



HAL
open science

Rapport de fin de projet "Agridrone": utilisation de capteurs embarqués sur système léger pour caractériser l'état hydrique et nutritionnel des cultures. Application à la canne à sucre sur le site pilote de l'île de La Réunion

Agnès Bégué, V. Lebourgeois, M. Houlés, Pascal Degenne, Sylvain Labbé, S. Dupuy, B. Roux

► To cite this version:

Agnès Bégué, V. Lebourgeois, M. Houlés, Pascal Degenne, Sylvain Labbé, et al.. Rapport de fin de projet "Agridrone": utilisation de capteurs embarqués sur système léger pour caractériser l'état hydrique et nutritionnel des cultures. Application à la canne à sucre sur le site pilote de l'île de La Réunion. irstea. 2008, pp.35. hal-02591078

HAL Id: hal-02591078

<https://hal.inrae.fr/hal-02591078v1>

Submitted on 15 May 2020

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

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

Mission DAR

N° du projet : Conv 05 AAP 331

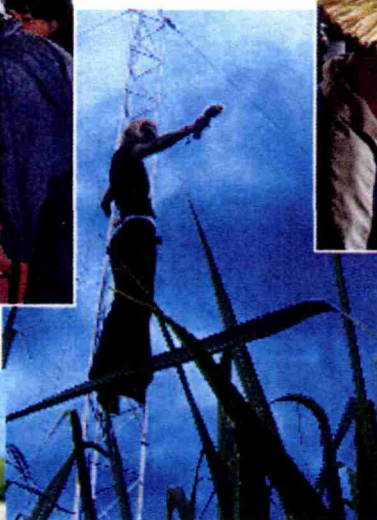
Titre du projet :

AGRIDRONE : Utilisation de capteurs embarqués sur drone pour caractériser l'état hydrique et nutritif des cultures ; application à la canne à sucre sur le site pilote de l'île de La Réunion

COMPTE RENDU FINAL DU PROJET

Organisme chef de file : CIRAD

Nom et organisme du chef de projet : Agnès BEGUE (CIRAD, UMR TETIS)



Co-auteurs :

Valentine Lebourgeois (CIRAD), Marion Houlés (CIRAD), Pascal Degenne (CIRAD), Sylvain Labbé (Cemagref), Stéphane Dupuy (CIRAD), Bruno Roux (Avion Jaune)

Table des matières

A -	Note synthétique	3
B -	Compte rendu technique détaillé	5
I -	Les modalités d'organisation	6
II -	Les partenariats :	10
III -	Le déroulement du projet	11
Action 0	Gestion du projet	12
Action 1 / Tâche 1 :	Analyse des besoins	13
Action 1 / Tâche 2 :	Campagne de mesures sur parcelles expérimentales	16
Action 1 / Tâche 3.1.	Traitement des images aéroportées	18
Action 1 / Tâche 3.2.	Indicateurs agronomiques	20
Action 1 / Tâche 4	Campagne de mesures en milieu réel	21
Action 1 / Tâche 5	Réalisation des produits cartographiques	22
Action 2 / Tâche 1	Prototype d'un système de diffusion des données	24
Action 2 / Tâche 2	Valorisation des produits	26
Action 2 / Tâche 3	Séminaire de restitution	28
Action 2 / Tâche 4	Proposition d'un service opérationnel	31
IV -	Les modalités de valorisation du projet	32
V -	Les perspectives	34
C -	Compte rendu financier	35
D -	Annexes	36
Annexe 1 :	Questionnaire sur l'analyse des besoins	37
Annexe 2 :	L'expérimentation de La Mare 2006-2007	38
Annexe 3 :	Bilan de campagne de mesures aéroportées 2006-2007	40
Annexe 4 :	Matériel de communication	42
Annexe 5 :	Séminaire final	43
Annexe 6 :	Plaquette de l'offre de service	46
Annexe 7 :	Papiers et communications	47

A - Note synthétique

Le contexte du projet

Les enjeux économiques et environnementaux de l'agriculture raisonnée sont aujourd'hui largement reconnus. Le suivi spatio-temporel de l'état nutritionnel, hydrique ou sanitaire des couverts végétaux est un élément clé dans la prise de décision sur les interventions culturales. Cependant, l'utilisation de la télédétection peine à se développer en agriculture en raison 1. de limitations techniques dues à l'adéquation spatiale, temporelle et thématique des produits développés aux besoins des producteurs et 2. du manque de formation et d'information des professionnels agricoles.

Des évolutions techniques et méthodologiques dans le domaine des capteurs visible, infrarouge et thermiques (miniaturisation) et des vecteurs (ULM, drones) ouvrent aujourd'hui la voie à un suivi régulier des cultures, non destructif, spatialement explicite, mobilisable à la demande et peu coûteux.

Les enjeux de la canne à sucre à La Réunion

La multi-fonctionnalité de la canne à La Réunion est une réalité et les enjeux liés au maintien de cette culture dans cette région sont nombreux : **enjeux territoriaux** (maintien des surfaces en canne face à la forte urbanisation, développement de la culture dans l'Ouest par une meilleure gestion des besoins en eau, identité et attractivité du paysage), **enjeux environnementaux** (protection contre l'érosion, préservation de la qualité des sols, économie de l'eau par un usage raisonné de l'irrigation, source d'énergie renouvelable, potentialités en matière de recyclage des déchets, ...) et **enjeux économiques et sociaux** (augmentation de la productivité pour le maintien de la filière canne et des milliers d'emplois associés, ...).

C'est dans ce contexte fortement contraint, que nous avons élaboré le projet AGriDrone, avec pour objectif de faire la démonstration de la faisabilité technique et économique d'un moyen léger de caractérisation spatio-temporelle de l'état des cultures aux échelles parcellaire et de l'exploitation, pour l'aide à la décision pour la planification des travaux agricoles ou des interventions localisées d'urgence, ou pour l'aide à l'évaluation du rendement potentiel ou des estimations de dégâts.

Le public visé

Les produits et services d'AgriDrone s'adresse à différents maillons de la filière canne : des planteurs aux services de l'état, en passant par les opérateurs techniques de conseil agricole. Le public cible semble cependant être les techniciens de la Chambre d'Agriculture qui allient la connaissance du terrain et un haut niveau de technicité leur permettant d'interpréter les images aériennes en terme de recommandations agronomiques.

Synthèse des résultats obtenus

Les résultats obtenus sont d'ordre techniques, scientifiques et socio-économiques.

Les principaux résultats techniques concernent : la mise au point d'un protocole d'acquisition de photographies aériennes multispectrales (visible, proche infrarouge et infrarouge thermique) à partir de capteurs à faible coût embarqués à bord de véhicules aérien légers (ULM) ; la mise au point d'une méthodologie de corrections radiométrique et géométrique ; le développement d'un outil gratuit de diffusion des produits ; la production de matériel pédagogique pour les lycées.

Les résultats scientifiques sont essentiellement centrés sur le développement de méthodes permettant de transformer le rayonnement mesuré en paramètres descriptifs de l'état hydrique et nutritionnel des surfaces. Ces méthodes de diagnostic des cultures ne sont pas totalement opérationnelles à l'heure actuelle, car elles nécessitent des validations supplémentaires en milieu réel.

Les résultats socio-économiques sont l'élaboration d'un cahier des charges pour des produits d'aide à la gestion de la production cannière, et les coûts associés ; ces produits existent en version « de base » (mosaïques vraies-couleurs, images de température de surface et de développement des cultures, modèle numérique de terrain à haute résolution) et en version thématiques sur l'état des cultures : parcellaire, détection des anomalies de croissance ... Pour être adoptés, ces produits ont besoin d'être connus et testés. L'effort de sensibilisation des professionnels de la filière canne et des décideurs a été soutenu tout au long du projet, par la participation à de nombreuses manifestations grand public, à des manifestations techniques, une présence dans les médias et un séminaire de restitution ouvert aux professionnels réunionnais et aux partenaires étrangers régionaux. A l'heure actuelle, la filière reconnaît l'intérêt de l'approche spatiale dans la gestion de la production ; un service pré-opérationnel pourrait ainsi voir le jour dès 2009 sur l'Ile de La Réunion.

B - Compte rendu technique détaillé

I – Les modalités d'organisation

Conventions avec les partenaires recevant des financements du CAS DAR

Les deux équipes partenaires du projet (l'Avion Jaune et le Cemagref de Montpellier) ont signé en janvier 2006 une convention avec le CIRAD portant sur la gestion du budget « missions » du projet.

Modalités de pilotage :

Comités de pilotage :

1) **21 Avril 2006** : Comme prévu dans la convention, une première réunion du Comité de Pilotage a été effectuée en début du projet à La Réunion lors de la mission de démarrage du projet. Etaient présents :

- Présents : Bertrand CARUEL (exploitant agricole), Olivier PILLOT (DAF), Pierre TESSIER (Sucrière de La Réunion, SFS), Emilie FILLDS (CTICS)
- + Agents CIRAD : Caroline LEJARS, Jérôme MASSOW (VCAT), Christophe POSER, Aurore BURY (VCAT télédétection), Jean-François MARTINE, M. CHABALIER, Lionel LEMEZO.
- Equipe AgriDrone : A. Bégué, S. Labbé, B. Roux, V. Lebourgeois, M. Houles,

Objectifs : Présentation du projet à la filière.

Résultats : Bonne perception du projet par la filière

2) 29 Mai 2007 : A La Réunion

- Extérieurs : P. Pariente (Comité pilotage de la canne), M. Thierry (Usine Bois rouge), P. Rondeau (Usine du Gol), B. Siegmund (CERF), H. Papaiconomou (Chambre d'agriculture), E. Fillols (CTICS), C. Gossard (Chambre d'agriculture).
- + Agents CIRAD : PF. Chabaliere, C. Poser, JF. Martiné, Roland Pirot
- + Equipe AgriDrone : V. Lebourgeois, M. Houles

Objectifs : Point sur le déroulement du projet AgriDrone + Etude sur l'analyse des besoins.

Résultats : Avis sur les différents produits envisagés et décision sur les méthodes d'enquêtes (privilégier les entretiens individuels - avec ou sans support - aux questionnaires anonymes, privilégier la qualité à la quantité des réponses).

3) 18 Décembre 2007 : A La Réunion

- Extérieurs : Olivier Pilot (DAF), Francois Brelle (CTICS), ...
- + Agents CIRAD : X. Augusseau, P. Marnotte, C. Poser, J-L Chopart
- + Equipe AgriDrone : V. Lebourgeois, M. Houles

Objectifs : Bilan intermédiaire de l'opération AgriDrone (partie Recherche présentée par V. Lebourgeois et partie Services présentée par M. Houles) avant le départ de Valentine Lebourgeois à Montpellier pour la rédaction de sa thèse.

4) 18 Avril 2008 : Table ronde en fin du séminaire Canne08 à La Réunion

- Présents : J. M. Dihnut (SAFER), J. Y. Gonthier (SFSR / SR), C. Gossard (Chambre d'Agriculture), P. Rondeau (SFSR / SR), B. Siegmund (CERF), P. Tessier (Conseil Régional), N. Guilbot (CTICS)
- Excusés : DAF
- + Agents CIRAD : G. Mandret (Directeur Régional), P. Todoroff, J. F. Martiné, C. Poser, P.F. Chabaliere
- + Equipe AgriDrone : A. Bégué, S. Labbé, B. Roux, V. Lebourgeois, M. Houles, P. Degenne

Objectifs : Discuter autour des thèmes suivants :

- o Quel est l'intérêt des différents organismes de la filière « canne à sucre » à la Réunion pour les produits et applications issus de la télédétection ?
- o Si l'intérêt est partagé, comment organiser l'offre de service autour des différents prestataires et utilisateurs ? il s'agit de savoir qui fait quoi, comment et pour qui ?
- o Quelles seraient les priorités en matière de recherche pour améliorer ce service ?

Résultats : L'intérêt concernant les produits est confirmé, notamment les produits concernant les surfaces cultivées et la détection/quantification des anomalies de croissance. Cependant, avant de s'engager dans le financement d'un service opérationnel, la filière attend des études prospectives

supplémentaires, notamment sur l'existant en matière de bases de données spatialisées à La Réunion (en cours). Un service de type AgriDrone serait tout à fait envisageable en 2009.

Réunions de travail :

D'autre part, des réunions de travail bi-mensuelles se font à Montpellier entre les principaux partenaires du projet (CIRAD, Cemagref et Avion Jaune) et plus ponctuellement par visio-conférence avec La Réunion pour faire le point sur des actions précises (préparation des campagnes de mesures 2007 et 2008).

Calendrier

- Le projet a démarré en mars 2006, pour une durée de 2 ans (fin prévue : février 2008)
- Le projet a bénéficié d'une prolongation de 4 mois jusqu'en juin 2008 (cf. accord du Ministère par courrier du 3 mai 2007).
- Le calendrier détaillé est donné en Tableau 2.

Tableau de bord de suivi des moyens mis en œuvre

- Moyens humains mis en œuvre dans le projet (Tableau 1)
- Calendrier final du projet (Tableau 2)
- Récapitulatif des mission Montpellier-Réunion et Réunion-Montpellier (Tableau 3)
- Suivi budgétaire
- Le détail des moyens mis en œuvre par tâche est donné dans la partie B - Compte rendu technique détaillé.

	CIRAD-Montpellier		CIRAD-Réunion		Cemagref	Avion Jaune
	Ingénieur	Technicien	Ingénieur	Technicien	Ingénieur	Ingénieur
Gestion du projet	3					
Action I						
1. Analyse besoins			1			
2. Mesures exp.	0.5		3.5	8	1	1
3. Trait./ analyse						
3.1 Données aéroportées	2	1			1	
3.2 Données bio et traitement	2		2			
4. Mesures réel			3.5			0.5
5. Production carto	1	2				
Action II						
1. Dévelop. outil SIG	4					
2. Valorisation	3		1		1	
3. Séminaire	1		1			
4. Offre de service	0.5		0.5			0.5
TOTAL	17	3	12.5	8	3	2

Tableau 1 : Moyens humains (en homme/mois) mis en œuvre dans le projet AgriDrone.

Quelques changements par rapport à la répartition initiale due à :

- 3 mois d'ingénieur qui ont été basculés du CIRAD-Réunion au CIRAD-Montpellier
- répliation des mesures expérimentales en 2007 (4 mois de technicien ont été reportés de Action1/Tache 4 à l'Action 1/Tache 2).

Mois	2006										2007												2008					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J
Action 0 (P: Comité de Pilotage)	x	P	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	P	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	P	x	x
Action I																												
1. Analyse besoins														x	x	x	x	x										
2. Mesures parcelles exp.	x	x	x	x	x ¹										x	x	x	x	x									
3. Traitement des données																												
3.1 Traitement des images							x										x	x	x	x								
3.2 Indicateurs agronomiques								x												x	x	x	x	x				
4. Mesures réel		x		x	x			x	x						x	x	x	x										
5. Production carto																							x	x	x			
Action II																												
1. Dévelop. outil SIG															x							x	x		x			
2. Valorisation (C : Conférence / M : Manifestation)																	M	C	C	x	x	x	x	x	M	M	M	C
3. Séminaire final																							x	x	x	x		
4. Offre de service																										x	x	

¹ Interruption des mesures suite à un vol de matériel

Tableau 2 : Calendrier réalisé/prévisionnel du projet AgriDrone (En couleur : calendrier prévisionnel lors du dépôt du projet - X : calendrier réalisé.

