facteurs expliquant la variabilité des résultats. Tout d'abord les effets année et repousse, puis les bilans climatiques.

Effet année et repousse sur l'estimation de la RU des sols

Afin d'étudier les effets repousse et année sur les estimations de RU, nous procédons à une analyse de variance à l'aide du logiciel R. Sont analysés les interactions entre ces deux facteurs, et l'effet de chacun d'entre eux.

Tableau 2: Résultats de l'Analyse de Variance: effets repousses et années sur l'estimation de la RU

	Degrés de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F. value	Pr (>F)	Signif. codes
Année	3	46601	15534	49.9694	1.011 e-15	***
Repousse	6	4797	799	2.5717	0.02876	*
Interaction	26	3473	217	0.6982	0.78326	
Résidus	55	17098	311			

Signif.codes : 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*'

Le **tableau n°2** montre que l'interaction entre les effets repousses et année n'est pas significative (Pr=0.78). En revanche l'effet année est hautement significatif, comme nous l'avons vu, les résultats de 2006 sont très différents des autres années. L'effet repousse est également significatif (au seuil de 5%), on a donc de manière indépendante les années et les repousses qui ont un impact sur les résultats de RU.

3.1.3.Comparaison des P-ETP moyens

P-ETP moyens

Comme nous l'avons vu précédemment, pour être dans le domaine de validité de la méthode, nous devons nous situer dans une période d'étude en stress hydrique relatif. Nous émettons donc l'hypothèse qu'il existe des conditions climatiques différentes pour chacune des années, et donc un stress hydrique plus ou moins important. Ceci pourrait expliquer les valeurs de RU estimées en 2006 plus élevées que les autres.

Nous avons donc cherché à calculer un indicateur de stress hydrique. Ont été utilisées les données climatiques des données climatiques ayant servi à la modélisation : la pluviométrie et l'ETP (Évapotranspiration Potentielle). La différence entre la pluviométrie et l'ETP, qui représente la demande climatique, montre le bilan climatique des parcelles au cours du cycle. En ramenant le cumul des valeurs quotidiennes de P-ETP au nombre de jour du cycle pour chaque parcelle, on obtient une moyenne journalière de P-ETP (**figure 14**).

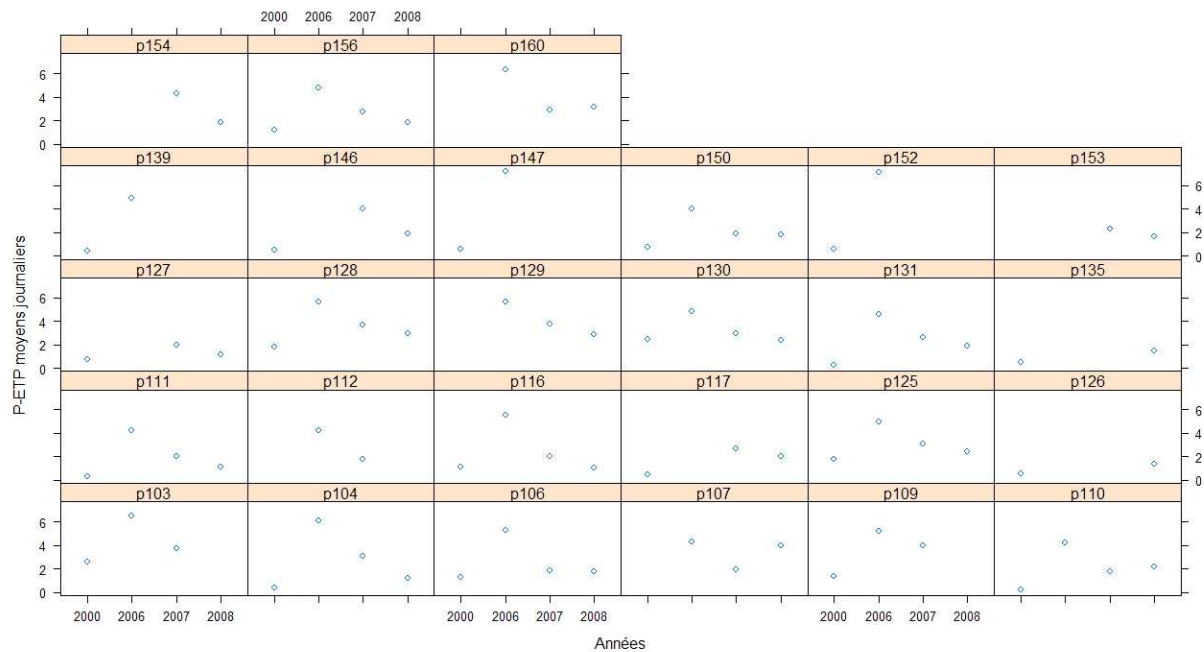


Figure 14: P-ETP moyens par traitements, stations : La Mare et Grand Hazier

Test de Wilcoxon sur l'année 2006

Sur la **figure 14**, le bilan climatique pour 2006 est meilleur que pour les autres années (plus de disponibilités en eau pour la canne). Nous réalisons un test de comparaison de moyennes non paramétrique : le test de Wilcoxon (avec ajustement de Benjamini et Hochberg, 1995, cité par Dalamasso et al., 2004). Celui-ci permet de tester deux à deux les moyennes de P-ETP annuelles. L'hypothèse nulle rejette la différence des moyennes.

