

UN MODELE DE PREVISION DE RENDEMENT DE LA CANNE A SUCRE BASE SUR DES IMAGES SATELLITAIRES SPOT : L'EXEMPLE DE LA REUNION

Nathalie Boyer¹, Pierre Todoroff¹, Louis Paulin¹, Agnès Bégué²

1 : CIRAD - UPR Systèmes de Culture Annuels Station de Ligne Paradis
7, chemin de l'IRAT 97410 Saint-Pierre, La Réunion
Tel : +262 2 62 49 92 61 - Fax : + 262 2 62 49 92 95
pierre.todoroff@cirad.fr

2 : CIRAD - UMR TETIS, Maison de la Télédétection
500, rue Jean-François Breton 34093 Montpellier
Tel : +33 4 67 54 87 39 - Fax : +33 4 67 54 87 00
agnes.begue@cirad.fr

Résumé

Cet article présente une méthode de prévision de récolte de canne à sucre à partir d'images satellites à haute résolution spatiale Spot, adaptée à des zones de production de canne à sucre composées d'une multitude de petites parcelles. Cette étude est réalisée sur l'exemple de l'île de La Réunion. Elle est basée sur l'ajustement d'une relation empirique entre l'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), mesuré au maximum de développement du couvert végétal, et le rendement en biomasse fraîche à la récolte. Le rendement est traduit en production à différentes échelles (centre de réception, bassin de production, sucrerie, île entière) par produit avec la surface des parcelles. Le modèle est appliqué en mode relatif pour estimer les variations de production d'une année à l'autre. Les variations de production estimées, ajoutées à la production mesurée de l'année précédente, permettent d'estimer la production de l'année à venir. La précision des prévisions de récolte ainsi réalisée est évaluée à partir des résultats de récolte des années 2008 et 2009. Les résultats sont très satisfaisants, avec une précision atteignant 6,6 % à l'échelle des centres de réception et 1,5 % à l'échelle de l'île entière. Ils démontrent l'intérêt économique et technique d'une telle méthode dans le cas de zones de production disposant de peu d'informations sur les conditions de culture de la canne (état végétatif de nombreuses parcelles, météorologie contrastée).

Mots-clés : prévision de récolte, canne à sucre, NDVI.

Abstract

This article presents a sugarcane harvest forecast method from Spot high spatial resolution satellite images suited to production regions made up of a great number of small fields. This study is conducted on the example of the Reunion Island. It is based on an empirical relation fit between the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) vegetation index measured at its peak and the observed yield (fresh biomass) at harvest. The yield is translated into production at different scales (collect centre, production basin, mill, whole island) by product with the fields' areas. The model is used in a relative operational mode in order to estimate production variations between two consecutive years. The estimated production variations values added to the previous year's production are an estimate of the forthcoming year's production. The accuracy of the forecasts is evaluated from the harvest production data of years 2008 and 2009. The results are very satisfactory, with an accuracy down to 6.6 % at the collect centres scale and 1.5 % for the total production of the island. They demonstrate the economical and technical usefulness of this method in the case of production regions with poor information on the growing conditions of the sugarcane crops (vegetation development of numerous fields, contrasted climates).

Keywords: harvest forecast, sugarcane, NDVI.

1. Introduction

La télédétection a prouvé depuis de nombreuses années son potentiel d'appui au suivi et à la gestion de la production agricole, e.g., (Moran et al., 1997 ; Bastiaanssen et al., 2000 ; Pinter et al. 2003).

Un des champs d'application qui suscite un vif intérêt de la part des gestionnaires de production et décideurs industriels et institutionnels est la prévision de récolte. Cette prévision est notamment nécessaire pour optimiser la gestion des territoires, anticiper les prix des denrées alimentaires afin d'élaborer les stratégies commerciales, définir les orientations des politiques agricoles, estimer les stocks nationaux et mondiaux afin

d'évaluer les besoins alimentaires, *e.g.*, (Mac Donald et Hall, 1980; Hielkema et Snijders, 1994; Brown, 2008).

En outre, dans le cas particulier des productions intégrées du champ à l'usine, comme c'est le cas pour la production de sucre, la productivité des filières est fortement conditionnée par le bon déroulement de la phase de récolte dont dépend également l'efficacité d'extraction du sucre. Il est en effet crucial de maximiser le volume annuel de canne broyée en ajustant au mieux les outils industriels (définition de la période de fonctionnement des sucreries et approvisionnement des intrants) et les moyens de récolte (ajustement de la logistique de récolte, calcul et répartition géographique des quotas de livraison), de façon à pouvoir broyer dans les meilleures conditions la totalité des cannes récoltables (Grunow et al., 2007). Ce problème d'optimisation sous contraintes est conditionné en grande partie par le volume de canne récoltable.

Si dans les zones de production de canne à sucre occupées par des complexes industriels la prévision de production est relativement bien maîtrisée en interne, cela reste un exercice difficile dans les zones où la production est assurée par une multitude de producteurs dont on connaît rarement avec précision les surfaces cultivées, l'état végétatif et sanitaire des cultures, l'itinéraire technique, etc. La télédétection est alors un outil particulièrement adapté dans ces cas de figure.

Des méthodes d'estimation du rendement de nombreuses cultures ont été élaborées dès le début des années 80 à partir de l'analyse de données radiométriques, mais leur potentiel est alors limité par la faible résolution spatiale et le trop long délai de mise à disposition des images (Jackson, 1984). Avec l'amélioration des résolutions spatiales et temporelles, des modèles opérationnels à moyenne résolution basés sur des régressions entre indices de végétation et rendement sont depuis développés (*e.g.*, (Rasmussen, 1997 ; Everingham et al., 2005)). Des méthodes faisant appel aux capteurs à moyenne et haute résolution spectrale voient également le jour pour prévoir la récolte de canne à sucre (Bastidas-Obando et Carbonell-Gonzalez, 2007). Certaines ont recours à des classifications supervisées (Rao et al., 2002), des analyses en composantes principales (Almeida et al., 2006) ou des régressions multiples intégrant également des données climatiques et de sol (Prasad07). La plupart de ces études utilisent des données gratuites provenant des satellites Landsat (capteur TM ou ETM+) ou NOAA (capteur AVHRR).