Le calendrier est globalement décalé, du à :

- Un démarrage du projet qui a eu lieu en mars 2006 au lieu de janvier 2006 (2 mois de retard)
- Des mesures en milieu expérimental qui n'ont pu être décalées et qui donc ont repoussé l'analyse des besoins
- Une prolongation de 4 mois du projet
- Une réplique des mesures en milieu expérimental en 2007 non prévue initialement

Missionnaire	Objet et dates	Action.Tache
<i>2006 : Mission Réunion – Kick-off meeting + mise en place des mesures expérimentales</i>		
Agnès Bégué (CIRAD)	15 - 26 avril = 10 jours	1.2.
S. Labbé (Cemagref)	15 - 26 avril = 10 jours	1.2.
B. Roux (Avion Jaune)	15 - 27 avril = 11 jours	1.2.
<i>2006 : Mission acquisition en milieu réel</i>		
B. Roux (Avion Jaune)	Octobre : mission annulée (billet non remboursé)	1.4.
<i>2006 : Mission colloque Allemagne</i>		
P. Degenne	Novembre = 4 jours	2.2
<i>2007 : Mission Réunion - Cahier des charges du système de diffusion des données</i>		
P. Degenne (CIRAD)	1 - 6 mai = 5 jours	2.1.
<i>2007 : Mission Réunion - Participation à Cap 2025 + point à mi-parcours</i>		
Agnès Bégué (CIRAD)	30 juin - 11 juillet = 10 jours	2.2.
S. Labbé (Cemagref)	18 - 29 juin = 10 jours	2.2.
B. Roux (Avion Jaune)	24 juin-4 juillet = 9 jours	2.2.
<i>2007 : Mission Angleterre</i>		
S. Labbé	Septembre = 2 jours	2.2.
<i>2008 : Mission Montpellier (travail)</i>		
V. Lebourgeois	décembre 07 - mars 08	1.3. (2.)
M. Houles	janv-08	1.3. (2.)
<i>2008 : Mission Réunion : Séminaire final</i>		
Agnès Bégué (CIRAD)	12 - 19 avril = 7 jours	2.3.
S. Labbé (Cemagref)	9 - 19 avril = 10 jours	2.3.
B. Roux (Avion Jaune)	9 - 19 avril = 10 jours	2.3.
P. Degenne (CIRAD)	11 - 19 avril = 8 jours	2.3.

Tableau 3 : Synthèse des missions effectuées dans le cadre du projet.

II - Les partenariats :

Malgré la distance Montpellier-Réunion, le partenariat a très bien fonctionné.

Ce succès peut s'expliquer par la bonne complémentarité des compétences techniques (agronomie / géomatique) et de la localisation géographique (Unité « canne » à La Réunion : proche de la profession – Unité TETIS à Montpellier : Maison de la Télédétection) des équipes partenaires.

Ce succès est également dû à la longue pratique du travail en partenariat entre les équipes du CIRAD de Montpellier et celles de La Réunion sur le thème de la télédétection au service de la filière canne (depuis 2000), au lien historique existant entre l'équipe du CIRAD à La Réunion et les professionnels de la canne, et enfin l'équipe du CIRAD à la Maison de la Télédétection et le Cemagref et l'Avion Jaune au travers de l'UMR TETIS ; les compétences respectives des équipes et des personnes étaient bien connues de part et d'autre, et le rôle et l'apport de chaque partenaire ont été conformes à ce qui avait prévu dans le projet :

CIRAD-Montpellier (UMR TETIS) :

- Gestion du projet (gestion du budget et des ressources humaines, organisation du travail, rédaction des rapports)
- Corrections géométriques et radiométrique des images
- Traitement et interprétation des données sur parcelle expérimentale
- Réalisation des produits cartographiques faits à partir des images acquises en milieu réel (mosaïques vraies couleurs, NDVI, MNT)
- Développement du SIG
- Organisation du séminaire final (définition du contenu, contacts avec intervenants, contacts et financement des participants étrangers)

CIRAD-Réunion (UR SCA) :

- Analyse des pratiques et des besoins auprès de la filière canne
- Acquisition des images aéroportées (campagnes ULM)
- Acquisitions des données biologiques et radiométriques sur parcelles expérimentales
- Traitement et interprétation des données sur parcelle expérimentale
- Préparation de données pour le SIG
- Organisation du séminaire final (location salle, réalisation plaquette annonce, liste de diffusion, préparation pochette du colloque)
- Création du site web
- Préparation du matériel pédagogique.

Cemagref :

- Expertise sur la caméra thermique (choix du matériel, étalonnage radiométrique, caractérisation géométrique, mode d'acquisition, format des données, traitement des images, corrections atmosphériques des images) ;
- Expertise sur les GPS et le tracking (choix du matériel, protocole d'acquisition et traitement des données)
- Expertise sur les corrections géométriques des images optiques et thermiques (caractérisation et étalonnage des appareils et mise en géométrie des images).

Avion Jaune :

- Commande et préparation du matériel d'acquisition d'images (appareils photos)
- Mise au point de la plateforme d'acquisition sur ULM
- Formation des agents CIRAD à La Réunion sur l'acquisition des données (drone et ULM)
- Mise au point des protocoles d'acquisition des images (altitude, fréquence acquisition, pré-traitement des images optiques)
- Etablissement du cahier des charges final.

III – Le déroulement du projet

Rappel : le projet est découpé en deux actions distinctes (+ gestion du projet) :

Action 0 : Gestion du projet

Action 1 : Campagne de mesures et développement de produits thématiques cartographiques

- **Tâche 1** : Analyse des besoins
- **Tâche 2** : Campagne de mesures radiométriques et biologiques sur des parcelles expérimentales
- **Tâche 3** : Traitement et analyse des données
- **Tâche 4** : Campagne de mesures radiométriques et biologiques en milieu réel
- **Tâche 5** : Réalisation des produits cartographiques

Action 2 : Diffusion des travaux auprès de la filière et proposition d'un service opérationnel

- **Tâche 1** : Développement d'un prototype d'outil de diffusion et de manipulation de couches d'information géographique (images, vecteurs ...)
- **Tâche 2** : Valorisation des produits
- **Tâche 3** : Organisation d'un séminaire de restitution auprès des acteurs de la filière
- **Tâche 4** : Proposition d'un service opérationnel.

Rappel des objectifs*Gestion du projet***Méthodes de travail utilisées**

- Coordination et suivi des actions
- Organisation des missions
- Rédaction des rapports pour la DAR
- Programmation de la valorisation du projet (posters, communications, papiers scientifiques ...)
- Gestion budgétaire.

Organisation mise en place par le chef de file et chaque réalisateur : travail réalisé, moyens humains, matériels et financiers mobilisésMoyens humains impliqués :

- 3 mois ingénieur CIRAD-Montpellier

Moyens financiers mobilisés :

	Coût Total	Coût ADAR
3 mois ingénieur CIRAD	23 100	11 550
TOTAL*	23 100	11 550

* Des actions de coordination et de gestion du projet ont été menées à l'occasion des missions à La Réunion (kick-off meeting, rencontre avec les partenaires, suivi des actions ...). Dans un souci de clarté, ces missions ont été re-ventilées dans les autres Actions.

Etapas et calendrier

Tout au long du projet

Comités de pilotage du 21 avril 2006, 29 Mai 2007, 18 Décembre 2007 et 18 avril 2008 (voir les Modalités d'organisation).

Indicateurs de suivi et de réalisation

- Compte-rendu des réunions
- Tableau de temps passé par partenaire (Tableau 1)
- Calendrier final du projet (Tableau 2)
- Tableaux des missions (Tableau 3)
- Tableau des moyens financiers

Rappel des objectifs

Analyse des besoins auprès des utilisateurs de la filière (identification des paramètres pertinents pour le suivi de la culture, fréquence, échelle de représentation ...).

Méthodes de travail utilisées

1. Analyse des études existantes sur les pratiques agricoles.
 - Enquête sur les itinéraires agronomiques des planteurs réalisée en 2005 par le Centre Technique Industriels de la Canne et du Sucre (CTICS) :
 - **22 Mai 2007, Cirad La Bretagne (Réunion)**
Présents : M.Houles (CIRAD), E. Fillols (CTICS) responsable de l'enquête
Objectifs : synthèse et résumé de l'enquête du CTICS, méthodologie de l'enquête
 - Enquête sur les attitudes et les représentations des planteurs en 2006 réalisée par l'IPSOS Océan Indien.
2. Préparation et réalisation d'un questionnaire sur les pratiques agricoles des exploitants (quelle perception de la variabilité spatiale intra- et inter-parcellaire ? Comment est prise en compte cette variabilité lors des opérations culturales ? ...) et leurs besoins en terme d'informations cartographiques. Présentation d'exemples de produits cartographiques thématiques.
 - 3 réunions avec des professionnels de la filière canne pour préparer le questionnaire :
 - **29 Mai 2007, Cirad La Bretagne (Réunion)**
Présents : V.Lebourgeois (CIRAD), M.Houles (CIRAD), M.Thierry (Usine Bois rouge), P.Rondeau (Usine du Gol), B.Siegmund (CERF), H.Papaiconomou (Chambre d'agriculture), E.Fillols (CTICS), PF.Chabalier (CIRAD), C.Poser (CIRAD), JF.Martine (CIRAD), C.Gossard (Chambre d'agriculture)
 - **30 Mai 2007, Cirad La Bretagne (Réunion)**
Présents : V.Lebourgeois (CIRAD), M.Houles (CIRAD), P. Pariente (Comité pilotage de la canne)
 - **4 Juin 2007, Cirad La Bretagne (Réunion)**
Présents : V.Lebourgeois (CIRAD), M.Houles (CIRAD), Roland Pirot (CIRAD)
3. Enquêtes auprès des agriculteurs à partir du questionnaire :
 - Questionnaire dirigé auprès d'agriculteurs lors de la manifestation CAP 2025 du 3 juillet 2007 sur l'analyse des pratiques des agriculteurs et sur les besoins.
 - Un entretien particulier avec un exploitant agricole
 - **31 Mai 2007, Exploitation de Mr Moutanvirin (Réunion)**
Présents : M. Houles (CIRAD), V. Lebourgeois (Cirad), R. Pirot (Cirad), Moutanvirin (planteur)
Objectifs : Connaître des pratiques culturales et évaluer son intérêt vis-à-vis des produits prévisionnels.
4. Réunions avec des techniciens agricoles à partir du questionnaire
 - 2 réunions avec des techniciens de la chambre d'agriculture :
 - **31 Juillet 2007, Chambre d'agriculture de Trois Bassin (Réunion)**
Présents : DOMEN (technicien), Sully RICKMOUNI (technicien), Nicolas ROBERT (technicien), Christophe GOSSARD (Responsable techniciens), Marion HOULES (CIRAD)
Objectifs :
 - **30 Août 2007, Chambre d'agriculture de S^t Benoit (Réunion)**
Présents : Yvrin RIVIERE (technicien), Sully RICKMOUNI (technicien), Ester HOARAU (technicien), Christophe GOSSARD (Responsable techniciens), Valentine LEBOURGEOIS (CIRAD), Marion HOULES (CIRAD)

Organisation mise en place par le chef de file et chaque réalisateur : travail réalisé, moyens humains, matériels et financiers mobilisés

Moyens humains impliqués : 1 mois d'ingénieur CIRAD-Réunion

Moyens financiers mobilisés :

	Coût Total	Coût ADAR
1 mois ingénieur CIRAD	7 700	3 850
TOTAL	7 700	3 850

Etapes et calendrier

L'analyse des besoins n'a pas pu se faire en début de projet comme cela était initialement prévu. La convention ayant été signée en mars 2006, l'analyse des besoins a été reportée car les ressources humaines étaient alors fortement mobilisées par la mise en place de la campagne de mesures de terrain qui ne pouvait pas être décalée dans le temps. De plus, afin de ne pas multiplier les rendez-vous auprès des professionnels de la filière, nous avons préféré attendre d'avoir des produits de démonstration avant d'entamer la démarche d'enquêtes. Ce retard n'a pas eu de conséquences sur le déroulement du projet.

- Questionnaire : Préparation en avril –mai 2007
- Cap 2025 : 3 juillet 2007
- Entretiens divers : entre mai et août 2007

Résultats obtenus

Au total, 29 réponses au questionnaire sur les pratiques et les besoins ont été dépouillées (21 réponses recueillies pendant Cap 2025 auprès de planteurs et 8 réponses issues d'entretiens avec exploitants et techniciens). Les principaux résultats de l'enquête sont :

- Pas de gestion spatialisée à l'échelle **intra-parcellaire**. La même dose d'intrants, de désherbants ou d'irrigation est apportée sur toute la parcelle, sans prise en compte de l'hétérogénéité intra-parcellaire.
- Peu de gestion spatialisée à l'échelle **inter-parcellaire**. On constate que la plupart des planteurs apportent les intrants de façon très systématique. Seuls certains essaient d'adapter les doses et formules en fonction de la précocité des variétés, de l'âge de la souche, de la topographie ...
- Les planteurs qui ont de grandes exploitations sont très intéressés par « la vision de haut » de leurs exploitations car cela leur permettrait de cibler les observations terrain, de gagner du temps pour le tour des champs et d'intervenir plus rapidement en cas de problème.
- Les planteurs ont une perception plutôt positive de ces nouveaux outils et beaucoup sont prêts à tester leur efficacité mais le coût est un facteur limitant à leur adoption. Une étape pour tester la rentabilité de ces produits semble donc indispensable.
- Peu de planteurs sont familiers avec les nouvelles technologies. Les produits cartographiques pourraient donc être diffusés soit directement aux planteurs via des cartes « papier » accompagnés d'informations ou de conseils simplifiés, soit par l'intermédiaire des techniciens agricoles.
- Les techniciens agricoles sont très intéressés par les produits issus de la télédétection aéroportée et souhaiteraient disposer des cartes pour affiner leurs conseils. Leur très bonne connaissance du « terrain » est un avantage considérable pour l'interprétation des cartes et à leurs traductions sous forme de conseils agronomiques. Les cartes sont un support visuel intéressant pour appuyer leurs conseils et convaincre les planteurs d'améliorer leurs pratiques culturales. Certains techniciens utilisent des SIG et la diffusion de certains produits sous forme de données SIG pourrait être envisagée.
- Les professionnels de la filière canne à sucre ont aussi montré un certain intérêt pour les produits issus de la télédétection aéroportée mais avec une couverture spatiale plus large.

Liste des produits les plus intéressants pour chaque groupe d'utilisateurs :

Planteurs :

- parcellaire → surfaces précises pour calculer les doses d'intrants
- prévision de rendements → organiser les travaux pendant la campagne de coupe
- enherbement et manquants → gain de temps pour les grandes exploitations

Techniciens :

- développement végétatif (NDVI) → information importante pour la prise de décision et le conseil
- cartes d'état azoté et hydrique → aider les planteurs à adapter les apports au potentiel de chaque secteur.
- détection des anomalies de croissance → surveillance des cultures et système d'alerte

Filière :

- surface cultivée ou productive → estimation des rendements et des tonnages par zone
- suivi de l'enherbement dans le temps → tester l'efficacité des désherbants
- estimation des rendements → organisation de la campagne de récolte
- attaques parasitaires → veille sanitaire

Indicateurs de suivi

- Tableau de temps passé (Tableau 2)

Indicateurs de réalisation

- Compte-rendu des réunions
- Questionnaire (Annexe 1)

Rappel des objectifs

L'objectif des campagnes de mesures sur parcelles expérimentales est de profiter de la concentration sur une petite surface d'une grande variabilité (maîtrisée et documentée) du développement de la culture, afin de relier état du couvert et mesures aéroportées et de proposer des produits de démonstration de caractérisation des couverts de canne à différents stades et dans différentes conditions de stress.