Tableau 3: Résultats du test de Wilcoxon: comparaison des P-ETP journaliers moyens

P-Value	2000	2006	2007
2006	8.6 e-08	-	-
2007	5.1 e-08	8.6 e-08	-
2008	4.5 e-05	8.6 e-08	0.0021

Au seuil de 5% l'égalité est rejetée pour chaque paire d'années comparées. Ainsi le bilan climatique annuel est significativement différent d'une année sur l'autre. Cependant, les valeurs des P-Values pour 2006 comparées aux autres années sont plus faibles que pour les autres. L'année 2006 serait donc l'année dont la moyenne des P-ETP est la plus significativement différente. La **figure 15** montre la distribution des bilans climatiques annuels.

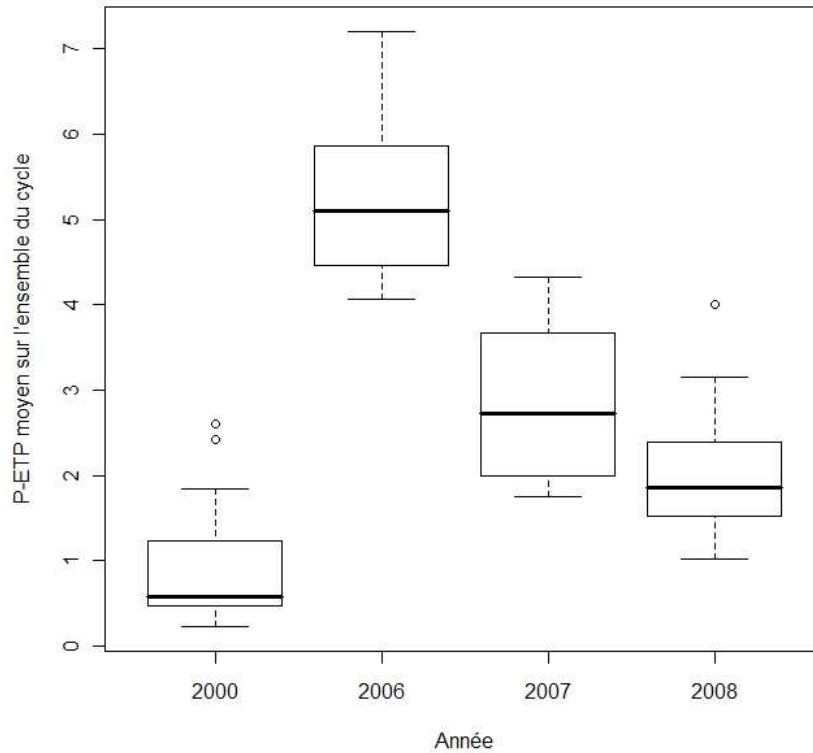


Figure 15: Statistiques descriptives des P-ETP moyens pour chacune des années (fonction boxplot de R)

RU moyennes par parcelle

L'objectif de l'étude est d'obtenir des estimations de RU pour chaque parcelle. Pour calculer cette moyenne, nous prenons uniquement les valeurs de RU des années 2000, 2007 et 2008, considérant que la méthode n'est pas valide pour l'année 2006 où le stress hydrique est trop faible. Les résultats obtenus par parcelles sont donc les suivants :

Tableau 4: Moyennes des RU des années 2000, 2007 et 2008 par parcelles d'étude

Parcelles	RU moyenne (2000, 2007, 2008) (mm)
p103	83
p104	93
p106	91
p107	70
p110	77
p111	94
p112	66
p117	83
p125	95
p126	127
p127	105
p128	90

p129	111
p130	95
p131	94
p135	134
p139	88
p146	123
p147	120
p150	109
p152	88
p153	94
p154	104
p156	89
p160	98

3.2. Validation des résultats

3.2.1.Simulation avec les RU moyennes

Les valeurs de RU parcellaire déterminées précédemment sont insérées dans la table *sol* de MOSICAS (cf paragraphe 2.2.1) pour chacune des parcelles.

Nous recalculons les simulations de croissance pour les quatre années. Nous validons les valeurs de RU retenues en comparant les résultats de l'année 2006 avec les trois autres années, sur la base des valeurs de :

- *L'efficience d'interception* : Les valeurs sont simulées pour la date des images SPOT et comparées aux efficacités mesurées par télédétection ;
- *Le rendement à l'hectare* (dont l'exploitant nous a fourni les données pour l'année 2000, 2006 et 2007 la campagne 2008 n'étant pas achevée à ce jour). Nous les comparons aux rendements simulés à la date de récolte effective des parcelles.

3.2.2.Comparaison des efficacités d'interception

Les valeurs de RU utilisées pour la simulation ayant été obtenues à partir des données de 2000, 2007 et 2008, on doit s'attendre à avoir des résultats d'efficacités d'interception proches des observations pour ces trois années. On va donc pouvoir regarder les valeurs simulées par le modèle pour 2006 avec les RU imposées. (L'ANNEXE 5 montre les histogrammes de répartitions des différences relatives d'efficacités d'interception pour chacune des années).