Parallèlement, de nombreuses recherches aboutissent à des systèmes de prévision plus sophistiqués utilisant les données de télédétection pour initialiser et ajuster des modèles de croissance (*e.g.*, (Maas, 1988 ; Bouman, 1992 ; Doraiswamy et al., 2003 ; Everingham et al., 2005)). Cette approche a été utilisée pour la culture de la canne par Bégue et al. (2010).

Cependant, le recours à ces modèles est souvent rendu difficile par la nécessité de disposer de valeurs des paramètres et variables nécessaires aux simulations (caractéristiques du sol, de la culture et des cycles de croissance, données climatiques). Celles-ci sont souvent mal connues. Leur approximation peut générer de fortes erreurs en fin de calculs (Faivre et al., 2004), en particulier dans le cas de zones de production dont l'environnement naturel est hétérogène et les pratiques culturales décidées individuellement par une multitude de planteurs. Dans ce contexte, les données gratuites des satellites Landsat, MODIS, NOAA sont de peu d'utilité car de résolution spatiale insuffisante (respectivement 30 m, 250 m et 1000 m). En effet, pour estimer une valeur d'indice de végétation représentative d'une parcelle, plusieurs dizaines de pixels sont nécessaires. Pour des parcelles d'une surface moyenne d'un hectare, ce qui est le cas de l'agriculture familiale (Dubus, 2006), il faut donc utiliser une résolution spatiale minimale de 10 m. Les données des satellites Spot 4 ou Spot 5 sont disponibles à cette résolution.

Peu d'études ont été menées à partir de données à très haute résolution pour le suivi de la production de canne à sucre dans des zones d'agriculture sur parcelles de petite taille (Lebourgeois et al., 2007), les surfaces concernées sont en effet sans commune mesure avec celles des grands pays producteurs (Brésil, Inde, Chine, Mexique...) détenues par des complexes agro-industriels ou de grandes exploitations.

Nous développons dans cet article une méthode de prévision de récolte adaptée à un contexte de production atomisée, basée sur une relation empirique entre l'indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et le rendement (poids frais à l'hectare), à partir de données Spot à résolution décimétrique.

Nous procédons dans un premier temps à l'étalonnage du modèle de rendement à partir de données multi-sites (Réunion et Guadeloupe). Le modèle obtenu appliqué aux surfaces cultivées en canne permet d'estimer le volume de la récolte (la biomasse totale récoltée en tonnes). Nous mettons en œuvre cette méthode sur l'île de La Réunion. Nous présentons les résultats obtenus pour les années 2008 et 2009 et évaluons leur précision à différentes échelles géographiques.

2. Matériel et méthodes

2.1. Contexte climatique et agronomique

L'île de La Réunion est un département français d'Outre-Mer situé dans l'Océan Indien (21°05' S ; 55°03' E), à 800 km à l'est de Madagascar. Île de 2512 km², elle bénéficie d'un climat de type tropical marqué par l'influence des vents alizés.

La canne à sucre est la principale production agricole de l'île. Elle occupe plus de la moitié des surfaces agricoles utilisées (Agreste Réunion, 2008). Elle est cultivée sur

25 000 ha répartis sur près de 26 000 parcelles agronomiques (soit une surface moyenne d'un peu moins de 1 ha par parcelle). Ces terres sont exploitées par près de 4 200 exploitants individuels.

Il est très difficile dans ces conditions d'anticiper à coût raisonnable et avec une précision satisfaisante les volumes à récolter de chaque exploitant. Par ailleurs, les rendements (70 à 75 t/ha en moyenne) sont très hétérogènes sur l'île de par la diversité des conditions pédoclimatiques des zones de production : littoral est chaud et pluvieux (3000 à 5000 mm de pluie/an), littoral ouest sec (< 1000 mm de pluie/an) et irrigué, zones d'altitude fraîches et pluvieuses (2000 mm de pluie/an) (Figure 1).

À cette variabilité géographique s'ajoute une forte variabilité interannuelle des précipitations pouvant aller du simple au triple (Figure 2), liée au passage de perturbations tropicales et à l'oscillation de la zone de convergence intertropicale.

2.2. La culture de la canne à sucre

La canne à sucre (*Saccharum spp*) est une graminée vivace qui est cultivée sur une même parcelle durant

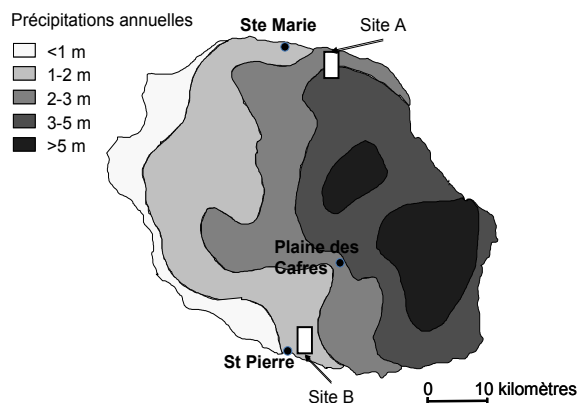


Figure 1 : Répartition des précipitations annuelles.

plusieurs années consécutives. Lors de la récolte (annuelle dans la plupart des cas), la tige est coupée au ras du sol et la souche laissée en place produit de nouvelles pousses. Au cours des 5 à 6 récoltes successives qui se font à partir de la même plantation, le rendement à la parcelle tend à diminuer et le champ est généralement replanté avec de nouvelles boutures (Figure 3).