Méthodes de travail utilisées

En raison des difficultés rencontrées lors de la campagne de mesures en 2006 sur le site de La Mare (cf. Rapport intermédiaire AgriDrone, fév. 2007), nous n'avons pas pu acquérir un jeu de données suffisant pour répondre à nos objectifs. Une deuxième campagne de mesures, non prévue, a été organisée en 2007 ; l'expérience aidant, cette campagne fut un succès.

Parcelle expérimentale de La Mare (Annexe 2)

- Parcelle expérimentale du CIRAD (0.8 ha) composée de 18 essais x 3 répétitions : irrigation (pluvial /irrigué), nutrition azotée (0N / 65N / 130N kg ha⁻¹) et variété (R570 / R575 et R 579)
- Localisation : au nord-est de l'île, près de S^{te} Marie (20°54'07''S ; 55°31'52.5'' E)
- Climat : en zone pluviale (entre 1500 et 2000 mm/an).

Appareils radiométriques utilisés (Annexe 7)

- Appareils photographiques numériques : 3 appareils CANON EOS 350D en 2006 et 3 appareils CANON EOS 400D en 2007. Quatre appareils ont été modifiés pour mesurer le rayonnement dans le Red-Edge et le PIR. La caractérisation spectrale des appareils a été faite dans les laboratoires de l'ONERA à Toulouse.
- Caméras thermiques : Mesures aéroportées avec la TH7800 (IMPAC) en 2006 et la B20 HSV FLIR en 2007. La résolution de ces caméras est : 240 pixels x 320 pixels.
- Radiothermomètres : Mesures sur le terrain avec un appareil Rayteck en 2006 et un appareil HEITRONICS KT19 en 2006 et 2007. Ces appareils ont été étalonnés avant l'expérimentation avec un corps noir à l'INRA d'Avignon.

Autres équipements

- GPS à bord de l'ULM (tracking)
- Capteurs de température et d'humidité de l'air HMP50 (VAISALA) : 1 couple de capteurs sur ULM et 1 couple au sol en 2006 et 2007.

Protocole d'acquisition de mesures radiométriques (bilan des mesures en Annexe 3)

- En 2006, 4 vols ULM ont été effectués entre les mois d'avril et juillet. Ces vols, pour la plupart incomplets en termes de mesures, ont servi à mettre au point le protocole d'acquisition.
- En 2007, 8 vols ont été effectués entre les mois de mai et de septembre, à différentes altitudes (300-1200 m). Les mesures effectuées à 300 m conduisent à une résolution de l'ordre de 20 cm dans le visible et le proche infrarouge, et 1 m dans l'infrarouge thermique.
- En plus des mesures ULM, des mesures de température de surface faites à l'aide de radiothermomètres sur le terrain sur des cibles chaudes (sol), froides (herbes) et intermédiaires ont servi à corriger les mesures ULM.

Protocole d'acquisition de mesures biologiques (bilan des mesures en Annexe 2)

- Les mesures de structure du couvert (environ 1 fois/mois) : évolution de l'indice foliaire.
- Les mesures biochimiques (environ 1 fois/mois) : Teneur en éléments nutritifs (N, P, K, Ca, Mg) en 2006, teneur en eau des cannes, en chlorophylle (SPAD) et en sucres (BRIX) pendant la durée de la campagne aérienne en 2006 et 2007.
- Rendement, teneur en sucre : mesurés pour chaque placette au moment de la coupe.

Organisation mise en place par le chef de file et chaque réalisateur : travail réalisé, moyens humains, matériels et financiers mobilisés

Moyens humains impliqués :

- 6.5 mois Ingénieur.
- 8 mois Techniciens.

Moyens financiers mobilisés :

	Coût Total	Coût ADAR
Equipement	32 000	0
Vols ULM	3 000	0
Missions CIRAD AR Mpt-Run	1760	1 760
Missions Cemagref AR Mpt-Run	2 100	2 100
Missions Avion Jaune AR Mpt-Run	2 000	2 000
0.5 mois ingénieur CIRAD-Mpl	3 850	1 925
8 mois techniciens CIRAD-Run	36 000	18 000
4 mois ingénieur CIRAD-Run	30 800	15 400
1 mois ingénieur Cemagref	7 700	0
1 mois Avion Jaune	11 000	11 000
TOTAL	130 210	52 185

Etapes et calendrier

- Commande et préparation du matériel en mars 2006
- Campagne 2006 : d'avril à juillet 2006
- Campagne 2007 : de mai à septembre 2007

Résultats obtenus

Le jeu de données acquis en 2006 est un jeu d'essai qui a permis la mise au point du protocole d'acquisition des données biologiques et radiométriques. Les données ne sont pas exploitables en temps que telles car incomplètes (une seule date est utilisable, voir « Rapport intermédiaire AgriDrone, fév. 2007 »).

En revanche, le jeu de données en 2007 est complet sur la période mai-septembre avec des effets nutrition/irrigation et variétaux très marqués. On a ainsi une bonne caractérisation de la canne au maximum de son développement et sur l'ensemble de la période de maturation..

Indicateurs de suivi

- Tableau de temps passé (Tableau 1)
- Tableau des missions (Tableau 3)

Indicateurs de réalisation

- Tableau synthétique des campagnes de mesures radiométriques (Annexe 3)
- Tableau synthétique des campagnes de mesures biologiques (Annexe 2)
- 3 communications à des colloques et 1 poster (Annexe 7).

Rappel des objectifs attendus : *Les corrections géométriques (correction des déformations dues à l'objectif et projection des images dans un référentiel cartographique) et radiométriques (correction des effets de vignettage et inter-étalonnage) des images sont indispensables avant tout traitement algorithmique et leur mise en relation avec les paramètres mesurés au sol.*

Méthodes de travail utilisées

Corrections radiométriques des images :

La correction radiométrique des images est indispensable pour le traitement de séries temporelles d'images (cas de la parcelle expérimentale de La Mare) et pour la création des mosaïques (cas des images acquises en milieu réel). Ces corrections visent à corriger les perturbations radiométriques qui sont de deux ordres :

- Les perturbations dues à l'optique des capteurs (le vignettage). Le vignettage des capteurs optiques a été caractérisé par une fonction polynomiale qui est calculée sur une image moyenne pour chaque longueur d'onde et chaque appareil photo. A partir de cette fonction est produite une image « filtre » qui est ensuite appliquée aux images à corriger. Cette chaîne de traitement a été développée avec le logiciel R
- Les perturbations dues aux conditions d'éclairage. Pour traiter les séries multi-temporelles d'images optiques, différentes méthodes de correction ont été testées : la prise de points d'invariants sur les images, le calcul de ratio de bandes spectrales et la normalisation du rayonnement incident calculé à partir du modèle atmosphérique 6S (besoin de connaître la sensibilité spectrale de chaque appareil photo pour les corrections atmosphériques, voir Action1/Tache 2).

La correction des images thermiques s'est faite par fonction de transfert à partir de mesures de température faites sur des cibles au sol au moment de l'acquisition aérienne, et par modélisation des effets atmosphériques à l'aide du logiciel MATIS.

Corrections géométriques des images optiques et thermiques :

La correction géométrique des images est une étape préalable indispensable pour créer des mosaïques (à l'échelle d'une exploitation par exemple) ou superposer des images acquises à différentes dates. Les distorsions géométriques sont dues à :

- L'optique des capteurs. Ces distorsions sont calculées à partir d'images de mire et d'un logiciel spécialisé dans le calcul des polynômes de déformation. Une méthode originale de caractérisation de la caméra thermique a été développée à cette fin (Annexe 7).
- La prise de vue. Ces distorsions sont corrigées à partir d'une image de référence (orthophotos de l'IGN par exemple) par prise de points d'amer.

Organisation mise en place par le chef de file et chaque réalisateur

Moyens humains impliqués :

- 3 mois ingénieur (Développement méthodologique).
- 1 mois Technicien (corrections géométriques des images de La Mare).

Moyens financiers mobilisés :

	Coût Total	Coût ADAR
1 mois ingénieur Cemagref	7 700	0
2 mois ingénieur CIRAD-Mpl	15 400	7 700
1 mois technicien CIRAD-Mpl	4 500	2 250
TOTAL	27 600	9 950

Etapes et calendrier

- Premiers essais de corrections radiométriques sur les données de 2006 : sept. 2006
- Finalisation de la méthode et corrections radiométriques de l'ensemble des images : juin – sept 2007
- Corrections géométriques des images de La Mare et d'un jeu de données en milieu réel (cf. Action1/Tache 4) : oct 2007.

Résultats obtenus

Les résultats sont détaillés dans les communications présentées en Annexe 7. En résumé :

- les méthodes de correction du vignettage ont donné de bons résultats.
- Les méthodes de normalisation radiométrique multi-temporelle sont plus difficiles à mettre en œuvre car :
 - o suivant l'altitude de la prise de vue, les invariants sont plus ou moins faciles à identifier sur une photo ;
 - o la normalisation des images par l'éclairement au moment de la mesure n'a pas pu se faire car nous ne disposons que de données horaires dans des conditions de ciel très variables ;
 - o la correction par calcul de la réflectance au niveau du sol, nécessite des paramètres atmosphériques qui ne sont pas toujours facilement estimés ;
 - o enfin, les calculs de ratio de bandes spectrales à partir d'images dévignettées donne de très bons résultats.
- Les méthodes de correction géométriques ont été faites selon un protocole classique. Seule la caractérisation de l'optique des différentes caméras a fait l'objet d'un développement méthodologique original (Annexe 7).

Indicateurs de suivi

- Tableau de temps passé (Tableau 1)

Indicateurs de réalisation

- Un jeu de données images corrigées sur la parcelle de La Mare (format ERDAS Imagine)
- Un guide méthodologique de traitements radiométrique et géométrique des images (fichier ppt).
- 2 communications et 1 poster présentés dans des colloques internationaux (Annexe 7)
- 1 papier soumis à *Sensors Journal* (Annexe 7).

Rappel des objectifs attendus

L'analyse conjointe des données biologiques et radiométriques permettra de proposer et de représenter spatialement des premiers indicateurs agronomiques (développement du couvert, couleur du feuillage, stress hydrique ...).

Méthodes de travail utilisées

- Jeu de données biologiques et images multispectrales corrigées de la parcelle expérimentale de La Mare de 2006 (incomplet) et 2007 (complet).
- Extraction des variables radiométriques moyennes par traitement, par date.
- Calcul des indices spectraux : NDVI (Normalized Difference vegetation Index avec les bandes Rouge et Proche Infrarouge) et le CSI (Crop Stress Index, avec la bande Infrarouge Thermique).
- Mise en relation des données radiométriques corrigées (solaire et thermique) avec les données biologiques de terrain (calcul de fonctions de transfert)
- Application des fonctions de transfert et calculs d'indicateurs agronomiques sur la parcelle de La Mare.

Organisation mise en place par le chef de file et chaque réalisateur :

Moyens humains et financiers mobilisés : 4 mois ingénieur CIRAD

	Coût total	Coût ADAR
2 mois ingénieur CIRAD-Run	15 400	7 700
2 mois ingénieur CIRAD-Mpl	15 400	7 700
1 mission Réunion - Mpl	645	645
1 mission Réunion - Mpl	844	844
TOTAL	32 289	16 889

Étapes et calendrier

- Traitement des données acquises en 2006 : octobre 2006.
- Traitement des données acquises en 2007 : octobre 2007 – février 2008.

Résultats obtenus

Les résultats sont détaillés dans les communications présentées en Annexe 7.

En résumé, les résultats montrent que le NDVI est sensible au LAI jusqu'à la fin de la période de croissance (fin juillet), et au SPAD (couleur des feuilles) durant la phase de maturation. La sensibilité à l'humidité de la plante est faible. Pour le CSI (Crop Stress Index), le LAI est également le facteur principal en début de culture. Une fois la végétation complètement développée (LAI au dessus de 4.5), le CSI devient plus sensible à l'humidité. Le CSI ne montre aucune sensibilité au SPAD.

Ainsi, le NDVI et le CSI présentent une sensibilité différente aux variables de surface. L'utilisation combinée de ces deux indices peut ainsi fournir une information importante sur l'état des cultures, en permettant notamment différencier un stress azoté d'un stress hydrique, ce qui n'est pas possible avec une seule mesure.

Indicateurs de suivi

- Tableau de temps passé (Tableau 1)
- Tableau des missions (Tableau 3)

Indicateurs de réalisation

- 2 communications dans des colloques internationaux (Annexe 7)
- 1 papier en préparation.

Rappel des objectifs attendus : *Après l'évaluation des résultats obtenus sur les essais agronomiques, une campagne de mesure en milieu paysan est prévue sur deux ou trois exploitations couvrant des conditions de culture variées (pluviale/irriguée, variétés, sols, altitude, techniques culturales...).*

Méthodes de travail utilisées

- Campagnes de mesures par ULM optique + thermique en 2006 (10 sites survolés du Nord au Sud par l'Ouest, Annexe 3), avec les appareils photo EOS 350D et la caméra IMPAC
- Campagnes de mesures par ULM optique et thermique en 2007 (8 sites survolés sur le pourtour de l'île, Annexe 3) avec les nouveaux capteurs optiques (Canon 400D) et thermique (FLIR).
- Constitution d'une banque de données images de la canne par prise de photos sur le terrain et mesures points GPS en octobre et novembre 2006 en simultané avec les acquisitions aéroportées. Illustration des différentes pratiques culturales observées.

Organisation mise en place par le chef de file et chaque réalisateur

Moyens humains impliqués :

2.5 mois ingénieur.

Moyens financiers mobilisés :

	Coût Total	Coût ADAR
2 mois ingénieur CIRAD	15 400	7 700
0.5 mois ing. Avion Jaune	5 500	5 500
1 mission Avion Jaune	1 058	1 058
TOTAL	21 458	14 258

Etapas et calendrier

Afin d'obtenir des produits de démonstration le plus tôt possible dans le projet, la campagne d'acquisition d'images en milieu réel s'est faite dès la première année du projet.

- En 2006, des acquisitions ont été faites en avril/juin/juillet, et pendant la coupe en oct/nov.
- En 2007, des acquisitions complémentaires ont été menées entre mai et août.

Résultats obtenus

- Constitution d'une banque d'images ULM/photos terrain illustrant la variabilité spatiale de la canne en cours de levée ou tallage, et ce pour différentes pratiques culturales réalisées après la coupe (brûlis, résidus de récolte, ou labour du sol et nouvelle plantation).
- Constitution d'une base d'images aéroportées multispectrales (optiques et thermiques) acquises à différentes périodes de l'année.

Indicateurs de suivi

- Tableau de temps passé (Tableau 1)
- Tableau des missions (Tableau 3)

Indicateurs de réalisation

- Tableau de synthèse des campagnes d'acquisition menées en 2006 et 2007 (Annexe 3)
- Powerpoint sur mesures de novembre 2006 mettant en relation les photos de terrain et les photos prises par ULM.

Rappel des objectifs attendus : *Réalisation des produits cartographiques en collaboration avec les utilisateurs : retour sur les produits réalisés.*

Méthodes de travail utilisées

Des produits cartographiques de base (mosaïques vraies-couleurs monodate et multodate, mosaïques d'images thermiques, carte d'indices de végétation et Modèle Numérique de Terrain) ont été réalisés à partir des images corrigées en radiométrie et en géométrie (voir Action1/Tache 3.1). Ces produits ont été présentés lors du séminaire final (Action 2 /Tache 3) et ont servi de base pour l'évaluation des coûts de traitement des données (Action 2 /Tache 4).