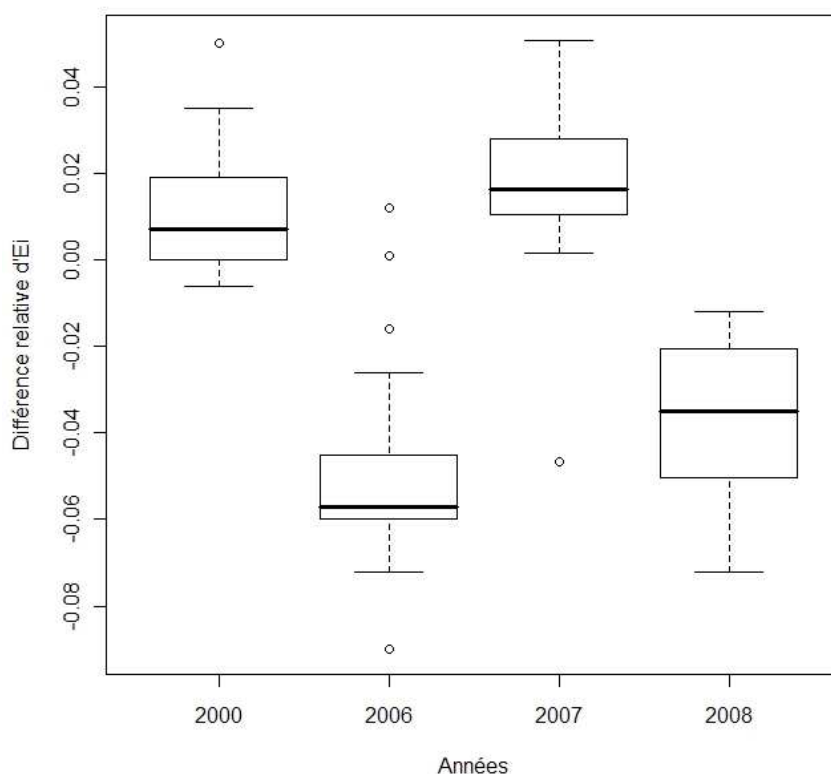


Figure 16: Statistiques descriptives des différences relatives d'Ei entre les observations et les simulations

Sur la **figure 15**, on observe des différences très faibles entre les années 2000 et 2007. Ceci s'explique par la proximité qui existait entre les valeurs de RU estimées pour ces deux années. En revanche, les différences sont plus grandes pour les années 2006 et 2008. Les valeurs de RU de l'année 2008 qui ont servi au calcul de la moyenne étaient en effet plus éloignées des valeurs de 2000 et 2007. Le fait de faire une moyenne pour ces trois années a donc accentué les différences d'efficacités d'interception simulées pour 2008.

Pour l'année 2006, dont la RU estimée a été exclue de la moyenne utilisée pour la validation, les Ei simulées sont éloignées des observations avec une erreur moyenne de l'ordre de 5% (cf ANNEXE 5). Malgré cette erreur, on trouve certains traitements dont les différences d'Ei sont très proches de 0, et l'historique de répartition des différences pour 2006 montre bien des valeurs qui tendent vers 0. Ceci montre une bonne robustesse de cette méthode.

3.2.3. Comparaison entre rendements simulés et observés

De la même manière que les efficacités d'interception simulées sont comparées aux observations, les rendements simulés à la date de coupe des parcelles sont comparés aux rendements de l'exploitant sur ces mêmes parcelles.

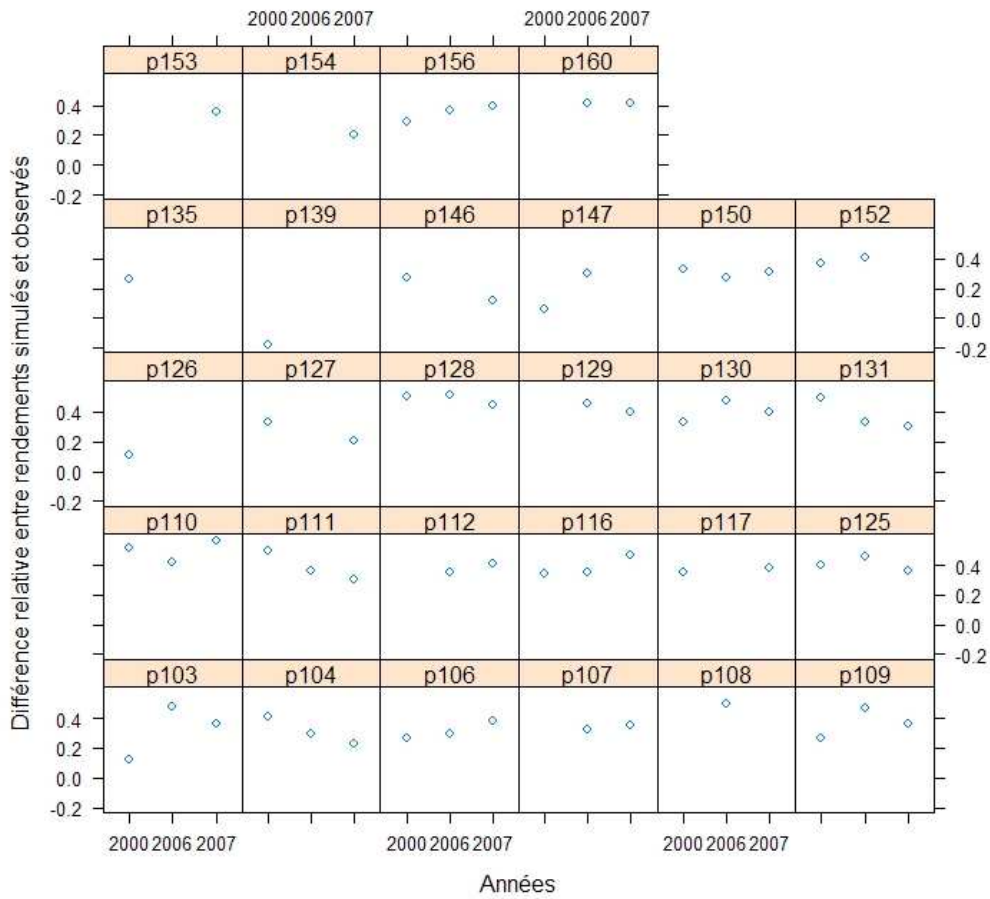


Figure 17: Différences relatives entre les rendements observés et simulés en fonction des années et des parcelles

Un test de Wilcoxon est réalisé pour comparer deux à deux la symétrie des répartitions des différences de rendements. Les résultats du test figurent dans le **tableau 5** :

Tableau 5: Résultats du test de Wilcoxon sur les différences de rendements simulés et observés

P Value	2000	2006
2006	0.21	-
2007	0.28	0.28

L'hypothèse nulle d'égalité des moyennes est validée au seuil de 5%, ce pour chacune des comparaisons. Ainsi, les différences de rendements ne sont pas significatives, ce qui confirme la robustesse du modèle.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Malgré le petit nombre de données, nous avons réussi à obtenir une valeur de réserve utile qui permet des simulations par MOSICAS proches des observations. Nous avons pu montrer la robustesse de la méthode pour les parcelles de l'exploitation de M. Caruel, avec des séries de données climatiques relativement différentes. Ceci par la réduction des écarts d'efficacités d'interception pour une année sans stress hydrique ; et par les faibles différences de rendements entre les simulations avec les RU estimées et les observations issues de la télédétection.