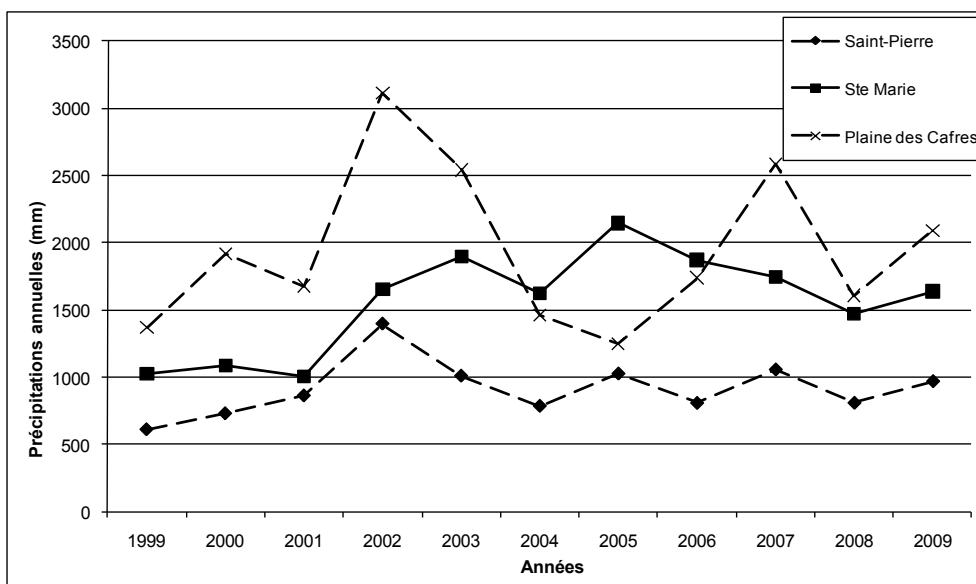


Figure 2 : Variations pluviométriques interannuelles (la localisation des sites est donnée en Figure 1).

La récolte a lieu une fois par an à La Réunion. Sa durée, fonction des conditions climatiques qui déterminent la richesse en sucre et de la capacité de broyage des sucreries, est généralement de 5 à 6 mois à partir de juin. Les cannes coupées sont transportées vers les 13 centres de réception de l'île, pesées, puis acheminées vers les deux sucreries : Bois Rouge, Le Gol (Figure 4). Chaque sucrerie se partage donc les livraisons de canne en fonction de la proximité des parcelles et des centres de réception.

Par ailleurs, on distingue 5 bassins de production liés historiquement à la localisation des anciennes sucreries, mais également aux conditions pédoclimatiques dominantes. L'organisation de la logistique de récolte et les statistiques de production sont encore fortement structurées selon ces bassins.

Nous étudierons donc les résultats d'estimation de récolte aux échelles des centres de réception (un centre de réception couvre de 600 à 4000 ha), des bassins, des sucreries et de l'île entière.

2.3. Données de télédétection

Nous avons fait le choix dans cette étude d'estimer le tonnage de canne à récolter à partir de l'observation du développement végétatif des surfaces plantées. La télédétection reste la méthode la plus rapide et la plus économique dans ce contexte pour obtenir les informations sur l'état végétatif des parcelles de façon quasi exhaustive (à la couverture nuageuse près).

Nous utilisons dans cette étude les images issues de la base de données de télédétection de référence Kalideos Isle-Réunion, (Cnes, 2009), mise en place par le CNES

(Centre National d'Études Spatiales) à destination de la communauté scientifique. La Réunion est une des quatre bases de référence de Kalideos, alimentée régulièrement par diverses sources de données. Les images Spot ont une fauchée de 60 km et sont acquises dans des bandes multispectrales (vert, rouge, proche infrarouge et moyen infrarouge) avec une résolution spatiale de 10 m (Spot 5) à 20 m (Spot 4). Le capteur panchromatique de Spot 4, grâce à sa résolution de 10 m, permet par fusion avec les canaux multispectraux d'atteindre une résolution d'image multispectrale de 10 m.

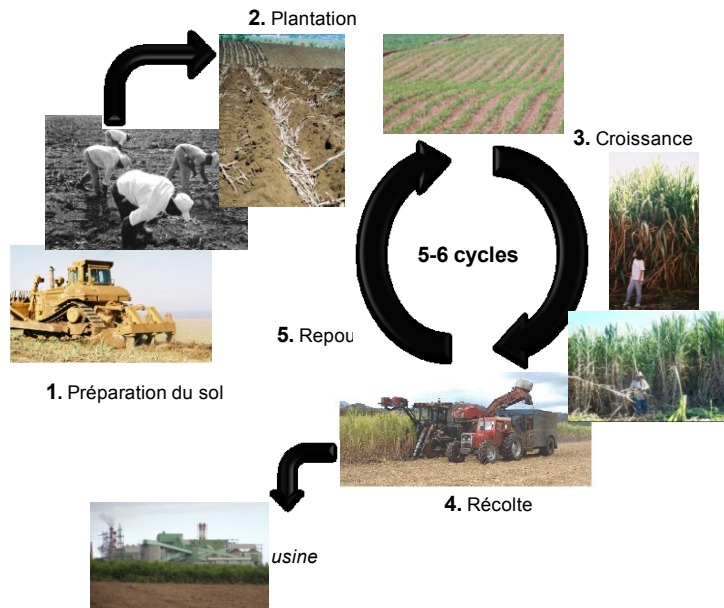


Figure 3 : Cycle culturel de la canne à sucre.