Deux zones d'étude ont été traitées à titre de démonstration : S^{te} Suzanne et Bras-Panon. Les principaux traitements, effectués avec le logiciel ERDAS Imagine, sont détaillés dans le tableau ci-dessous :

Zone de S^{te} Suzanne

- Traitement d'une dizaine de 10 photos (environ 0.5 km²) acquises le 20 octobre 2006 (repousses de canne) et 8 juin 2007 (canne en pleine végétation), faite à environ 300 m d'altitude (13 cm de résolution pour octobre 2006 et 20 cm pour juin 2007).
- Correction géométrique avec le module LPS :
 - Renseinement des paramètres de prises de vue ;
 - Prise de points d'appuis à partir des ortho-photos de l'IGN ;
 - Triangulation (erreur moyenne < 1 pixel).
 - Application du modèle de déformation à l'ensemble des images acquise avec cet appareil photo.
- Combinaison des images ainsi rectifiées dans une image multispectrale :
 - *Le canal 1 -> bleu*
 - *Le canal 2 -> vert*
 - *Le canal 3 -> rouge*
- Pour mosaïquer les images nous avons utilisé l'outil « mosaic tool ». Les zones de recouvrement entre les images sont très importantes. Le logiciel créé de façon automatique des lignes de découpage pour délimiter la partie de chaque image qui sera conservée. Nous avons constaté qu'il était préférable de tracer manuellement ces lignes en utilisant le paysage (routes, bordures de parcelles...).

Zone de Bras Panon

- Traitement des acquisitions du 27 juillet 2007, faite à environ 2600 m d'altitude au dessus de parcelles suivies par la Chambre d'Agriculture (1 m de résolution dans l'optique et 3 m dans le thermique). Traitement de 35 photos pour une superficie d'environ 14 km².
- Correction radiométrique (correction du vignettage)
- Correction géométrique (voir traitements sur S^{te} Suzanne) et création d'une mosaïque multi-spectrale :
 - *Le canal 1 -> bleu*
 - *Le canal 2 -> vert*
 - *Le canal 3 -> rouge*
 - *Le canal 4 -> proche infrarouge*
 - *Le canal 5 -> infra rouge thermique*
- Calcul du MNT : Ce travail est réalisé avec le module LPS, en utilisant les images acquises avec le capteur proche infra rouge (meilleur résultat). Le MNT obtenu à une résolution de 5 mètres.
- Calcul d'un indice de végétation : NDVI (ou Normalized Difference Vegetation Index), à partir des images acquises dans le rouge et le proche infrarouge. Création d'une table de couleur pour restitution cartographique.

Organisation mise en place par le chef de file et chaque réalisateur

Moyens humains et financiers mobilisés :

	Coût Total	Coût ADAR
1 mois ingénieur CIRAD	7 700	3 850
2 mois technicien	9 000	4 500
TOTAL	16 700	8 350

Étapes et calendrier

- Réalisation des produits cartographiques de base sur les 2 zones test : janv. - mars 2008

Résultats obtenus

- Mosaïques géoréférencées (UTM WGS84) sur la zone de Bras-Panon (14 km², VIS+RED+PIR+THERMIQUE) et sur S^{te} Suzanne (0.5 km², VIS). Fichiers au format ERDAS Imagine.
- MNT sur la zone de Bras Panon (format ERDAS Imagine).
- NDVI sur la zone de Bras Panon (format ERDAS Imagine).

Indicateurs de suivi

- Tableau de temps passé (Tableau 1)

Indicateurs de réalisation

- Fichiers numériques des mosaïques (vis, pir, thermique) + MNT + NDVI, au format ERDAS Imagine
- Posters présentés lors des manifestations Cap 2025 et le séminaire final (Annexe 4)
- Plaquette des produits (Annexe 6)

Rappel des objectifs attendus : *Développement d'un prototype d'outil de diffusion et de manipulation de couches d'information géographique (images, vecteurs ...). Cet outil sera développé à partir de logiciels libres permettant de diffuser le produit sans contrainte de coût. Il sera également développé spécifiquement pour les besoins de la filière canne et sera suffisamment simple d'utilisation pour ne pas nécessiter de connaissances particulières en analyse spatiale ou de formation en SIG.*

Méthodes de travail utilisées

Le prototype de SIG a été construit de manière incrémentale et par expérimentations successives. Ce prototype se présente sous la forme d'un SIG en ligne, utilisable en se connectant à un serveur Web. Il est le résultat d'une intégration de plusieurs types d'outils :

- Un serveur Web
- Un système de gestion de base de données doté d'une extension pour le stockage et le traitement de données géographiques
- Un serveur cartographique
- Un module de rendu cartographique pour navigateur web
- Divers logiciels utilisés pour les conversions de formats et l'intégration des données qui sont de natures et de sources diverses
- Un ensemble de modules logiciels développés spécifiquement pour les besoins de ce projet.

Tous les outils utilisés sont des logiciels libres.

1. Etudes et spécifications : Plusieurs sources d'informations ont été utiles pour déterminer les fonctionnalités que le prototype devait proposer :

- Une connaissance de la filière et de ses habitudes de travail provenant de nos expériences passées.
- Une mission à l'Île de la Réunion en mai 2007 qui nous a permis de rencontrer divers acteurs de la filière.
- Des contacts réguliers entre Montpellier (en particulier P. Degenne) où le prototype était développé et les membres du projet travaillant à la Réunion (en particulier M. Houles et V. Lebourgeois).

2. Développement du prototype :

- Conception générale du prototype
- Création d'un schéma de base de données pour chaque produit
- Création d'un schéma de base de données pour l'interface utilisateur
- Recherche de bibliothèques libres et expérimentations
 - Expérimentations avec Mapserver
 - Expérimentations avec PostgreSQL et PostGIS
 - Expérimentations avec OpenLayers
 - Expérimentations pour la génération de fichiers au format PDF (avec Latex et PDFLatex)
 - Expérimentations de divers moyens pour la génération de fichiers au format KML (pour l'exportation de résultats vers Google Earth)
 - Du protocole TMS (Tile Map Service) pour le tuilage d'images
 - Essais systèmes de tuilage automatiques
- Développement interface utilisateur dynamique qui s'adapte au contenu base de données
- Développements de l'ensemble des modules du côté serveur cartographique et accès base de données.
- Mise en forme et préparation des données
- Mise en ligne sur un serveur Linux et tests
- Mise en ligne sur un serveur Windows et tests
- Traduction pour proposer une version anglaise du prototype à des fins de valorisation.

3. Optimisations :

- Tuilage des images les plus volumineuses.
- Indexation spatiale de certaines tables dans la base de donnée (en particulier le parcellaire cannier).
- Adaptations diverses pour obtenir un comportement homogène dans plusieurs navigateurs webs différents.

Organisation mise en place par le chef de file et chaque réalisateur

Moyens humains et financiers mobilisés :

	Coût Total	Coût ADAR
4 mois ingénieur CIRAD	30 800	15 400
1 mission Mpl - Réunion	1 193	393
TOTAL	31 993	15 793

Etapes et calendrier

- Etudes et spécifications : mission de Pascal Degenne à la Réunion en mai 2007, travaux effectués dans le courant de l'année 2007.
- Développements et tests : fin 2007 et début 2008.
- Mise en ligne et optimisations : mars 2008.

Résultats obtenus

Un prototype de système d'information géographique dédié à la diffusion des produits mis au point par le projet Agridrone vers des acteurs de la filière canne à sucre. Cet outil possède les caractéristiques suivantes :

- Traite aussi bien les produits à base d'images qu'à base de vecteur
- Outil accessible en ligne, ne nécessite pas d'installer un logiciel autre qu'un navigateur Web
- Peut travailler avec différents systèmes de coordonnées en fonction des produits
- Propose différents produits issus d'AgriDrone à des fins de démonstration.
- Adapté aux habitudes de travaux de la filières, en particulier pour la production de résultats statistiques agrégés selon les divers regroupements de parcelles ou de zonages géographiques.
- A la capacité d'intégrer de nouveaux produits cartographiques (cf. produits Agridrone)
- Interface qui s'adapte en fonction du contenu de la base de données (aussi bien pour la prise en compte de nouvelles données pour un produit que pour l'ajout de nouveaux produits)
- Plusieurs formats d'exportation pour répondre à la diversité de besoins, de mode d'organisation des acteurs de la filière, de la diversité des intervenants: cartes papier au format PDF, fichiers KML pour Google Earth
- Export d'extraits de données cartographiques pour respecter la confidentialité et les limites de droits d'usage de différentes données.
- Interface utilisateur multilingue
- Basé entièrement sur des logiciels libres
- Le serveur peut fonctionner aussi bien sur plateforme Windows que sur Linux
- Valorisation possible par la formation (au développement d'outil similaire, l'utilisation de l'outil lui-même ne nécessite pas de formation particulière) et possibilité de co-développement d'outils en se basant sur le prototype.

Indicateurs de suivi

- Tableau de temps passé (Tableau 1)
- Tableau des missions (Tableau 3)

Indicateurs de réalisation :

- Le prototype nommé LIMAGE (LIght MAP GEnerator) dont une version est en ligne sur <http://limage.teledetection.fr/>

Rappel des objectifs attendus : Divers produits de communication seront réalisés pour faire connaître le projet et ses résultats : rédaction d'un guide utilisateur (description des concepts de base, de la méthodologie et des produits, aide à l'interprétation des produits associés, ...), réalisation de produits pédagogiques de démonstration, communications à des colloques et publications scientifiques.

Méthodes de travail utilisées

- Définir le public cible et les objectifs du « guide utilisateur » :
 - o Une partie conceptuelle / expérimentale (pour l'enseignement secondaire et supérieur) : concepts de base, illustration sur le jeu d'images de La Mare (relation radiométrie état hydrique / azoté / variété).
 - o Une partie opérationnelle (pour les professionnels de la géomatique) : description des capteurs/vecteurs, pré-traitement des images, produits cartographiques de base (mosaïque vraies couleurs, MNT et NDVI), difficultés restantes, et analyse de coûts.
- Réalisation d'un guide utilisateur au format powerpoint.
- Rédaction de communications pour des colloques télédétection (3) et agriculture (2)
- Préparation de publications pour soumission dans des revues à facteur d'impact (3)
- Réalisation de posters et d'une plaquette grand public.

Organisation mise en place par le chef de file et chaque réalisateur

Moyens humains et financiers mobilisés :

	Coût Total	Coût ADAR
3 mois ingénieur CIRAD-Mpl	23 100	11 550
2 mois ingénieur CIRAD-Run	15 400	7 700
1 mois ingénieur Cemagref	7 700	0
2 missions Réunion-Montpellier	3 642	844
1 colloque Angleterre (ISPRS)	426	0
1 colloque Allemagne (WABCG)	1 062	0
TOTAL	51 330	20 044

Étapes et calendrier

- Rédaction guide méthodologique : fin de projet, juin 2008
- Préparation des produits pédagogiques de démonstration : fin de projet, juin 2008
- Rédaction de communications et de publications : en continu sur le projet à partir d'août 2007 (évalué à 4 mois).
- Dates des colloques : novembre 2006, août 2007, septembre 2007, juin 2008, juillet 2008
- Dates des principales manifestations :
 - o grand public : 03/2008 (SIA, Paris), 05/2008 (Foire de Bras-Panon, Réunion)
 - o professionnel : 3/07/07 (Cap2025, Réunion), 15-16/04/08 (Canne08, réunion)

Résultats obtenus

Voir indicateurs de réalisation ci-dessous

Indicateurs de suivi

- Tableau de temps passé (Tableau 1)
- Tableau des missions (Tableau 3)

Indicateurs de réalisation :

- 6 Posters et 1 Plaquette grand public (Annexe 4)
- 4 Communications écrites + 1 poster technique (Annexe 7)
- 4 Articles soumis ou en cours de rédaction
- Matériel pédagogique pour les lycées agricoles ou les instituts techniques avec des jeux d'images de démonstration et les outils libres associés.
- Guide utilisateur (concepts, acquisition des données, corrections images, production de cartes et offre commerciale) au format Powerpoint.
- 1 Plaquette offre de service (Annexe 6)

Rappel des objectifs attendus : *Organisation d'un séminaire de restitution auprès des acteurs de la filière (agriculteurs, groupements, Chambre ...) au cours duquel seront présentés les produits et outils de démonstration. Discussion sur un cahier des charges spécifique des produits (indicateurs, fréquence, précision des variables, résolution spatiale, couverture de la zone ...) et réflexions sur la mise en place d'une offre de service (opérateur, produits, coûts à l'hectare de l'acquisition et des traitements ...).*

Méthodes de travail utilisées

- Organisation d'un séminaire sur le thème « Télédétection et canne à sucre » à S¹ Leu, La Réunion (voir Annonce du séminaire en Annexe 5).
 - o 5 réunions de préparation du séminaire entre janvier et mars 2008 :
 - **16 Janvier 2008, Maison de la télédétection (Montpellier)**
Présents : A. Bégué (CIRAD), M. Houlès (CIRAD), S. Labbé (Cemagref), V. Lebourgeois (CIRAD), B. Roux (Avion Jaune), P. Todoroff (CIRAD)
Objectifs: établir un budget, définir les objectifs, réfléchir à l'organisation générale du séminaire, lister les actions à mener, distribution des rôles.
 - **20 Février 2008, Cirad la Bretagne (Réunion)**
Présents : C. Poser (CIRAD), J.F Martiné (CIRAD), S. Della Mussia (CIRAD), Pierre Todoroff (CIRAD), A. Bury (CIRAD), P.F Chabaliier (CIRAD), G.Mandret (CIRAD), C.Gossard (CA), C. Lebon (SFSR), N. Villeneuve (IRD), P. Tessier (Région), M. Houlès (CIRAD) + Visio : S. Labbe (CEMAGREF), B. Roux (Avion Jaune)
Objectifs : rappel des objectifs du séminaire, discussion sur l'organisation de l'atelier (2 programmes proposés), choix du lieu et de la salle, cibler les invités potentiels (organismes), élaborer un timing..
 - **25 Février 2008, Cirad la Bretagne (Réunion)**
Présents : M. Houlès (CIRAD), P. Marnotte (CIRAD)
Objectifs de la réunion : Elaborer la liste des invités en se basant sur la liste des invités des séminaires ARTAS fournie par Daniel Marion (chargé communication de l'ARTAS)
Conclusions : Sélection des organismes à inviter
 - **7 Mars 2008, Cerf (Réunion)**
Présents : M. Houlès (CIRAD), C. Lebon (SFSR), B. Siegmund (Cerf)
Objectifs de la réunion : Dernier point, avant lancement des invitations, sur le programme prévisionnel et les invitations
Conclusions : Sortir la partie concernant « l'organisation de l'offre de service » du séminaire et organiser une table ronde, après le séminaire, qui réunirait uniquement les décideurs et responsables des organismes concernés.
 - **25 Mars 2008, Maison de la télédétection (Montpellier)**
Présents : A. Bégué, S. Labbé, V. Lebourgeois, P. Degenne, B. Roux, S. Dupuy.
Conclusions : programme détaillé du colloque, définition et préparation des 4 ateliers de l'après-midi, bilan des posters/plaquettes à amener.
 - o Travaux préliminaires : liste de diffusion, plaquette d'annonce, matériel promotionnel, réservation salles, réservation repas, organisation voyages des participants étrangers, contacts avec presse/TV.
 - o Tenue du séminaire :
 - **le 14 et 15 avril, séances plénières et ateliers.**
 - **Visite de la station CIRAD** et des essais terrain à S¹ Pierre pour les participants étrangers, le 16 avril.
 - **Réunion finale le 17 avril** avec les décideurs pour discuter de la suite opérationnelle du projet.
Présents : J. M. Dihnut (SAFER), J. Y. Gonthier (SFSR / SR), C. Gossard (Chambre d'Agriculture), P. Rondeau (SFSR / SR), B. Siegmund (CERF), P. Tessier (Conseil Régional), N. Guilbot (CTICS)
 + Agents CIRAD : G. Mandret (Directeur Régional), P. Todoroff, JF. Martiné, C. Poser, PF. Chabaliier
 + Equipe AgriDrone : A. Bégué, S. Labbé, B. Roux, V. Lebourgeois, M. Houles, P. Degenne.
Excusés : La DAF

Organisation mise en place par le chef de file et chaque réalisateur : travail réalisé, moyens humains, matériels et financiers mobilisés

Moyens humains impliqués :

La préparation du séminaire a nécessité 2 mois d'ingénieur à plein temps.