Cependant, d'autres facteurs sur lesquels nous n'avons pas pu travailler seraient intéressants à prendre en compte. Les données issues de la télédétection permettent effectivement de déterminer une efficacité d'interception du rayonnement par la plante, mais d'autres éléments peuvent interagir sur l'indice de végétation normalisé comme l'enherbement, la fertilisation ou l'irrigation. La méthode ayant été élaborée sur des parcelles non irriguées en raison de la difficulté de rencontrer un stress hydrique dans une telle condition, nous avons exclu de notre étude la question de l'irrigation. Par ailleurs nous n'avons pas pris en compte les amendements apportés aux parcelles, ce qui peut avoir une influence importante sur la biomasse et donc sur l'indice de végétation utilisé pour l'étude. De même, la validation de la méthode sur l'exploitation de M. Caruel restreint la diversité des types de sols qu'il est possible de rencontrer à la Réunion, paramètre qui est essentiel dans l'estimation de la réserve utile. Le modèle étant calé sur une repousse, une variété, et pour les conditions pédoclimatiques de la Réunion, nous avons validé la méthode dans ce contexte agro-environnemental. Il serait très intéressant lorsque le modèle le permettra, d'étendre la méthode à d'autres conditions. La méthode nécessitant un stress hydrique, l'extension sera restreinte à des conditions climatiques où ce stress est ressenti par la canne à sucre, notamment en excluant les parcelles situées en altitude car trop pluvieuses. Ce seuil de stress à partir duquel la méthode peut-être considérée fiable n'a pas été mis en évidence. Il est donc pour le moment impossible de déterminer les parcelles dont les conditions climatiques peuvent ou non être utilisées pour cette méthode.

Un complément intéressant à cette étude serait l'estimation des réserves utiles sur une plus grande superficie. Et ainsi de vérifier si les résultats peuvent être généralisés aux unités morpho-pédologiques de La Réunion (unités Raunet, 1991). Bien que la télédétection permette de travailler à l'échelle du pixel, l'étude au niveau parcellaire est nécessaire puisque la méthode fait appel au modèle de croissance.

L'estimation de la réserve utile des sols est un élément très important pour la production agricole, conditionnant la croissance de la plante, les potentialités de développement de méthodes d'irrigation ajustées aux besoins de la plante, d'amélioration des prévisions de rendement pour la filière canne à sucre à la Réunion. Cette méthode propose des résultats intéressants, certes coûteuse en technologies, elle nécessite peu de main d'œuvre et pourrait être appliquée à l'ensemble de la sole cannière réunionnaise. Cependant elle est restrictive du fait de la spécificité de l'outil de modélisation sur la culture de la canne à sucre. Sa transposition à d'autres contextes environnementaux, économiques et ruraux pourrait être intéressante, dans la mesure où un modèle de croissance et les données nécessaires à son fonctionnement sont disponibles.

INDEX DES ABREVIATIONS

CIRAD – Centre International de Recherche pour l’Agronomie et le Développement

CNES – Centre National d’Etudes Spatiales

CTICS – Centre Technique Interprofessionnel de la Canne et du Sucre

DOM – Département d’Outre Mer

E_i – Efficience d’Interception du rayonnement

ETM – Evapotranspiration Maximale

ETP – Evapotranspiration Potentielle

ETR – Evapotranspiration Réelle

Ha - Hectares

K_c – Coefficient cultural

L_{ai} – Indice foliaire

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index (Indice de végétation Normalisé)