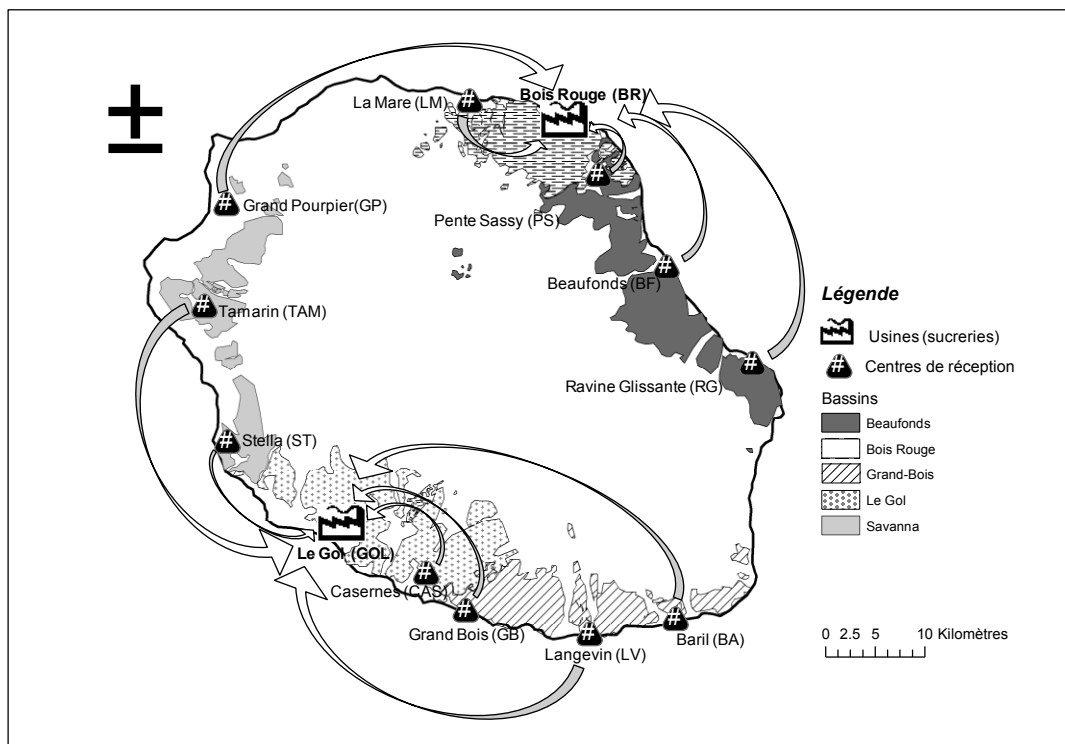


Figure 4 : Centres de réception, bassins et sucreries à La Réunion.

Nous utilisons dans cette étude des ortho-images TOC (Top Of Canopy) disponibles pour la plupart des produits de la base Kalideos : les comptes numériques ont été convertis en réflectance au sommet du couvert après prise en compte de l'étalonnage absolu des capteurs Spot et correction radiométrique des effets de l'atmosphère par simulation avec le logiciel 6S (De Boissezon et Sand, 2006). Cette correction rend possible la comparaison des valeurs de NDVI calculées sur des images acquises par différents capteurs et à des dates différentes.

Nous déterminons un modèle d'estimation du rendement par régression des rendements observés avec la variable explicative NDVI. Les études de (Bappel, 2005) et (Bégué et al., 2010) ont montré que la meilleure corrélation était obtenue avec la valeur maximale du NDVI au cours de la croissance, c'est-à-dire au bout d'environ 250 jours à La Réunion, ce qui correspond au mois de juin juste avant la récolte (Figure 5).

La capacité de revisite quotidienne de la constellation Spot permet, malgré la couverture nuageuse fréquente sous les tropiques, d'acquérir une image exploitable sur cette période relativement restreinte. Les dates et types d'images utilisées sont indiquées dans la Figure 6.

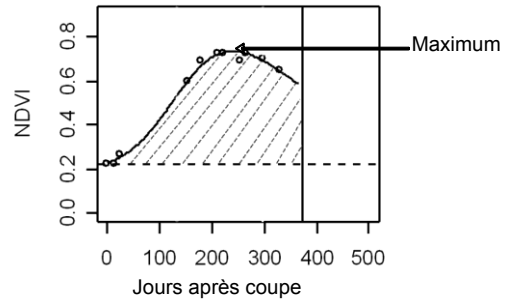


Figure 5 : Évolution du NDVI au cours de la croissance (d'après (Bégué et al., 2010)).

croissance						récolte					
janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
									15/11/2003	SPOT 4	(Guadeloupe)
				05/06/2006		SPOT 5					
				18/06/2008		SPOT 5					
				14/06/2009		SPOT 4					

Figure 6 : Calendrier des acquisitions d'images.

Sites		Altitude (m)	Surface totale (ha)	Nombre de parcelles	Nombre d'observations	Gamme NDVI	Gamme rendement (t/ha)
La Réunion	A	40-545	157	60	96	0.75-0.88	60-209
	B	105-540	140	12	30	0.76-0.9	43-140
Guadeloupe	C	50	900	73	71	0.69-0.79	28-94

Tableau 1 : Caractéristiques du jeu de données d'ajustement.

2.4. Ajustement entre les rendements et les valeurs de NDVI

Les données de rendement de la canne (poids frais à la récolte) ont été obtenues par enquête auprès d'exploitants à La Réunion et en Guadeloupe entre 2003 et 2008. Nous avons appliqué comme critères de choix des observations :

- Une répartition géographique couvrant la gamme d'altitude de culture de la canne (de la côte jusqu'à 600 m) et des zones climatiques contrastées ;
- Une surface des parcelles assez grande (au moins 2 ha) permettant l'extraction des valeurs de NDVI correspondantes avec suffisamment de pixels pour s'affranchir des effets de bord.

Nous avons ainsi obtenu 174 observations réparties en 3 sites notés A, B et C (Tableau 1) et 3 années (2003, 2006 et 2008).

Les sites A et B sont situés à La Réunion, respectivement à proximité des centres de réception de Bois Rouge (au nord-est) et Casernes (au sud-ouest) (Figure 4). Les rendements observés varient entre 43 et 209 t/ha pour des valeurs de NDVI maximales comprises entre 0,75 et 0,9. Afin d'étendre le domaine de validité de l'ajustement, nous avons intégré les données d'une exploitation (site C) située à l'est de la Guadeloupe (île de l'arc antillais, mer des Caraïbes, latitude 16°20'N, longitude 61°20'W) dont les techniques culturales et les variétés sont semblables à celles des sites A et B. Toutefois, en raison de conditions climatiques moins favorables qu'à La Réunion, les

rendements observés sont plus faibles (entre 28 et 94 t/ha), et les valeurs de NDVI maximales également (entre 0,69 et 0,79). Le cycle cultural est décalé d'environ six mois par rapport à celui de La Réunion ; le NDVI atteint son maximum en novembre-décembre.

Les images satellites choisies pour l'étude de ces sites sont les suivantes :

- Pour les sites A et B, elles ont été sélectionnées parmi la base de données Kalideos. Les dates d'acquisition correspondent au maximum de NDVI pour chaque année d'observation à La Réunion, c'est à dire au mois de juin (Figure 5). Nous avons calculé la valeur médiane de NDVI de chaque parcelle en appliquant une zone tampon de 10 m à l'intérieur des limites des parcelles étudiées afin d'éliminer les effets de bord ;
- Pour le site C, l'image analysée (Spot 4) a été acquise en novembre 2003 dans le cadre d'une étude conjointe avec le CNES (Bégué et al., 2004). Il s'agit d'une image non corrigée des effets atmosphériques. Cependant aux périodes de maximum de croissance de la canne à sucre (en juin et en novembre respectivement à la Réunion et à la Guadeloupe), les conditions atmosphériques sont semblables. En effet, nous avons constaté un écart sensiblement constant entre les valeurs de NDVI des images de La Réunion et de l'image de la Guadeloupe pour des rendements équivalents. Nous avons appliqué cet écart pour corriger les valeurs de NDVI observées sur le site de Guadeloupe.