Moyens financiers mobilisés :

	Coût Total	Coût ADAR
1 mois ingénieur CIRAD-Mpl	7 700	3 850
1 mois ingénieur CIRAD-Run	7 700	3 850
2 missions CIRAD (Bégué + Degenne)	4 469	4 132
1 mission Cemagref	2 062	2 062
1 mission Avion Jaune	1 021	1 021
Coût organisation séminaire hors missions (détails donnés en annexe)	8 000	8 000
TOTAL	30 952	22 215

Étapes et calendrier

Janvier 2008 :

- Elaboration du cahier des charges et du budget de la manifestation
- Etat des lieux des séminaires et manifestations sur la canne organisés à la Réunion
- Choix des dates : semaine du 14 au 18 Avril
- Etat des lieux des salles et traiteurs disponibles à ces dates là
- Recueil d'informations et de conseils auprès des différents organisateurs de manifestations
- Première ébauche de programme

Février 2008 :

- Première réunion du comité d'organisation
- Appel d'offre pour financement participants étrangers
- Invitation des participants étrangers
- Réalisation des supports écrits : plaquette de présentation, bulletins d'inscription, annonces internes. Mise en ligne du site web : <http://canne2008.teledetection.fr>

Mars 2008 :

- Envoi des invitations - lettre, plaquette, bulletin - par email (10 mars), par courrier (19)
- Envoi des invitations à la presse (26)
- Commande des éléments promotionnels : mallettes, blocs, stylos, etc.
- Edition du programme, des supports pour les participants
- Réservations hébergements, restauration, transports pour les participants étrangers
- Envoi des invitations pour la table ronde par courrier (31)

Avril 2008 :

- Envoi du programme détaillé par email aux invités
- Envoi des invitations pour la table ronde par mail
- Commande des objets promotionnels
- Fax de rappel à la presse
- Editions des cartes postales et autres documents de la pochette
- Préparation du contenu : présentations orales
- Listing et rassemblement du matériel nécessaire
- Mise en place des ateliers informatiques au musée Stella
- Séminaire : séances plénières et ateliers (15 et 16 avril), visite CIRAD (17), table ronde (18)

Mai 2008 :

- édition des états financiers, bilans
- mise en ligne des présentations et des photos

Résultats obtenus

- 56 participants le mardi et 42 personnes le mercredi, dont 7 étrangers (Maurice, Afrique du Sud, Kenya)
- Retours très satisfaisants de la communauté. La tenue du séminaire sur deux journées complètes, et peut-être plus encore la réalisation des ateliers l'après-midi avec un ratio participant/encadrant de 6 environ, a joué un rôle très important dans les échanges, la compréhension du projet et la sensibilisation aux approches spatialisées.
- Les contacts avec les partenaires étrangers ont été également très fructueux et devraient se poursuivre au-delà du projet AgriDrone par des projets pilote sur site.

Indicateurs de suivi

- Tableau de temps passé (Tableau 1)
- Tableau des missions (Tableau 3)

Indicateurs de réalisation :

- Compte-rendu de la réunion de préparation du 20 février 2008.
- Séminaire à Stella Matutina (S^t Leu, La Réunion) du 15 et 16 avril :
 - o Plaquette de l'annonce du séminaire en français (Annexe 5) et anglais.
 - o Liste des participants (Annexe 5)
 - o Programme détaillé (Annexe 5)
 - o Posters présentés (Annexe 5)
- Site web : <http://cane2008.teledetection.fr/> (versions française et anglaise)

Rappel des objectifs attendus : Proposition d'un service opérationnel : catalogue de produits, calcul de coûts à l'hectare, diffusion des données, formation des agriculteurs à l'utilisation des produits.

Méthodes de travail utilisées

A partir de l'expérience acquise lors des deux années du projet, en terme d'acquisition et de traitement des images, et compte tenu des intérêts manifestés par la profession, un catalogue de produits cartographiques a été élaboré.

Organisation mise en place par le chef de file et chaque réalisateur

Moyens humains impliqués :

- 2.5 mois ingénieur

Moyens financiers mobilisés :

	Coût Total	Coût ADAR
0.5 mois ingénieur CIRAD-Mpl	3 850	1 925
0.5 mois ingénieur CIRAD-Run	3 850	1 925
0.5 mois Avion Jaune	5 500	5 500
TOTAL	13 200	9 350

Etapas et calendrier

Précision du catalogue des produits et affinage des coûts : avril-mai 2008.

Résultats obtenus

Les produits proposés se partagent en deux grands types :

- des produits de base :
 - o mosaïques de photographies vraies couleurs, fausses couleurs,
 - o cartes d'indicateurs de l'activité végétale (NDVI) et de température de surface.
 - o Modèle numérique de terrain fin.
- des produits thématiques :
 - o Surfaces réelles ou projetées des parcelles
 - o Pentés et orientations moyennes par parcelle
 - o Cartographie et mesure des surfaces ayant subi un dégât majeur (incendie ...)
 - o Etat des cultures : enherbement, manquants, défauts d'irrigation ...

Selon le produit demandé, le coût de l'acquisition, du traitement et éventuellement de l'interprétation des images pour les produits thématiques les plus élaborés, ont été estimés de 8 à 12 €/ha.

Indicateurs de suivi

- Tableau de temps passé (Tableau 1)

Indicateurs de réalisation :

- Plaquette offre de service (Annexe 6)

IV – Les modalités de valorisation du projet

Valorisation grand public.

Les résultats obtenus ont été présentés lors de différentes manifestations « grand public » :

- Au Salon de l'Agriculture à Paris (SIA 2008) en mars 2008 : participation au stand « canne à sucre » du CIRAD. Production et distribution d'une plaquette « gestion spatialisée de la production cannière » (Annexe 6)
<http://www.cirad.fr/fr/actualite/communiqu.php?id=875>
- Aux journées Fête de la Science, en novembre 2007 à La Réunion : posters et distribution de plaquettes.
- Reportage de 2 minutes dans l'émission « Terre d'ici » diffusé le jeudi 12 juillet 2007 sur la chaîne Antenne Réunion (décollage drone + mesures de terrain + interview partenaires AgriDrone).
<http://www.cirad.fr/upload/fr/actualite/videos/AgriDrone/agri-drone.html>
- A la 32^{ème} foire de Bras Panon, en mai 2008 à La Réunion : participation au stand « canne à sucre » du CIRAD / SFS / CERF. Vidéos, maquette, posters, documentations
- Presse locale et publications grand public :
 - Première page du quotidien régional « Le Quotidien » de La Réunion et de l'Océan Indien, daté du 12 juin 2008 ; article sur 2 pages (Annexe 4).
 - Un chapitre dans la brochure « La canne aux multiples ressources » édité par le CIRAD.
- Sur le web
<http://www.cirad.fr/fr/actualite/communiqu.php?id=884>

Valorisation technique, auprès des professionnels de la canne.

Les résultats ont été présentés lors de 2 grandes manifestations à La Réunion:

- CAP 2025, 3 juillet 2007 : tenue d'un stand (présentation de posters, démonstration de matériel ...), lors de cette manifestation organisée pour la signature du comité interprofessionnel de la canne et du sucre (CPCS) – 400 participants environ.
http://www.cirad.fr/reunion/actualites/archives_2007/interprofession_canne
- Atelier régional sur le thème de la « Télédétection et canne à sucre », organisé les 15 et 16 avril 2008 par le CIRAD, qui a regroupé une cinquantaine de professionnels de la canne à Stella Matutina (Réunion) : présentations plénières, ateliers de traitement d'image et de SIG, démonstration de matériel d'acquisition de données (détails en Tache 5 et Annexe5).
<http://canne08.teledetection.fr/>

Les résultats ont été présentés lors d'une manifestation internationale :

- 26th WABCG 2006 (World Association of Beet and Cane Growers), organisé du 16 au 20 novembre 2006, à Hannovre.
Titre de l'intervention : Remote sensing & sugarcane production - Research in course and operational solutions.

Communications dans des revues techniques / bulletins :

- Le magazine des professionnels de la canne réunionnais **Caro-Canne**. « Les cannes vues du ciel », n°16 (octobre 2008), pages 16-17.
- Olivier Soufflet, *Télédétection – Prenez de la hauteur*, dans **Agri Réunion**, n° 1, Mai 2008
- *Des images pour optimiser les interventions culturales*, dans **La Réunion Agricole** le magazine de la chambre d'agriculture, Septembre 2007

Valorisation académique,

publications, communications dans des conférences scientifiques en agriculture et télédétection :

- Publications dans des revues à Comité de lecture (en cours ou prévues) :
 - BÉGUÉ A., V. LEBOURGEOIS, S. LABBÉ, B. ROUX, L. PRÉVOT and B. MALLAVAN, 2009. Can digital cameras be used as radiometric sensors for crop monitoring ? *Sensors* (soumis sept 08).
 - LEBOURGEOIS V., J.L., CHOPART and A. OLIOSO, 2009. Integration of a remotely-sensed crop water stress index in a decision-making tool for irrigation monitoring, *Irrigation Science* (en preparation)

- LEBOURGEOIS V., A. BEGUE and J.F. MARTINE, 2009. An airborne imaging system for diagnosis and mapping of water and nutrient variability in Sugarcane crops. *Agronomy* (en preparation).
- o **Communications dans des colloques avec Actes (Annexe 7) :**
 - LEBOURGEOIS, V., A. BÉGUÉ and J.-F. MARTINÉ, 2008, Sensitivity of airborne-derived crop water deficit indices to the cropping practices. In *Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering & Industry Exhibition (AgIng08)*, Hersonissos, Crete (Greece), 13 p.
 - LEBOURGEOIS, V., S. LABBÉ, A. BÉGUÉ and F. JACOB, 2008, Atmospheric corrections of low altitude thermal infrared airborne images acquired over a tropical cropped area. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS'08)*, Boston (Massachusetts, US), 6 p.
 - LEBOURGEOIS, V., A. BÉGUÉ, S. LABBÉ and B. ROUX, 2007, An airborne imaging system for mapping spatial variability in sugarcane. In *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT)*, Durban (South Africa), 4 p.
 - LABBÉ, S., B. ROUX, A. BÉGUÉ, V. LEBOURGEOIS and B. MALLAVAN, 2007, An operational solution to acquire multispectral images with standard light cameras: Characterization and acquisition guidelines. In *Proceedings of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Workshop - Airborne Digital Photogrammetric Sensor Systems*, Newcastle (UK), 6 p.
- o **Communications dans des colloques sans Actes (Annexe 7) :**
 - BÉGUÉ, A., B. MALLAVAN, V. LEBOURGEOIS, S. LABBÉ, L. PRÉVOT and B. ROUX, 2007, Radiometric normalization of multi-temporal visible and near infrared images acquired with light airborne systems. *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Workshop - Airborne Digital Photogrammetric Sensor Systems, Newcastle (UK)*.
- o **Communications dans des magazines destinés à la recherche partenariale :**
 - Revue *Valorisation et Innovation en Partenariat (VIP)* « Gestion de l'irrigation à La Réunion », n° Janvier 2007 (français, anglais, espagnol), CIRAD Montpellier (FR).
 - *Drôles de drones*, dans *Graines d'infos* le journal interne du Cirad, n°38, mars 2008.

- Les transferts prévus :

o **Transfert auprès de l'enseignement secondaire :**

Contacts avec le lycée Pierre Lagourgue du Tampon (M. Jean-Marie Greffion, enseignant de SVT) pour participer à l'élaboration d'un projet d'option sciences en classe de seconde dont l'un des objectifs est de favoriser l'orientation des élèves vers la voie scientifique. Le projet a été validé par le Rectorat et sa mise en place devrait se faire à la rentrée scolaire 2008. Ce projet étant expérimental il sera suivi et encadré par le Rectorat et fera l'objet d'une publication. Les grandes lignes en ont été définies mais son contenu détaillé est en cours de discussion (finalisation mi-juin 2008), sur le thème « Peut-on par télédétection faire un diagnostic sur l'état nutritionnel et hydrique de la végétation ? ».

L'idée centrale de ce projet pédagogique est expérimental et pluridisciplinaire. Il s'agit de faire pousser en laboratoire des lots de plantules dans des conditions nutritives et hydriques contrôlées et de mesurer leur réponse spectrale à l'aide de radiomètres que les élèves auront fabriqués. Un lot d'images prétraitées acquises sur une parcelle expérimentale de canne à sucre dans le cadre du projet AgriDrone sera fourni aux élèves afin de les initier au traitement d'image. Les résultats issus de l'expérimentation (agronomique + radiométrique) en laboratoire serviront de base au traitement de ces images optiques et thermique afin de mettre en évidence les stress hydrique et nutritionnel au sein de la parcelle. Les images seront traitées avec le logiciel Titus utilisé par l'Education Nationale.

o **Transfert auprès d'une société privée :**

Le transfert auprès d'une société privée est encore à l'étude. En octobre 2008, une réunion en visioconférence entre Montpellier et La Réunion devrait rassembler les partenaires du projet AgriDrone, des représentants de la filière et la cellule Valorisation du CIRAD pour réfléchir à la forme que pourrait prendre le service proposé. Actuellement, deux sociétés privées proposent à La Réunion des acquisitions aériennes à partir d'ULM ou de petits avions. La partie « acquisition d'images » pourrait être confiée à l'une de ces sociétés, mais le traitement spécifique des images et leur interprétation pourrait être réalisés dans le cadre d'une société qui reste aujourd'hui à créer. Le scénario le plus vraisemblable, à discuter, serait une incubation d'entreprise au sein du CIRAD ou du CERF, partenaires du projet ; une étape de démonstration en conditions réelles est en effet nécessaire pour confirmer la faisabilité et la rentabilité du service.

V – Les perspectives

o **Les difficultés rencontrées**

Les principales difficultés rencontrées concernent l'acquisition des données :

- Les acquisitions aéroportées avec le drone se sont révélées difficiles en raison du régime de vent de La Réunion. Nous avons choisi de nous concentrer sur des acquisitions ULM, vecteur plus sûr concernant l'intégrité du matériel. Cependant, le drone reste un vecteur intéressant pour des acquisitions sur des surfaces limitées avec les appareils photographiques numériques. Une démonstration du drone en vol a été effectuée lors du colloque Canne08.
- Les incontournables difficultés liés à l'expérimentation (vol de matériel, parcelle brûlée, ...)
- La mise au point de la chaîne de pré-traitement des images s'est avérée plus longue que prévue.

o **Les points forts du projet**

Les points forts concernent la complémentarité des équipes constituant le projet (technique de la mesure, traitement du signal et de l'image, agronomie et filière) et sa double implantation géographique : à Montpellier, où se fait l'appui technique à l'acquisition des données et leur traitement, à La Réunion, avec une collaboration proche des organisations professionnelles de la canne et des spécialistes de l'agronomie au CIRAD.

o **Les suites envisagées**

Le projet AgriDrone va se poursuivre dans les prochains mois, essentiellement sur deux fronts :

- Un front valorisation des connaissances sous la forme de publications dans des revues scientifiques (1 papier soumis et 2 papiers en cours de finition) et de communications sur le projet (exemple, encart sur le projet dans le Dossier Agropolis sur l'Information géographique qui sortira en 2009).
- Un front « Service », qui fait encore l'objet de discussion entre les partenaires du projet et la filière canne à La Réunion. Un dossier de demande d'aide financière pour les petites entreprises sera vraisemblablement déposé courant 2009. En plus de la filière canne à sucre, de nouveaux débouchés sont envisageables, car demandés, dans d'autres secteurs agricoles.