OCM – Organisation Commune du Marché

OMC - Organisation Mondiale du Commerce

P – Pluviométrie

P_o – Seuil de stress hydrique

RDU – Réserve Difficilement Utilisable

RFU – Réserve Facilement Utilisable

RU – Réserve Utile

SAU – Surface Agricole Utile

SI – Système d’Information

SIG – Système d’Information Géographique

UE –Union Européenne

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Zonage Pluviométrique (source: Météo France)	8
Figure 2: Interprétation des sols de la zone cannière par le laboratoire d'analyse (CIRAD, D.Pouzet, 2003)	10
Figure 3: Décomposition du cycle annuel de la Canne (Fauconnier, 1991)	11
Figure 4: Les dernières campagnes de canne (Source: DAF)	12
Figure 5: Répartition des centres de livraison (source: http://www.sucredelareunion.com/images/carte3.gif) .	13
Figure 6: Localisation de l'exploitation M.Caruel (Image SPOT4 du 17/05/2006)	15
Figure 7: Localisation des stations météorologiques (Image SPOT4 du 17/05/2006).....	16
Figure 8: Evolution du NDVI de 3 parcelles de canne à la Réunion (A. Begué, source: projet SUCRETTE).....	21
Figure 9: Fonctionnement des deux modules de MOSICAS, d'après Martiné, Combres, Mézino.....	18
Figure 10: Schéma récapitulatif de la méthode d'estimation de la RU des sols par couplage de données de télédétection et de MOSICAS	24
Figure 11: Ei observées par télédétection pour chacune des parcelles aux dates d'images SPOT (p103, p104... sont les noms attribués aux parcelles)	25
Figure 12: Résultats de RU (en mm) par parcelle et par an	26
Figure 13: P-ETP moyens par traitements, stations : La Mare et Grand Hazier	28
Figure 14: Statistiques descriptives des P-ETP moyens pour chacune des années (fonction boxplot de R)	29
Figure 15: Statistiques descriptives des différences relatives d'Ei entre les observations et les simulations	31
Figure 16: Différences relatives entre les rendements observés et simulés en fonction des années et des parcelles	32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Moyenne des RU estimées par années.....	26
Tableau 2: Résultats de l'Analyse de Variance: effets repousses et années sur l'estimation de la RU.....	27
Tableau 3: Résultats du test de Wilcoxon: comparaison des P-ETP journaliers moyens.....	28
Tableau 4: Moyennes des RU des années 2000, 2007 et 2008 par parcelles d'étude.....	29
Tableau 5: Résultats du test de Wilcoxon sur les différences de rendements simulés et observés.....	32

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M., 1998. *Crop Evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*. FAO irrigation and drainage paper 56, 330p., chap.8.
- Bappel E., Bégué A., Martiné J.F., Pellegrino A., Siegmund B., 2004. *Assimilation of a biophysical parameter estimated by remote sensing using SPOT 4&5 data into a sugarcane yield forecasting model*, CIRAD, 4 p.
- Bappel E., 2005. *Apport de la télédétection aérospatiale pour l'aide à la gestion de la sole cannière réunionnaise*. Thèse.
- Bégué A., Degenne P., Baillarin F., Lemonnier H., Lebourgeois V., Gargaros D., 2005. *Projet SUCRETTE (SUivi de la Canne à Sucre par Télédétection). Compte-rendu de fin de recherche – CIRAD/Spot Image*. 98p.
- Buchon Y., 2003. *Suivi de l'évolution de la canne à sucre à l'aide des paramètres biologiques estimés par télédétection*. Rapport de stage CIRAD.
- Chopart J.L., Gaudin R., Brouwers M., 2001. *L'eau utile et les caractéristiques hydrodynamiques des sols sous culture de canne à sucre*. Agriculture et Développement n°24 : p30-37.
- Combres J.C., Le Mezo L., Mete M., Bourjon B., 2001. *Réserve utile et mesures d'humidité, difficulté de calage des modèles de bilan hydrique*. Agriculture et Développement n°24 : p39-47.
- Dalamasso C., Broët P., Moreau T., 2004. *Procédures de comparaison multiples: principes et limites, application à l'étude différentielle de l'expression transcriptionnelle par puces à ADN*. Rev. Epidémiologique Santé Publique. 52 : 523-537.
- Fauconnier R., 1991. *La Canne à sucre*. Le technicien d'agriculture tropicale, 165p.
- Girard M.C., Girard C., 1999. *Traitement des données de télédétection*. DUNOD, 529p.
- Martiné J.F., Combres J.C., Mézino M., 1999. *Simulex, plate-forme de simulation sous Visual Basic, adaptée à la canne à sucre*. Notice d'utilisation.
- Martiné J.F., Combres J.C., Mézino M., 2001. *Une plate-forme de simulation comme outils d'analyse et d'aide à la décision : SIMULEX*. Document CIRAD.
- 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.
- Meffre B., 2006. *Mise au point et évaluation de méthodes de prévision de rendement de la canne à sucre à partir d'un modèle de croissance (MOSICAS) et d'imagerie satellitale*. Rapport de stage CIRAD-CA Guadeloupe.
- Langellier P., 1992. *Les caractéristiques hydriques des sols, définition de leurs aptitudes à l'irrigation*. Document CIRAD, 27p.

Pellegrino A., 2004. *Utilisation des données de télédétection pour l'estimation du rendement en tige et en sucre chez la canne à sucre en Guadeloupe et à la Réunion*. Rapport d'étape, GEOTROP CIRAD AMIS.

Pouzet D., 1997. *Les sols à la Réunion*. Panorama agricole et sucrier (1988-1997). ARTAS. 222p, p30-37.

Pouzet D., 2003. *Interprétation de la zone cannière par le laboratoire d'analyse*. Document cartographique au 1/50 000, non publié, CIRAD.

Pouzet D., 2006. *Carte des Réserves Utiles pour l'île de la Réunion*. Document cartographique, non publié, CIRAD.

Raunet M., 1988. *Les Andosols de l'île de la Réunion – préparation d'un programme de recherches pluridisciplinaires*, séminaire de St Denis, CIRAD, CNRS, INRA, ORSTOM, UNIVERSITE. Document Cirad. 231p. p9-50.

Raunet M., 1990. *Les grandes catégories de sols de l'île de la Réunion, Notice de la carte morpho-pédologique à l'échelle du 1/50 000*. Etude financée par le Conseil Général de la Réunion et le FIDAR. Document cartographique et Notice d'utilisation, CIRAD.

Raunet M., 1991. *Le milieu physique et les sols de l'île de la Réunion – Conséquences pour la mise en valeur agricole*. CD-Rom, Région Réunion, CIRAD.

Robert R., 1985. *Climat et hydrologie à la Réunion. Etude typologique et régionale des pluies et de l'écoulement*. 438p.

Stieltjes L., Steenhoudt M., Gourgand B., Daessle M., 1986. *Atlas hydrogéologique de la Réunion*. BRGM, Conseil Général de la Réunion, Ministère de l'Agriculture.

R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>).