Nous avons alors effectué une régression statistique sur notre jeu de données par la méthode des moindres carrés (Figure 7). La fonction exponentielle (équation (1)) est celle qui a permis d'obtenir le meilleur coefficient de détermination avec une valeur de R^2 de 0,73 :

$$Rdt = 0,5347 e^{6,1125 NDVI} \quad (1)$$

Ce coefficient est satisfaisant compte tenu de la grande dispersion statistique de l'échantillon, due à la diversité des conditions de croissance observées et des différents délais entre la date de la mesure du NDVI maximal et la date de récolte de la parcelle.

2.5. Estimations de production

Le modèle calculé au paragraphe précédent repose sur une seule variable explicative et a été calculé à partir d'un nombre restreint d'observations. Il ne peut donc pas rendre compte de tous les facteurs de variation du rendement sur les différentes exploitations de l'île. Outre les erreurs expérimentales (de mesure des capteurs embarqués et du rendement observé), ce modèle est donc potentiellement entaché d'une erreur systématique forte liée au choix 1- de l'échantillon et 2- de la variable explicative.

Nous utilisons donc ce modèle sous forme différentielle pour estimer les variations de production (en tonnes) entre deux années consécutives et non la production

d'une année individuelle, minimisant ainsi les erreurs systématiques.

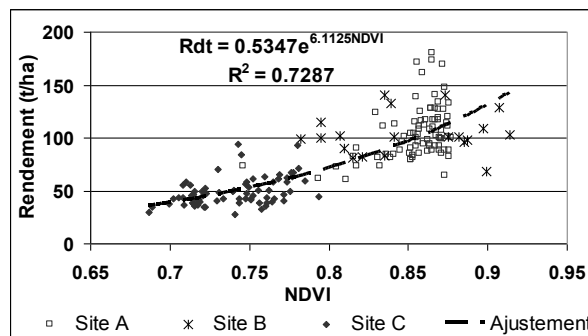


Figure 7 : Régression entre les rendements observés et les valeurs de NDVI maximal.

2.5.1. Parcelle agricole

Les valeurs de NDVI sont extraites à partir des images. Elles doivent être les plus représentatives possible de la croissance des parcelles de canne à sucre. Les pixels retenus doivent donc contenir des valeurs radiométriques correspondant strictement à la culture, c'est-à-dire ceux contenus à l'intérieur des limites des parcelles. Pour cela, nous devons disposer des contours des parcelles agricoles élémentaires afin de délimiter les zones de mesure (Figure 8).

Dans la Communauté Européenne, la Politique Agricole Commune fait obligation aux États membres de disposer d'un dispositif numérique d'identification graphique des parcelles agricoles depuis 2005. Ce dispositif est constitué d'un système d'information géographique, le Registre Parcellaire Graphique, qui recueille tous les ans les déclarations des ilots (unités de terrain cultivées par un seul et même déclarant et constituées d'un ensemble de parcelles contiguës) cultivés réalisées par les agriculteurs sur la base d'orthophotographies.

Nous croisons cette couche vectorielle avec celle des déclarations de replantations des parcelles de canne à sucre (les zones replantées sont systématiquement mesurées par GPS) afin de redécouper les ilots selon les contours des parcelles agricoles de canne. Nous affinons ce parcellaire agricole élémentaire à partir de l'analyse des hétérogénéités de croissance (calcul des écarts-types des valeurs de NDVI des pixels) à l'intérieur des ilots grâce à une image Spot 5 à 2,5 m de résolution acquise en début d'année. Ceci permet de détecter les parcelles de canne dont les limites ont été modifiées au cours d'un cycle de récolte. L'actualisation des contours est alors effectuée par photo-interprétation. Cette mise à jour est effectuée tous les ans.

2.5.2. Estimation de production par calcul relatif

Après avoir masqué les zones couvertes par les nuages sur les images satellites, nous estimons dans un premier temps le rendement des parcelles des années n-1 (année précédente) et n (année en cours) en appliquant l'équation (1) sur les valeurs de NDVI extraites des

images de ces mêmes années. Le rendement est converti en production par multiplication avec les surfaces individuelles des parcelles. Nous agrégeons ces valeurs par centre de réception, bassin, sucrerie ou sur l'ensemble du territoire pour les années 2008 et 2009.

Dans un deuxième temps, nous calculons par différence les écarts de production estimés entre les deux années consécutives, aux différentes échelles mentionnées ci-dessus. La prévision de production de l'année n est alors obtenue en appliquant ces écarts aux valeurs de production observées l'année n-1, à ces différentes échelles.