C - Compte rendu financier

Liste des agents réalisateurs par action (identité + diplôme)

	CIRAD-Montpellier		CIRAD-Réunion		Cemagref	Avion Jaune
	Ingénieur	Technicien	Ingénieur	Technicien	Ingénieur	Ingénieur
Gestion du projet	3 (AB)					
Action I						
1. Analyse besoins			1 (MH)			
2. Mesures parcelles exp.	0.5 (AB)		2.5 (VL) + 1 (JFM)	4 (CH) + 4 (EH)	1 (SL)	1 (BR)
3. Trait./ analyse						
3.1 Données aéroportées	2 (AB)	1 (SD)			1 (SL)	
3.2 Données bio et traitement	2 (AB)		1 (VL) + 1 (JFM)			
4. Mesures réel			2 (MH) + 1.5 (VL)			0.5 (BR)
5. Production carto	1 (AB)	2 (SD)				
Action II						
1. Dévelop. outil SIG	4 (PD)					
2. Valorisation	3 (AB)		1 (VL)		1 (SL)	
3. Séminaire	1 (AB)		1 (MH)			
4. Offre de service	0.5 (AB)		0.5 (MH)			0.5 (BR)
TOTAL	17*	3	12.5*	8	3	2

* 3 mois d'ingénieur qui ont été basculés du CIRAD-Réunion au CIRAD-Montpellier (accord DAR).

Tableau 4 : Moyens humains (en homme/mois) mis en œuvre dans le projet AgriDrone.

AB : Agnès Bégué (Dr CIRAD)
 PD : Pascal Degenne (Ingénieur CIRAD)
 SD : Stéphane Dupuy (Technicien, CIRAD)
 VL : Valentine Lebourgeois (Ingénieur CIRAD)
 MH : Marion Houles (VCAT, CIRAD)
 JFM : Jean-François Martiné (Dr CIRAD)
 CH : Charles Hoarau (Technicien CIRAD, Réunion)
 EH : Emmanuel Hoarau (Technicien CIRAD, Réunion)
 SL : Sylvain Labbé (Ingénieur Cemagref)
 BR : Bruno Roux (Avion jaune)

Mission DAR

N° du projet : Conv 05 AAP 331

Titre du projet :

AGRIDRONE : Utilisation de capteurs embarqués sur drone pour caractériser l'état hydrique et nutritif des cultures ; application à la canne à sucre sur le site pilote de l'île de La Réunion

COMPTE RENDU FINAL DU PROJET (ANNEXES)

Organisme chef de file : CIRAD

Nom et organisme du chef de projet : Agnès BEGUE (CIRAD, UMR TETIS)



Co-auteurs :

Valentine Lebourgeois (CIRAD), Marion Houlés (CIRAD), Pascal Degenne (CIRAD), Sylvain Labbé (Cemagref), Stéphane Dupuy (CIRAD), Bruno Roux (Avion Jaune)

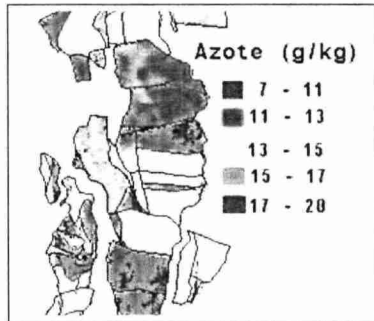
Annexes

Annexe 1 : Questionnaire sur l'analyse des besoins.....	37
Annexe 2 : L'expérimentation de La Mare 2006-2007	38
Annexe 3 : Bilan de campagne de mesures aéroportées 2006-2007	40
Annexe 4 : Matériel de communication	42
Annexe 5 : Séminaire final.....	43
Annexe 6 : Plaquette de l'offre de service	46
Annexe 7 : Papiers et communications	47

Annexe 1 : Questionnaire sur l'analyse des besoins

FERTILISATION : Les nouveaux outils...

Nous allons maintenant vous demander de juger de l'utilité et de la pertinence des différentes cartes que nous pouvons vous proposer en matière de conseil à la fertilisation.



Carte de teneur en azote des feuilles

Explications.....
.....
.....
.....



Carte contrôle azotée avant 2 em fraction

Explications.....
.....
.....
.....

15. Votre intérêt pour cette carte :

- Peu intéressant Assez intéressant Très intéressant

16. En quoi cette carte pourrait-elle vous aider ?

17. Seriez-vous prêts à vous baser sur ce type de cartes pour déterminer la dose ou formule d'engrais à appliquer à chaque parcelle ?

- Oui, si l'on me forme à l'utilisation de cette carte
 Oui, avec l'aide d'un technicien
 Non je ne pense pas

Période de diffusion ?

18. Votre intérêt pour cette carte :

- Peu intéressant Assez intéressant Très intéressant

19. En quoi cette carte pourrait-elle vous aider ?

20. Modification des pratiques selon carte ?

IRRIGATION : Vos pratiques... (Répondez à cette partie uniquement si vous pratiquez l'irrigation)

21. Comment déterminez-vous le début du sevrage ? (1 seule réponse SVP)

- Je ne réalise pas de sevrage
 Suivant la tradition : j'ai toujours sevré au même moment
 Suivant les conseils du technicien
 Suivant l'historique
 Autre Précisez : ...

22. Comment déterminez-vous les fréquences d'arrosage ? (1 seule réponse SVP)

- Suivant la tradition : j'irrigue de la même façon et au même moment chaque année
 Suivant les conseils du technicien
 Suivant l'historique
 Autre Précisez : ...

23. Pratiquez-vous une irrigation différente (fréquence d'arrosage, quantité d'eau, date de sevrage ...) suivant les parcelles ?

- Non, j'irrigue de la même façon sur toutes mes parcelles
 Oui, je tiens compte des spécificités de chaque parcelle

21.a. Si oui, comment déterminez-vous la fréquence d'arrosage, les quantités d'eau ou la date de sevrage pour chaque parcelle ?

24. Pratiquez-vous une irrigation différente (fréquence d'arrosage, quantité d'eau, date de sevrage ...) à l'intérieur d'une même parcelle ?

- Non, j'irrigue de la même façon sur tous les secteurs d'une parcelle
 Oui, je tiens compte des spécificités de chaque secteur d'une parcelle

21.a. Si oui, comment déterminez-vous la fréquence d'arrosage, les quantités d'eau ou la date de sevrage pour chaque secteur ?



Des nouveaux outils pour la gestion de la canne

Introduction au questionnaire : agriculture de précision, projet agridrone, objectifs du questionnaire etc...

+ Schéma explicatif acquisition, traitements, diffusion... A FINIR



Vous et votre exploitation

1. Dans quelle tranche d'âge vous situez-vous ?

- Moins de 25 ans De 25 à 45 ans
 De 46 à 60 ans Plus de 60 ans

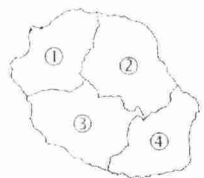
2. Quel est votre statut ?

- Propriétaire Fermier
 Colon Autre

3. Quel tonnage de canne avez-vous livré en 2005 ?

- Moins de 300 tonnes Entre 300 et 700 tonnes
 Entre 700 et 1500 tonnes Plus de 1500 tonnes

4. Ou est située votre exploitation? (Cochez le numéro de la zone sur la et la case correspondante à la situation géographique)



- Haut
 Intermédiaire
 Bas

5. Quelle est la surface totale de votre exploitation ? (1 seule réponse SVP)

- Moins de 3 hectares Entre 3 et 6 hectares
 Entre 7 et 18 hectares Plus de 18 hectares

6. Quelle est la surface plantée en canne? (1 seule réponse SVP)

- Moins de 3 hectares Entre 3 et 6 hectares
 Entre 7 et 18 hectares Plus de 18 hectares

7. De combien de parcelles est composée votre exploitation?

Ecrivez votre réponse ici :

8. Votre exploitation bénéficie-t-elle de l'irrigation? (1 seule réponse SVP)

- Oui Non

FERTILISATION : Vos pratiques...

9. Comment contrôlez-vous la nutrition de la culture pendant la croissance ?

- A partir des analyses de sols
 A partir du diagnostic foliaire
 Par observation visuelle (jaunissement, rabougrissement, manque de vigueur etc...)
 Vous ne contrôlez pas l'état nutritif
 Autre Précisez : ...

10. Si des carences et des déséquilibres ont été constatés, corrigez-vous votre fertilisation ?

- Je corrige l'année même si le diagnostic a été précoce (avant 5 mois)
 Je corrige en cours de culture car je dispose d'un système de fertigation
 Je corrige à la repousse suivante
 Je corrige si mes finances me le permettent
 Autre Précisez : ...

11. D'une année sur l'autre et pour une même parcelle, changez-vous la dose ou la formule d'engrais ? (1 seule réponse SVP)

- Oui Non

9.a. Si oui, comment déterminez-vous la dose ou formule à appliquer? (1 ou plusieurs réponses)

- Suivant les conseils des techniciens
 Suivant l'historique de rendement de la parcelle
 Suivant les analyses de sols du CIRAD
 Suivant vos finances
 Autre Précisez : ...

9.a. Si non, pourquoi ?

12. Appliquez-vous des formules ou des doses d'engrais différentes suivant les parcelles ? (1 seule réponse SVP)

- Oui Non

10.a. Si oui, comment déterminez-vous la dose à appliquer pour chaque parcelle ? (1 ou plusieurs réponses)

- Suivant les conseils des techniciens
 Suivant la tradition : vous avez toujours mis telle dose à cette parcelle et telle dose à celle là
 Suivant les analyses de sols du CIRAD
 Suivant les caractéristiques de chaque parcelle (age, localisation, historique de rendement etc...)
 Autre Précisez : ...

10.b. Si non, pourquoi ?

- Vous n'avez qu'une seule parcelle
 Vous ne jugez pas utile d'appliquer des doses ou des formules différentes à chaque parcelle
 Vous manquez d'information pour connaître les doses ou formules à appliquer à chacune de vos parcelles
 Par tradition : vous avez toujours mis la même dose ou formule à toutes vos parcelles
 Autre Précisez : ...

13. Appliquez-vous des formules ou des doses d'engrais différentes à l'intérieur d'une même parcelle ? (1 seule réponse SVP)

- Oui Non

11.a. Si oui, comment déterminez-vous la dose à appliquer à chaque secteur de votre parcelle ? (1 ou plusieurs réponses)

- Suivant les conseils des techniciens
 Suivant la tradition : vous avez toujours mis telle dose à ce secteur et tel dose à celui là
 Suivant les analyses de sols du CIRAD
 Suivant les caractéristiques de chaque parcelle (age, localisation, historique de rendement, variété etc...)
 Autre Précisez : ...

11.b. Si non, pourquoi ?

- Vous ne jugez pas utile d'appliquer des doses ou des formules différentes à l'intérieur d'une même parcelle
 Vous manquez d'information pour connaître les doses ou formules à appliquer à chacun des secteurs
 Par tradition : vous avez toujours mis la même dose ou formule à l'intérieur d'une même parcelle
 Autre Précisez : ...

14. Fractionnez-vous les apports d'azote / de potasse ?

- Oui Non

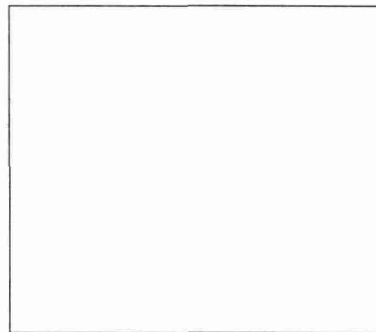
IRRIGATION : Les nouveaux outils...

Nous allons maintenant vous demander de juger de l'utilité et de la pertinence des différentes cartes que nous pouvons vous proposer en matière de conseil à l'irrigation.



Etat hydrique du couvert

Explications.....
.....
.....



Carte de conseil au sevrage

Explications.....
.....
.....

25. Votre intérêt pour cette carte :
 Peu intéressant Assez intéressant Très intéressant

26. En quoi cette carte pourrait-elle vous aider ?

27. Modification des pratiques selon carte ?

28. Votre intérêt pour cette carte :
 Peu intéressant Assez intéressant Très intéressant

29. En quoi cette carte pourrait-elle vous aider ?

30. Modification des pratiques selon carte ?

ETAT SANITAIRE (nuisibles, manquants, enherbement...) : Vos pratiques...

31. Comment contrôlez-vous l'état sanitaire de vos parcelles (attaques de borer, de yellow spot...)? (1 seule réponse SVP)

- Je ne contrôle pas
- Je réalise des observations sur les parcelles
- C'est le technicien qui me tient informé
- Autre Précisez : ...

32. Comment contrôlez-vous l'état d'enherbement de vos parcelles ? (1 seule réponse SVP)

- Je ne contrôle pas
- Je réalise des observations sur les parcelles
- C'est le technicien qui me tient informé
- Autre Précisez : ...

33. comment repérez vous les manquants dans votre parcelle ? (1 seule réponse SVP)

34. Etat général

35. Dégats provoqués par catastrophe naturelle

ETAT SANITAIRE (maladie, enherbement...) : Les nouveaux outils...

Nous allons maintenant vous demander de juger de l'utilité et de la pertinence des différentes cartes que nous pouvons vous proposer en matière de conseil à la fertilisation.



Carte de l'état d'enherbement

Explications.....
.....
.....
.....

Carte d'étendue des dégâts provoqués par parasites

Explications.....
.....
.....
.....

36. Votre intérêt pour cette carte :
 Peu intéressant Assez intéressant Très intéressant

37. En quoi cette carte pourrait-elle vous aider ?

38. Modification des pratiques selon carte ?

39. Votre intérêt pour cette carte :
 Peu intéressant Assez intéressant Très intéressant

40. En quoi cette carte pourrait-elle vous aider ?

41. Modification des pratiques selon carte ?

Rendements, richesse en sucre, récolte : Vos pratiques...

42. Comment estimez-vous le rendement de chaque parcelle ? (1 seule réponse SVP)

- Je ne contrôle pas
- Je réalise des observations sur les parcelles
- C'est le technicien qui me tient informé
- Autre Précisez : ...

43. Comment estimez-vous la richesse en sucre ? (1 seule réponse SVP)

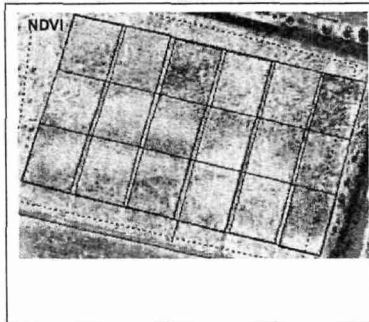
- Je ne contrôle pas
- Je réalise des observations sur les parcelles
- C'est le technicien qui me tient informé
- Autre Précisez : ...

44. Comment déterminez-vous votre plan de coupe ? (1 seule réponse SVP)

- Je ne contrôle pas
- Je réalise des observations sur les parcelles
- C'est le technicien qui me tient informé
- Autre Précisez : ...

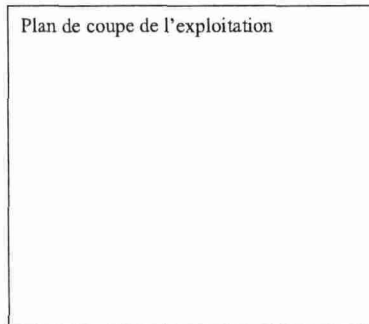
Rendements, richesse en sucre, récolte : Les nouveaux outils...