Sites internet

Site officiel de la FAO : www.fao.org

Spot Image : www.spotimage.fr

Site du programme Kalideos : <http://kalideos.cnes.fr/>

CIRAD : www.cirad.fr

Site du CTICS: www.ctics.fr

Site complet sur la filière sucre à la Réunion : www.sucredeleunion.com

Météo France Réunion : [www.meteo.fr/temps/domtom/La Reunion](http://www.meteo.fr/temps/domtom/La_Reunion)

ANNEXES

ANNEXE 1 : Carte pédologique des parcelles étudiées, d'après la carte morpho-pédologique de M.Raunet (1990).

ANNEXE 2 : Carte des réserves utiles des sols de l'île de la Réunion, D.Pouzet (2006).

ANNEXE 3 : Données fournies par l'exploitant servant pour la modélisation et pour l'interprétation des résultats.

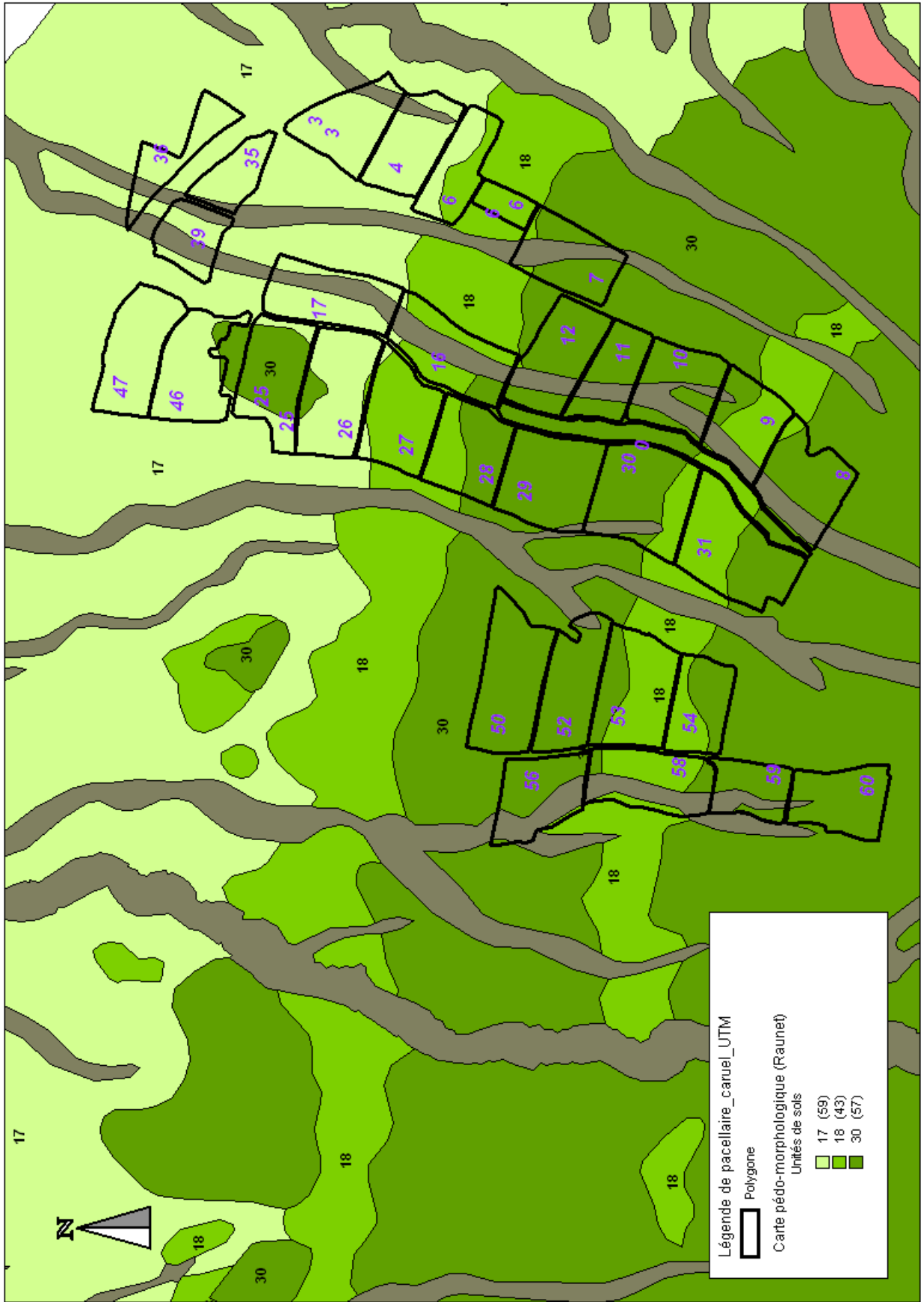
ANNEXE 4 : Descriptifs des Images SPOT 4 et 5 utilisées pour la méthode.

ANNEXE 5 : Histogramme des répartitions des différences relatives entre les efficacités d'interception observées par télédétection et simulées avec le modèle avec les RU moyennes.