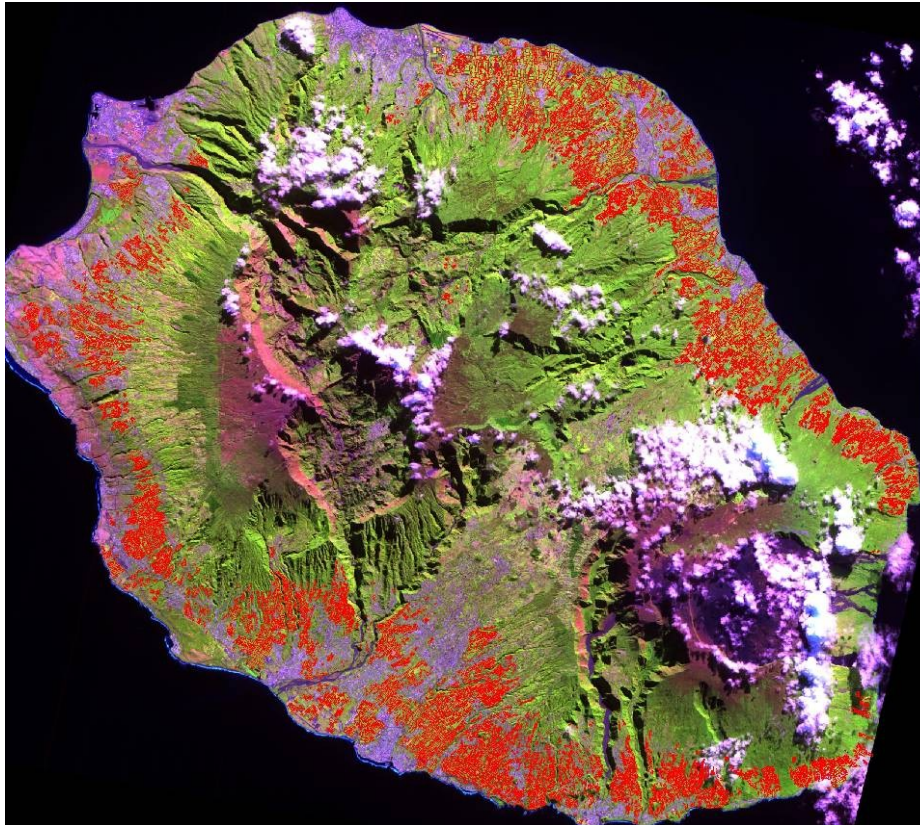


Figure 8 : Parcelles agronomiques de canne à sucre (en rouge) à la Réunion et image Spot 5 du 14/06/2009 (© CNES/Distribution Spot Image) (composition colorée R : MIR, V : PIR, B : Rouge).

Nous évaluons l'erreur relative de prédiction à chacune des échelles par l'équation :

$$Err = \frac{P_{est} - P_{obs}}{P_{obs}} \quad (2)$$

avec Err = erreur relative de prédiction de l'année n,
 P_{est} = production estimée de l'année n,
 P_{obs} = production observée de l'année n.

3. Résultats et discussions

Cette technique de prévision a été appliquée à la récolte de canne à sucre de 2009. Les résultats de prévisions de récolte pour l'année 2009 sont présentés sur la Figure 9. On ne constate pas d'erreur systématique d'un centre à l'autre.

La moyenne des erreurs (en valeurs absolues) est de 7,7 %. Le modèle avait prévu une production totale de 1 891 000 t pour une production réalisée de 1 909 000 t, soit une erreur de 0.9 % sur la production totale de l'île.

La Figure 10 présente l'erreur moyenne obtenue sur les années 2008 et 2009. L'erreur de prédiction moyenne, tous centres confondus, est de 6,6 %, ce qui est très acceptable à cette résolution spatiale relativement fine.

Les erreurs de prédiction aux échelles des bassins et sucreries sont plus faibles, par effet mathématique de lissage dû à l'agrégation des données. Elles ne dépassent pas 7 %, avec une moyenne de 5 % à l'échelle des bassins de production et une moyenne de 3,6 % à l'échelle des deux sucreries (Figure 11 et **Figure 12**). L'erreur de prédiction sur l'ensemble de l'île est de 1,5 %.

Ces valeurs sont très satisfaisantes. La méthode peut ainsi fournir aux différentes structures impliquées dans l'organisation de la récolte des estimations suffisamment précises pour optimiser les différentes étapes et processus mis en œuvre.

Par ailleurs, la simplicité de cette technique rend les principales sources d'erreurs aisément identifiables. Elles sont constituées :

- De l'erreur d'estimation du modèle (équation (1)) ;
- D'écarts entre les surfaces cultivées (valeurs utilisées pour estimer la production) et les surfaces effectivement récoltées. Cet écart peut en outre varier significativement d'une année à l'autre. En effet le taux de parcelles récoltées peut fluctuer pour des raisons techniques (ex : retard de plantation dans un secteur, problème technique industriel ou logistique) ;
- D'aléas climatiques pouvant intervenir après la mesure du NDVI. Ils créent des biais dans la relation NDVI maximal-rendement (équation (1)) ;
- De changements d'affectations de production depuis un centre vers le centre voisin. Cette information n'est disponible que l'année suivante ;

- De la couverture nuageuse ou d'une image tronquée qui empêche d'estimer la production des parcelles recouvertes. Dans certains cas cette couverture est telle que les parcelles pour lesquelles l'estimation a pu être réalisée sont trop peu nombreuses pour être représentatives de la zone de production considérée.

Certaines de ces erreurs peuvent être aisément réduites, en particulier l'erreur d'estimation du modèle. L'utilisation d'un échantillon plus large de parcelles d'étalonnage de l'équation (1) devrait permettre d'améliorer sa représentativité. Une analyse des sources de variations de l'erreur devrait même permettre d'établir plusieurs modèles d'estimation du rendement plus précis adaptés à différentes conditions de culture.

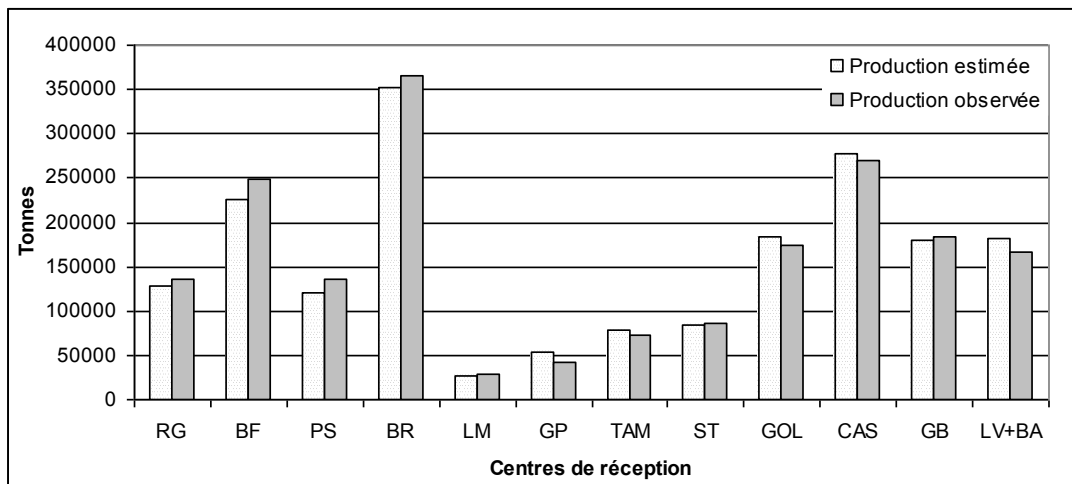


Figure 9 : Production estimée et production observée lors de la campagne sucrière de 2009.