Nous allons maintenant vous demander de juger de l'utilité et de la pertinence des différentes cartes que nous pouvons vous proposer en matière de conseil à la fertilisation.



Carte d'estimation des rendements

Explications.....
.....
.....



Explications.....
.....
.....

45. Votre intérêt pour cette carte :
 Peu intéressant Assez intéressant Très intéressant

46. En quoi cette carte pourrait-elle vous aider ?

47. Modification des pratiques selon carte ?

48. Votre intérêt pour cette carte :
 Peu intéressant Assez intéressant Très intéressant

49. En quoi cette carte pourrait-elle vous aider ?

50. Modification des pratiques selon carte ?

Etat général de la plantation : Vos pratiques...

51. comment repérez vous les manquants dans votre parcelle ? (1 seule réponse SVP)

52. Etat général

53. Dégâts provoqués par catastrophe naturelle

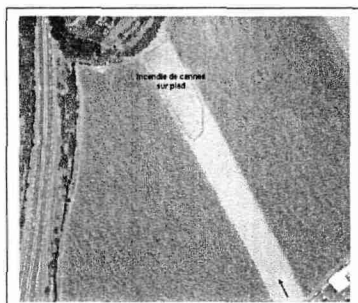
Etat général de la plantation : Les nouveaux outils...

Nous allons maintenant vous demander de juger de l'utilité et de la pertinence des différentes cartes que nous pouvons vous proposer en matière de conseil à la fertilisation.



Carte d'identification des manquants

Explications.....
.....
.....
.....



Carte étendue incendie

Explications.....
.....
.....
.....

54. Votre intérêt pour cette carte :
 Peu intéressant Assez intéressant Très intéressant

55. En quoi cette carte pourrait-elle vous aider ?

56. Modification des pratiques selon carte ?

57. Votre intérêt pour cette carte :
 Peu intéressant Assez intéressant Très intéressant

58. En quoi cette carte pourrait-elle vous aider ?

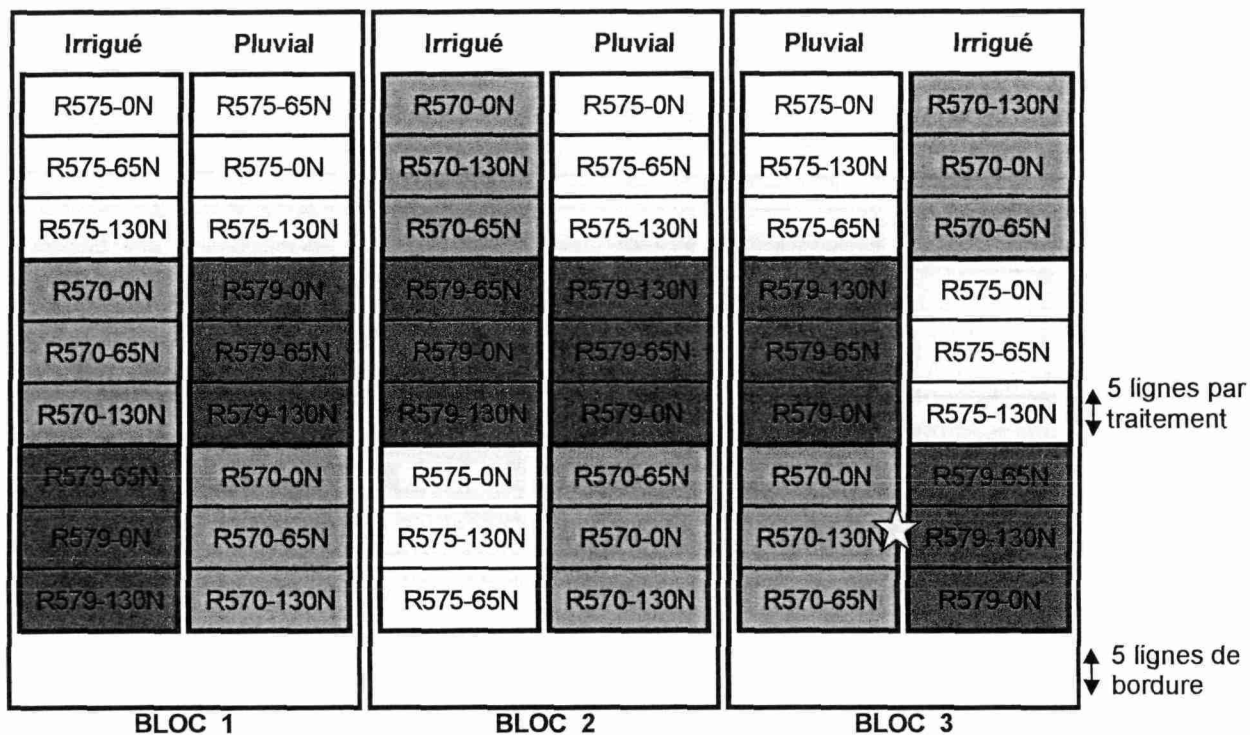
59. Modification des pratiques selon carte ?

Si personne intéressée par entretien individuel :

FORMULAIRE DE CONTACT

Annexe 2 : L'expérimentation de La Mare 2006-2007

Plan de la parcelle expérimentale de La Mare



☆ Centrale d'acquisition (Humidité, Température de l'air)

Bilan campagnes mesures biologiques sur parcelle expérimentale (2006 et 2007)

Campagnes de mesures biologiques 2006-2007 sur la parcelle expérimentale de La Mare

Nombres de placettes mesurées : 36 (12 traitements x 3 répétitions)

2 variétés : R579 / R570

2 régimes hydriques (pluvial/irrigué)

3 doses azote (0N/65N/130N)

2006

AVRIL

S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

JUIN

J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

JUILLET

S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31

2007

AVRIL

D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

MAI

M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31

JUIN

V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

JUILLET

D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31

AOÛT

M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31

SEPTEMBRE

S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30

Nb de tiges

(nb de tiges sur 10m, sur les 3 rangs centraux)

Hauteur des tiges + nb limbes verts

mesure htvd sur 10 m, sur 3 rangs centraux, sur 4 cannes par rang

SPAD

(moyenne 6 mesures sur 30 feuilles)

Vois ULM + Mesures simultanées de Ts sol au KT19

Test

(htvd+nb limbes verts sur 3m linéaire, rang central)

Rendement (poids frais)

(sur 10m, rang central)

Brix + humidité des gaines

(5 gaines et 5 points brix sur 4 cannes)

N, P, K, Ca, Mg

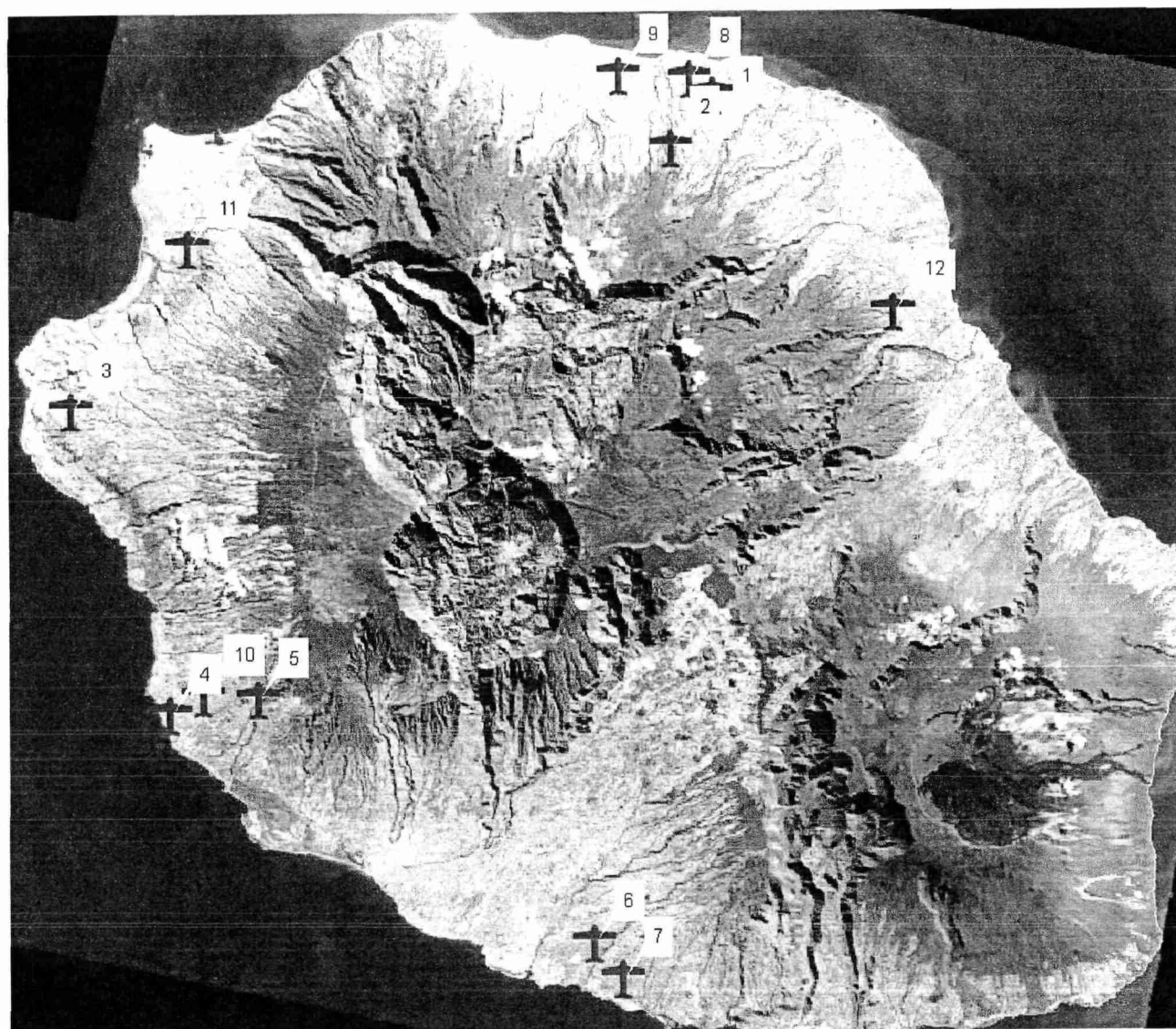
(3 premières feuilles de 8 cannes)

Nb de tiges : comptage du nb de tiges sur 10m, sur les 3 rangs centraux de chaque placette

Hauteur des tiges + nb limbes verts : mesure de htvd sur 10 m, sur les 3rangs centraux, sur 4 cannes par rang

Annexe 3 : Bilan de campagne de mesures aéroportées 2006-2007

Localisation des vols

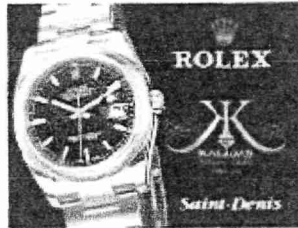


Bilan des campagnes de mesures

Numéro de la zone	Coordonnées (UTM)		Nom de la zone	date	nombre d'images	Altitude (m)	appareil	qualité	Capteur utilisé		
	X	Y							Visible	RE	PIR
1	352 326	7 686 789	Caruel	19/04/2006	26		Canon EOS 350		X	X	X
3	317 533	7 669 701	Antenne 4 (parcelle R Pirot)	19/04/2006	13		Canon EOS 350	nuageuses	X	X	X
8	351 122	7 687 710	Hannibal (sainte Marie)	19/04/2006	5		Canon EOS 350		X	X	X
8	351 122	7 687 710	Martin (sainte Marie)	19/04/2006	3		Canon EOS 350		X	X	X
1	352 326	7 686 789	Caruel	24/04/2006	77		Canon EOS 350	nuageuses	X	X	X
1	352 326	7 686 789	Caruel	26/06/2006	21		Canon EOS 350		X	X	
3	317 533	7 669 701	Antenne 4 (Essai E.Fillols)	26/06/2006	8		Canon EOS 350		X	X	
3	317 533	7 669 701	Antenne 4 (parcelle R Pirot)	26/06/2006	1		Canon EOS 350		X	X	
6	345 768	7 640 505	Bassin Plat (près Tirano)	26/06/2006	9		Canon EOS 350	très nuageuses	X	X	
8	351 122	7 687 710	Hannibal (sainte Marie)	26/06/2006	3		Canon EOS 350		X	X	
1	352 326	7 686 789	Caruel	19/07/2006	34		Canon EOS 350		X	X	X
9	347 169	7 687 862	Sainte Marie / La Marre	19/07/2006	4		Canon EOS 350		X	X	X
9	347 169	7 687 862	Essais CERF (La Mare - Sainte Marie)	19/07/2006	2		Canon EOS 350		X	X	X
4	322 816	7 653 056	Pointe au Sel (Bas de Saint Leu)	06/10/2006	10		Canon EOS 350		X	X	X
5	327 549	7 653 892	Plate Saint Leu (Essai C.Poser)	06/10/2006	2		Canon EOS 350		X	X	X
10	324 589	7 654 069	Hauts de Saint Leu	06/10/2006	6		Canon EOS 350		X	X	X
10	324 589	7 654 069	Hauts de Saint Leu	06/10/2006	16		Canon EOS 350	nuageuses	X	X	X
11	323 828	7 678 528	Savanna (Saint-Paul)	06/10/2006	11		Canon EOS 350		X	X	X
3	317 533	7 669 701	Antenne 4 (parcelles R.Pirot)	12/10/2006	6		Canon EOS 350		X	X	X
10	324 589	7 654 069	Silotia (Hauts de Saint Leu)	12/10/2006	9		Canon EOS 350		X	X	X
1	352 326	7 686 789	Caruel	20/10/2006	55		Canon EOS 350		X	X	X
2	352 326	7 686 789	Barau	20/10/2006	54		Canon EOS 350		X	X	X
4	322 816	7 653 056	Antenne 8	03/11/2006	73		Canon EOS 350		X	X	X
1	352 326	7 686 789	Caruel	09/05/2007	10	850	Canon EOS 400		X	X	X
2	352 326	7 686 789	Barau	09/05/2007	2	900	Canon EOS 400		X	X	X
9	347 169	7 687 862	CERF	09/05/2007	14	900	Canon EOS 400		X	X	X
1	352 326	7 686 789	Caruel	08/06/2007	36	850	Canon EOS 400		X	X	X
2	352 326	7 686 789	Barau	08/06/2007	17	900	Canon EOS 400		X	X	X
3	317 533	7 669 701	Antenne 4	22/06/2007	27	600	Canon EOS 400		X	X	X
5	327 549	7 653 892	Le plate (parcelle Christophe Poser)	22/06/2007	2	720	Canon EOS 400		X	X	X
3	317 533	7 669 701	Antenne 4	26/06/2007	76		Canon EOS 400		X	X	X
3	317 533	7 669 701	Antenne 4	28/06/2007	36		Canon EOS 400		X	X	X
3	317 533	7 669 701	Antenne 8	28/06/2007	8		Canon EOS 400		X	X	X
7	347 297	7 638 540	Grand Bois	29/06/2007	62	2400	Canon EOS 400		X	X	X
12	362 050	7 674 927	Est : parcelles chambre agriculture	23/07/2007	64	2600	Canon EOS 400		X	X	X
6	345 768	7 640 505	Bassin Plat (près Tirano)	13/08/2007	22	1100	Canon EOS 400		X	X	X

Annexe 4 : Matériel de communication

Première page du quotidien régional « Le Quotidien » de La Réunion et de l'Océan Indien daté du 12 juin 2008 + Posters présentés lors des colloques CAP2025 (juillet 2007) et CANNE08 + Plaque présentée au Salon de l'Agriculture à Paris en 2008.