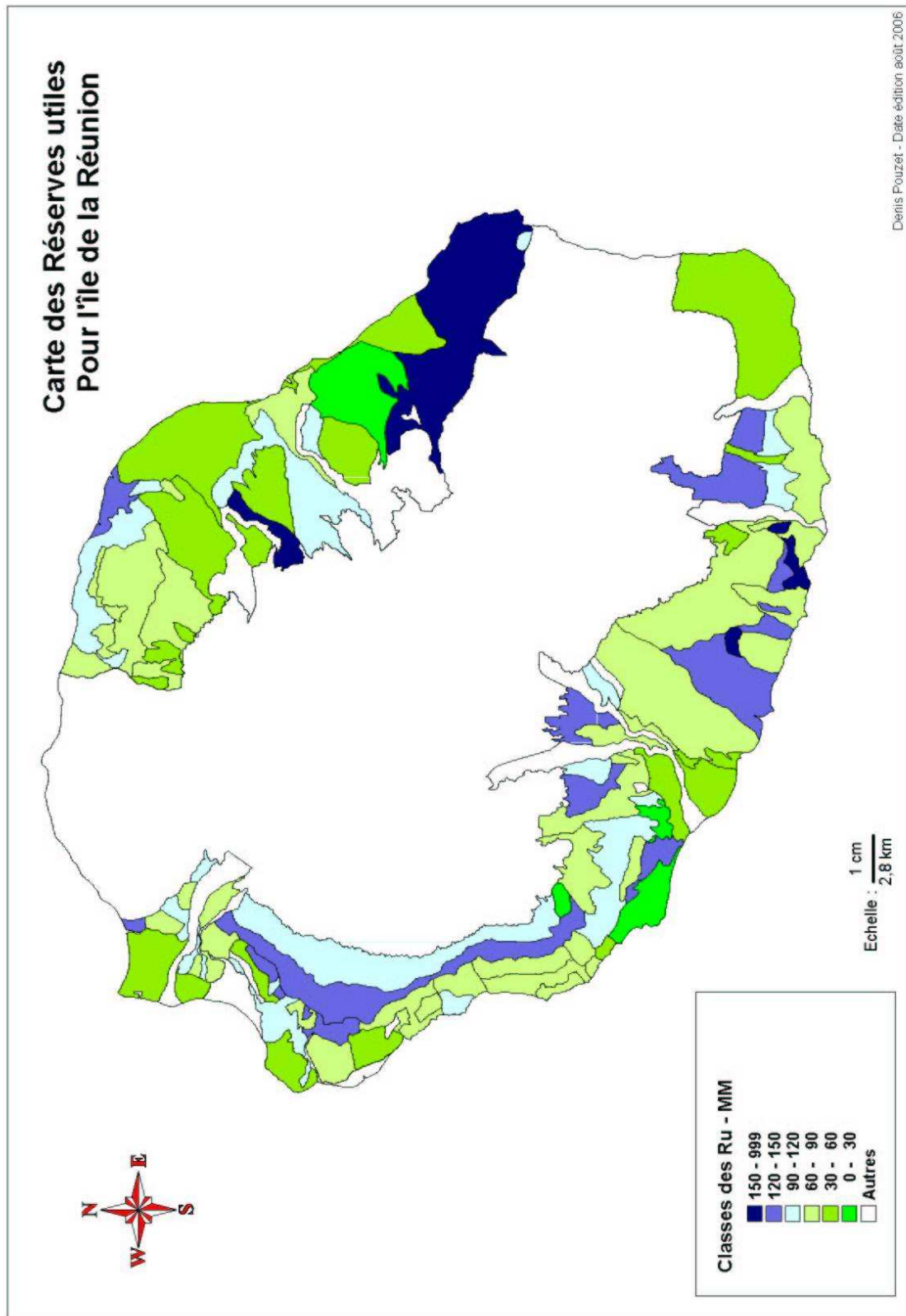
ANNEXE 1 : Carte pédologique de l'exploitation Caruel

Fond de carte : Carte morpho-pédologique de l'île de la Réunion (Raunet, 1990)

Echelle : 1cm = 0,13km



ANNEXE 2 : Carte des RU pour l'île de la Réunion







ANNEXE 3 : Données de l'exploitant utilisées pour l'étude

nomtrait	nomparcel	Année	datedeb	date image	repousse	Rdt réels caruel (t/ha)
103_2000	103	2000	29/11/1999	03/05/2000	R1	124,32
103_2006	103	2006	08/11/2005	17/05/2006	R7	87,68
103_2007	103	2007	17/11/2006	11/05/2007	R7	90,96
104_2000	104	2000	02/08/1999	03/05/2000	R3	84,78
104_2006	104	2006	29/10/2005	17/05/2006	R4	117,07
104_2007	104	2007	27/10/2006	11/05/2007	R5	103,64
104_2008	104	2008	01/09/2007	02/05/2008	R6	Abs
106_2000	106	2000	22/10/1999	03/05/2000	R5	114,93
106_2006	106	2006	12/10/2005	17/05/2006	R2	93,43
106_2007	106	2007	19/07/2006	11/05/2007	R3	125,23
106_2008	106	2008	03/10/2007	02/05/2008	R4	Abs
107_2006	107	2006	06/08/2005	17/05/2006	R5	108,13
107_2007	107	2007	14/07/2006	11/05/2007	R6	121,32
107_2008	107	2008	13/12/2007	02/05/2008	R7	Abs
108_2006	108	2006	04/11/2005	17/05/2006	R5	88,50
109_2000	109	2000	26/10/1999	03/05/2000	R4	92,34
109_2006	109	2006	10/10/2005	17/05/2006	R4	99,16
109_2007	109	2007	27/11/2006	11/05/2007	R5	90,74
110_2000	110	2000	25/06/1999	03/05/2000	R4	100,42
110_2006	110	2006	30/07/2005	17/05/2006	R3	99,82
110_2007	110	2007	03/08/2006	11/05/2007	R4	93,10
110_2008	110	2008	08/11/2007	02/05/2008	R5	Abs
111_2000	111	2000	27/07/1999	03/05/2000	R6	70,46
111_2006	111	2006	29/07/2005	17/05/2006	R4	116,67
111_2007	111	2007	18/08/2006	11/05/2007	R5	112,72
111_2008	111	2008	25/07/2007	02/05/2008	R6	Abs
112_2006	112	2006	29/07/2005	17/05/2006	R6	107,53
112_2007	112	2007	28/07/2006	11/05/2007	R7	95,43
116_2000	116	2000	18/10/1999	03/05/2000	R2	98,35
116_2006	116	2006	18/10/2005	17/05/2006	R3	99,82
116_2007	116	2007	15/09/2006	11/05/2007	R4	77,93
116_2008	116	2008	06/08/2007	02/05/2008	R5	Abs
117_2000	117	2000	28/08/1999	03/05/2000	R1	121,65
117_2007	117	2007	11/10/2006	11/05/2007	R3	103,39
117_2008	117	2008	16/10/2007	02/05/2008	R4	Abs
125_2000	125	2000	09/11/1999	03/05/2000	R2	92,39
125_2006	125	2006	24/09/2005	17/05/2006	R3	101,06
125_2007	125	2007	26/10/2006	11/05/2007	R4	110,24
125_2008	125	2008	13/11/2007	02/05/2008	R5	Abs
126_2000	126	2000	16/09/1999	03/05/2000	R2	138,80
126_2008	126	2008	11/09/2007	02/05/2008	R1	Abs
127_2000	127	2000	30/09/1999	03/05/2000	R3	104,05
127_2007	127	2007	15/09/2006	11/05/2007	R1	128,68
127_2008	127	2008	24/08/2007	02/05/2008	R2	Abs
128_2000	128	2000	10/11/1999	03/05/2000	R4	81,13
128_2006	128	2006	21/10/2005	17/05/2006	R4	87,87
128_2007	128	2007	15/11/2006	11/05/2007	R5	90,01