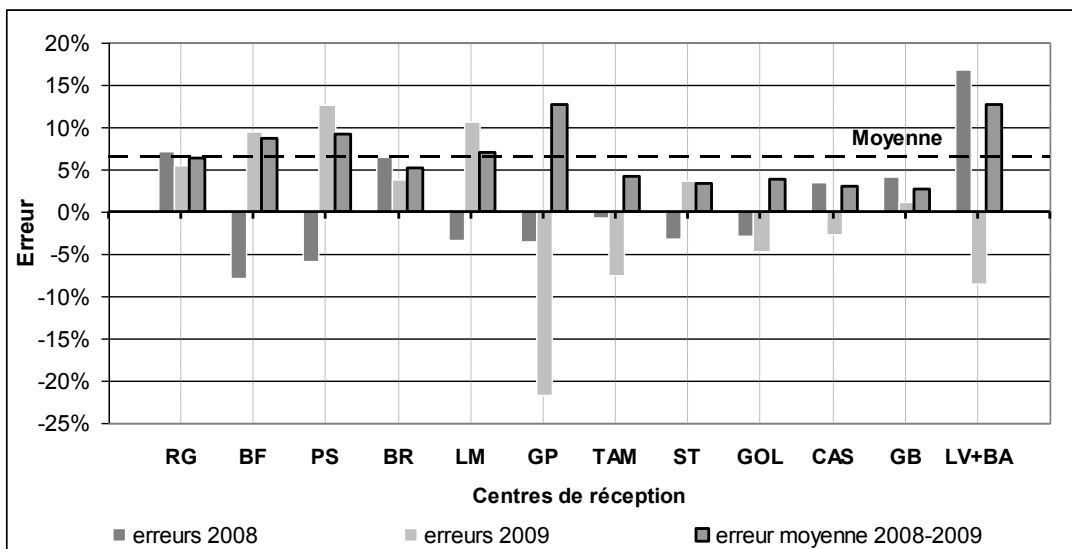


Figure 10 : Erreur relative moyenne de prédiction de 2008 à 2009 pour les différents centres de réception.

La mise en service d'une antenne de réception satellite directe régionale localisée à St Pierre de La Réunion (projet SEAS-OI) dès 2012 permettra de disposer d'un plus grand nombre d'images. Nous pourrons alors

générer une mosaïque à partir de portions d'images prises à des dates proches, exemptes de nuages et couvrant quasiment l'ensemble des zones de production.

L'avènement des constellations de satellites optiques à très haute résolution spatiale Pléiades, dans le cadre du programme ORFEO initié et piloté par le CNES, va permettre en outre d'améliorer la précision spatiale du parcellaire agronomique en canne à sucre. Combinée à un suivi des surfaces récoltées par l'analyse de séries temporelles d'images à haute répétitivité, cette cartographie fournira une meilleure précision sur les surfaces récoltées.

La méthode de prévision de récolte présentée dans ce papier nécessite l'utilisation de 2 images satellites. Cependant pour des prévisions annuelles systématiques, c'est l'image acquise en année n qui sert aux prédictions de l'année n+1. Le coût global de cette méthode est donc de 1 image par an, plus une image initiale en année 0 servant à l'estimation de production de l'année 1.

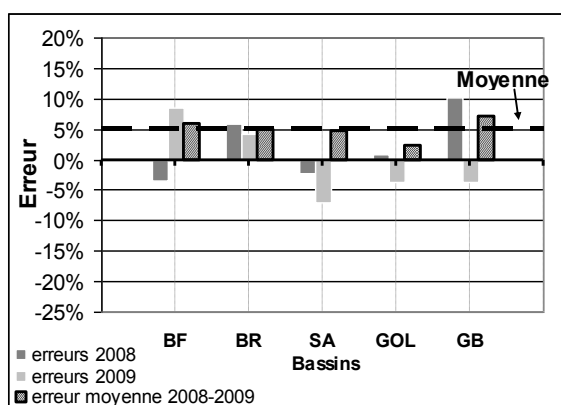


Figure 11 : Erreur relative moyenne de prédiction de 2008 à 2009 pour les différents bassins de production.

4. Conclusions

Cette étude constitue une première approche pour l'évaluation des performances de cette méthode. Elle démontre la pertinence de l'utilisation d'images satellites à haute résolution pour prédire la quantité de canne à sucre récoltée dans un contexte de production atomisée en de multiples parcelles de petite taille et soumise à de forts contrastes climatiques. Cette méthode offre une précision moyenne satisfaisante (6,6 %) à l'échelle des centres de réception de la canne, et qui peut être améliorée par des mesures complémentaires. Son coût de mise en œuvre reste très compétitif par rapport aux techniques classiques d'enquêtes et échantillonnages sur le terrain. Elle est particulièrement adaptée aux pays producteurs dont une part de la sole cannière est cultivée par des petits planteurs, dans des zones agroclimatiques très variées et qui disposent de peu d'informations sur ces zones (état de croissance de chaque parcelle de canne et données climatiques quotidiennes pour caractériser les conditions de croissance dans chaque zone).

Avec un coût public maximal d'environ 1 € le km², soit 1 centime l'hectare, pour une acquisition Spot programmée à 10 m de résolution en couleur, cette méthode reste très compétitive par rapport à la technique d'échantillonnage au sol qui réclame plusieurs agents et ne peut évaluer qu'un petit nombre de parcelles de référence. À titre d'exemple, le coût de mise en œuvre par la filière canne à sucre de cette technique à La Réunion serait de 3500 € (une scène Spot complète de 60 x 60 km) plus environ 3 jours de traitement par an.

Cette approche peut cependant compléter une approche par enquête en aidant à identifier les parcelles d'échantillonnage les plus représentatives à l'échelle de l'île.

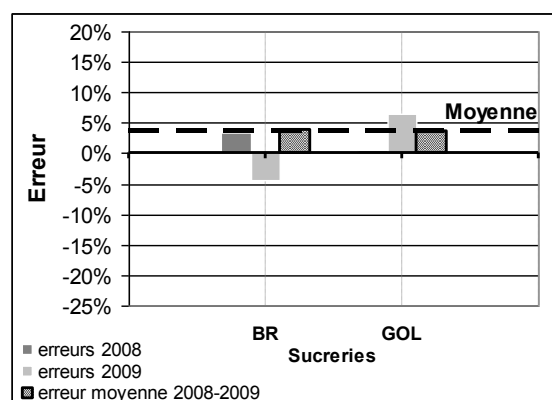


Figure 12 : Erreur relative moyenne de prédiction de 2008 à 2009 pour les deux sucreries.

D'autres travaux sont menés en parallèle afin d'assimiler les données de télédétection dans un modèle mécaniste de croissance de la canne à sucre permettant de simuler le rendement en conditions agricoles d'une parcelle de canne. Cependant, des étapes préalables sont encore nécessaires afin de disposer des données d'entrée (variétés, dates de dernière récolte) et des observations (NDVI, biomasse) nécessaires au calage du modèle et à la spatialisation des simulations de croissance sur l'ensemble de l'île. Les satellites à très hautes résolutions spatiale et temporelle ouvrent des perspectives particulièrement prometteuses pour les zones sous couverture nuageuse fréquente des tropiques et aux petites surfaces cultivées des agricultures de type familial.

Remerciements

Ce travail a pu être mené grâce à la base de données de télédétection de référence Kalideos Isle-Réunion sans laquelle la quantité d'images nécessaire et le coût des corrections radiométriques auraient été rédhibitoires dans le cadre de notre projet de recherche.

Il a été financé par le FEADER (Fonds Européen Agricole pour le Développement Rural) et la Région Réunion.

Les auteurs tiennent à remercier Messieurs Isautier, Barau et Caruel pour leur avoir permis d'effectuer des mesures sur leurs parcelles et leur avoir donné accès à leurs données de production.

Références

- Agreste Réunion, 2008. Données agricoles et rurales, Enquête sur la structure des exploitations en 2007.
- Almeida, T.I.R., De Souza, C.R. and Rossetto, R., 2006. ASTER and Landsat ETM+ images applied to sugarcane yield forecast. *International Journal of Remote Sensing*, 27(19), 4057-4069.
- Bappel, E., 2005. Apport de la télédétection aérospatiale pour l'aide à la gestion de la sole cannière réunionnaise. Thèse de doctorat en Sciences, Université de La Réunion, Montpellier/St Denis, France.
- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J. and Makin, I.W., 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agricultural Water Management*, 46(2), 137-155.
- Bastidas-Obando, E. and Carbonell-Gonzalez, J., 2007. Evaluating the applicability of MODIS data for forecasting sugarcane yields in Colombia. Dans: *International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT)*, Durban, Afrique du Sud.
- Bégué, A., Degenne, P., Pellegrino, A., Todoroff, P. and Baillarin, F., 2004. Application of remote sensing technology to monitor sugar cane cutting and planting in Guadeloupe (French West Indies). Dans: *IVth International Congress of Geomatics*, La Havane, Cuba.
- Bégué, A., Lebourgeois, V., Bappel, E., Todoroff, P., Pellegrino, A., Baillarin, F. and Siegmund, B., 2010. Spatio-temporal variability of sugarcane fields and its impacts on yield forecast using remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 31(20), 5391-5407.
- Bouman, B.A.M., 1992. Linking physical remote sensing models with crop growth simulation models applied for sugar beet. *International Journal of Remote Sensing*, 13(14), 2565-2581.
- Brown, ME, 2008. *Famine early warning systems and remote sensing data*. Publisher: Springer, 313 p.
- CNES, 2009. Images Spot: copyright CNES, Distribution Spot image, <http://kalideos.cnes.fr>.
- De Boissezon, H. and Sand, A., 2006. Reference remote sensing data bases: temporal series of calibrated and orthorectified satellite images for scientific use. Dans: *2nd International Symposium on the Recent Advances in Quantitative Remote Sensing (RAQRS)*, Barcelone, Espagne.
- Doraiswamy, P.C., Moulin, S., Cook, P.W. and Stern, A., 2003. Crop Yield Assessment from Remote Sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(6), 665-674.
- Dubus, C., 2006. La filière sucrière en Tanzanie : au-delà de l'ajustement. *Cahiers d'Outre-Mer* 235, 413-430.
- Everingham, Y., Inman-Bamber, G., Ticehurst, C., Barrett, D., Lowe, K. and McNeill, T., 2005. Yield forecasting for marketers. *Australian Society of Sugar Cane Technologists*, 27, 51-60.
- Faivre, R., Leenhardt, D., Voltz, M., Benoît, M., Papy, F., Dedieu, G. and Wallach, D., 2004. Spatialising crop models. *Agronomie*, 24: 205-217.
- Grunow, M., Günther, H.O. and Westinner, R., 2007. Supply optimization for the production of raw sugar. *International Journal of Production Economics*, 110(1-2), 224-239.
- Hielkema, J.U. and Snijders, F.L., 1994. Operational use of environmental satellite remote sensing and satellite communications technology for global food security and locust control by FAO: The ARTEMIS and DIANA systems. *Acta Astronautica*, 32, 603-616.
- Jackson, R.D., 1984. Remote sensing of vegetation characteristics for farm management. SPIE, Bellingham, Etats-Unis, pp. 81-96.
- Lebourgeois, V., Bégué, A., Labbé, S. and Roux, B., 2007. An airborne imaging system for mapping spatial variability in sugarcane. Dans: *International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT)*, Durban, Afrique du Sud.
- Maas, S.J., 1988. Using Satellite Data to Improve Model Estimates of Crop Yield. *Agronomy Journal*, 80(4), 655-662.
- Mac Donald, R.B. and Hall, F.G., 1980. Global Crop Forecasting. *Science*, 208, 670-679.
- Moran, M.S., Inoue, Y. and Barnes, E.M., 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing of Environment*, 61(3), 319-346.
- Pinter, P.J., Hatfield, J.L., Schepers, J.S., Barnes, E.M., Moran, M.S., Daughtry, C.S.T. and Upchurch, D.R., 2003. Remote Sensing for Crop Management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(6), 647-664.
- Prasad, A.K., Singh, R.P., Tare, V. and Kafatos, M., 2007. Use of vegetation index and meteorological parameters for the prediction of crop yield in India. *International Journal of Remote Sensing*, 28(23), 5207-5235.
- Rao, P.V.K., Rao, V.V. and Venkataratnam, L., 2002. Remote sensing: A technology for assessment of sugarcane crop acreage and yield. *Sugar Technology*, 4, 97-101.
- Rasmussen, M.S., 1997. Operational yield forecast using AVHRR NDVI data: reduction of environmental and inter-annual variability. *International Journal of Remote Sensing*, 18(5), 1059- 1077.