nomtrait	Parcelle	Année	Date début	Date image	repousse	Rdts réels caruel
128_2008	128	2008	23/11/2007	02/05/2008	R6	Abs
129_2006	129	2006	20/10/2005	17/05/2006	R5	99,52
129_2007	129	2007	11/11/2006	11/05/2007	R6	99,69
129_2008	129	2008	22/11/2007	02/05/2008	R7	Abs
130_2000	130	2000	24/11/1999	03/05/2000	R5	97,29
130_2006	130	2006	08/09/2005	17/05/2006	R3	101,82
130_2007	130	2007	24/10/2006	11/05/2007	R4	103,61
130_2008	130	2008	12/11/2007	02/05/2008	R5	Abs
131_2000	131	2000	16/07/1999	03/05/2000	R2	102,29
131_2006	131	2006	23/08/2005	17/05/2006	R1	132,37
131_2007	131	2007	09/10/2006	11/05/2007	R2	118,68
131_2008	131	2008	11/10/2007	02/05/2008	R3	Abs
135_2000	135	2000	06/08/1999	03/05/2000	R1	114,32
135_2008	135	2008	24/09/2007	11/05/2007	R1	Abs
139_2000	139	2000	07/08/1999	03/05/2000	R1	159,73
139_2006	139	2006	21/09/2005	17/05/2006	R7	Abs
146_2000	146	2000	01/09/1999	03/05/2000	R1	113,02
146_2007	146	2007	28/11/2006	11/05/2007	R2	114,46
146_2008	146	2008	09/10/2007	02/05/2008	R3	Abs
147_2000	147	2000	24/08/1999	03/05/2000	R1	135,20
147_2006	147	2006	21/11/2005	17/05/2006	R7	77,00
150_2000	150	2000	04/10/1999	03/05/2000	R3	100,82
150_2006	150	2006	23/07/2005	17/05/2006	R1	147,38
150_2007	150	2007	12/09/2006	11/05/2007	R2	125,78
150_2008	150	2008	06/10/2007	02/05/2008	R3	Abs
152_2000	152	2000	21/09/1999	03/05/2000	R2	96,03
152_2006	152	2006	18/11/2005	17/05/2006	R7	82,50
153_2007	153	2007	26/09/2006	11/05/2007	R1	113,16
153_2008	153	2008	02/10/2007	02/05/2008	R2	Abs
154_2007	154	2007	05/12/2006	11/05/2007	R1	104,83
154_2008	154	2008	29/10/2007	02/05/2008	R2	Abs
156_2000	156	2000	20/10/1999	03/05/2000	R4	106,25
156_2006	156	2006	06/09/2005	17/05/2006	R2	120,20
156_2007	156	2007	12/10/2006	11/05/2007	R4	104,45
156_2008	156	2008	30/10/2007	02/05/2008	R5	Abs
160_2006	160	2006	05/11/2005	17/05/2006	R5	92,04
160_2007	160	2007	19/10/2006	11/05/2007	R6	109,33
160_2008	160	2008	27/11/2007	02/05/2008	R7	Abs

ANNEXE 4 : Caractéristiques des images SPOT utilisées

Image	Date	Mode	Niveau de correction CNES	Angle
 <p style="text-align: right;">SPOT 4</p>	03/05/2000	<p style="text-align: center;">XI</p> multispectrale Résolution : 20 m	<p style="text-align: center;">N3</p> ortho-images corrigées du relief	18.34L
 <p style="text-align: right;">SPOT 4</p>	17/05/2006	<p style="text-align: center;">XI</p> multispectrale Résolution : 20 m	<p style="text-align: center;">N3</p> ortho-images corrigées du relief	10.40R
 <p style="text-align: right;">SPOT 4</p>	11/05/2007	<p style="text-align: center;">XI</p> multispectrale Résolution : 20 m	<p style="text-align: center;">N3</p> ortho-images corrigées du relief	02.90L
 <p style="text-align: right;">SPOT 5</p>	02/05/2008	<p style="text-align: center;">J</p> Multispectrale Résolution : 10 m	<p style="text-align: center;">N3</p> ortho-images corrigées du relief	17.98L

ANNEXE 5 : Histogramme des répartitions des différences d'efficacité d'interception observées et simulées