Le Quotidien

www.lesquotidiens.fr

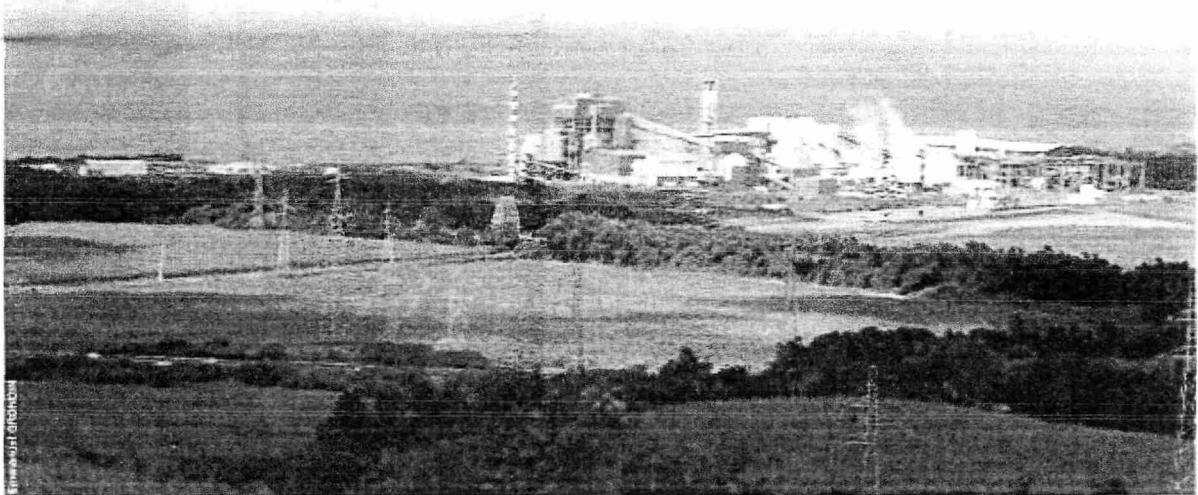
DE LA REUNION ET DE L'OCEAN INDIEN

jeudi 12 juin 2008 - N° 10 104 - 32^e année - Prix : 1 €

La canne vue du ciel

Agridrone. C'est le drôle de nom d'un outil d'aide à la gestion de la production de la canne basé sur la télédétection pour suivre l'état hydrique, nutritionnel, sanitaire d'une parcelle. La thèse menée à Montpellier devrait déboucher sur des applications concrètes dans dix-huit mois.

9



ELEVAGE FILIERE LAIT

L'audit qui fâche

11

TELEVISION

Bientôt un seul bouquet satellite

18

CINEMA

Voyage au cœur d'une boutique

14

Du 9 juin au 5 juillet

2^e PNEU OFFERT

ou le 2^e pneu à -50% sur la gamme MICHELIN

MICHELIN

3 ANS ou 50 000 km SÉRIENNE GARANTIE

REP

L'Expert du Pneu

LA TELEDETECTION AU SERVICE DES PLANTEURS

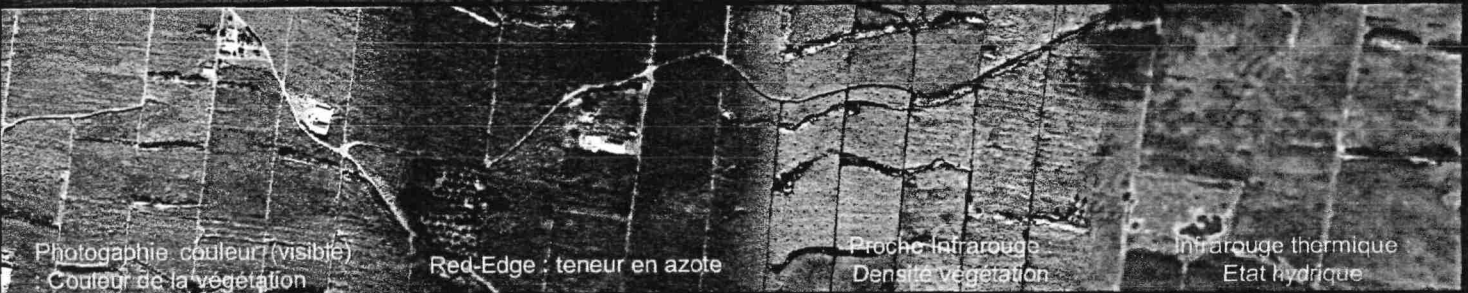
Le projet de recherche AGRIDRONE, financé par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, a pour objectif le développement d'une future offre de service destinée à la filière, basée sur la diffusion de cartes d'état des cultures pour une optimisation des interventions culturales.



Acquisitions d'images aériennes et de vérité terrain

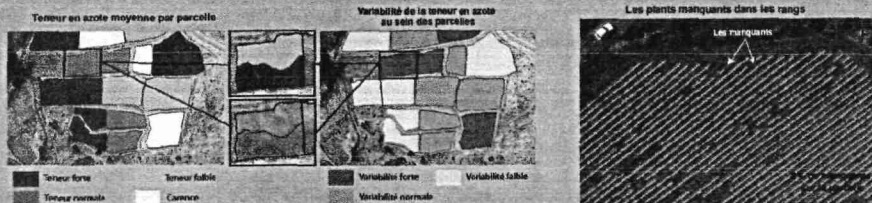


Du visible à l'invisible, des informations différentes suivant la longueur d'onde



Interprétation des images et production de cartes d'indicateurs agronomiques

A l'échelle de l'exploitation... ... et de la parcelle



En fin de projet (2008), l'offre de service technique et financière portera sur :

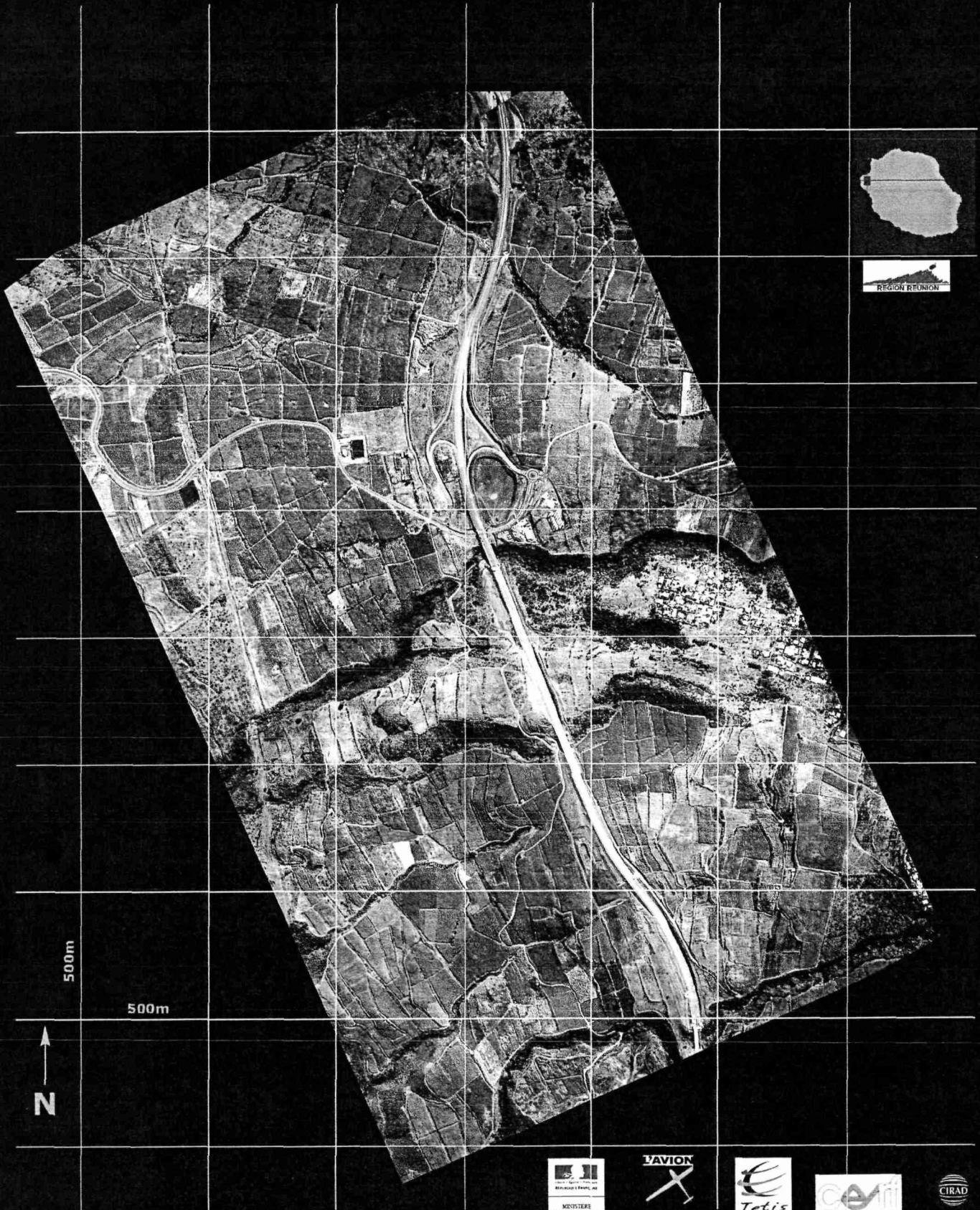
- Un catalogue des produits cartographiques élaborés en concertation avec la filière
- Un outil de diffusion et de manipulation des cartes numériques (prototype développé avec des logiciels libres)
- Du matériel pédagogique pour les lycées et les services techniques.



Périmètre irrigué d'antenne 4



Prise de vue par ULM du 28 juin 2007, assemblage de quatre vues en couleurs naturelles.

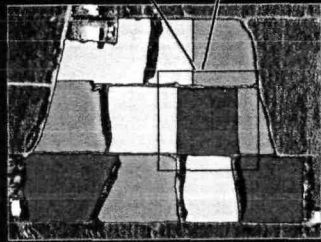
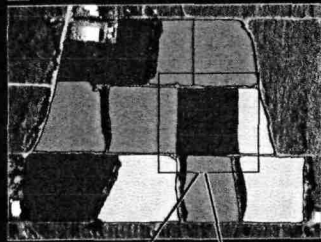


AGRIDRONE : VOTRE EXPLOITATION VUE DU CIEL



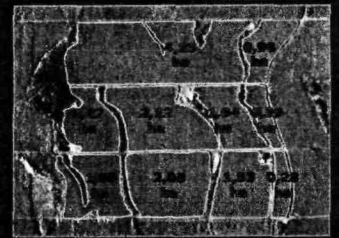
Cartographie de l'état azoté des parcelles

- Teneur forte
- Teneur faible
- Carence



- Homogène
- Faible hétérogénéité
- Forte hétérogénéité

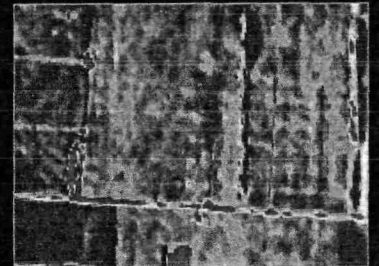
Numérisation du contour des parcelles et calcul de la surface plantée en canne



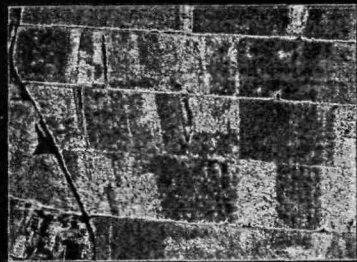
Identification des zones présentant un défaut d'irrigation

20 21 22 T (°C)

STRESS HYDRIQUE



Cartographie du développement végétatif



Indice de végétation (NDVI)

Identification de problèmes phytosanitaires



Champs de canne à Grand-Bois - Mosaïque d'Images Proche Infrarouge, 29 juin 2007

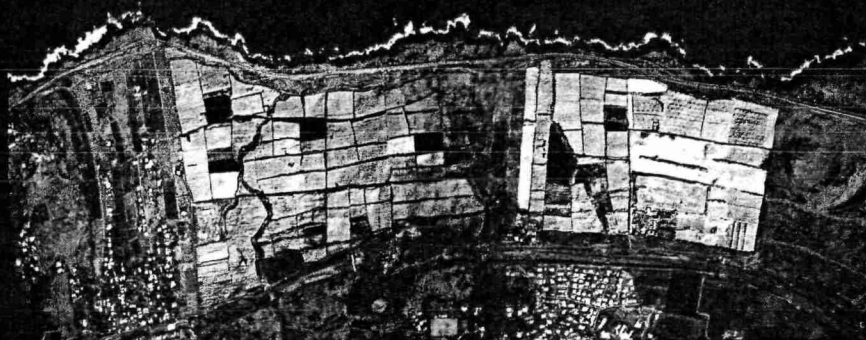


Zone de production de la Pointe au sel

Prise de vues multispectrale par ULM du 28 juin 2007, assemblage de trois vues.



Couleurs naturelles (rouge, vert, bleu)



Proche Infrarouge



Fausse couleurs (rouge, vert, proche infrarouge)



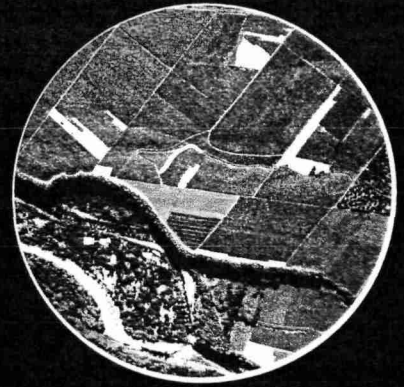
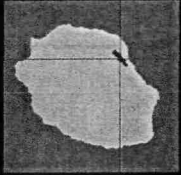
Infrarouge thermique



Bras-Panon



Prise de vue par ULM du 23 juillet 2007, assemblage de 35 photos



Ortho-photo en couleurs naturelles

Sol nu Couvert dense

Indice de végétation calculé à partir des canaux rouge et proche infra rouge (résolution de 1 mètre)

4 m 230 m

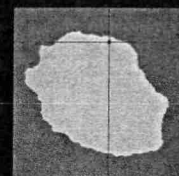
Modèle Numérique de Terrain calculé à partir des photos (résolution de 5 mètres)



Sainte Suzanne



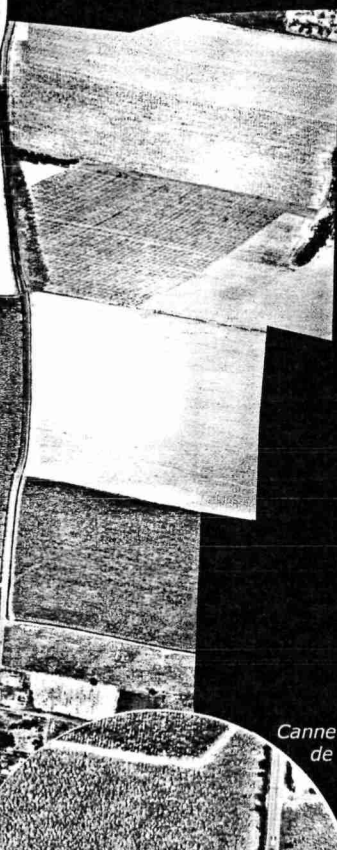
Mosaïques de photos acquises par ULM à deux dates différentes



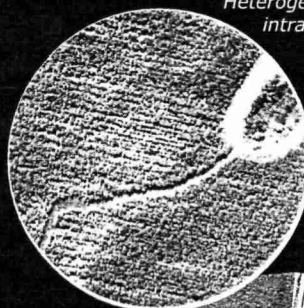
Hétérogénéité
intra-parcellaire



Ortho-photo
du **20 octobre 2006**
(résolution 13 centimètres)



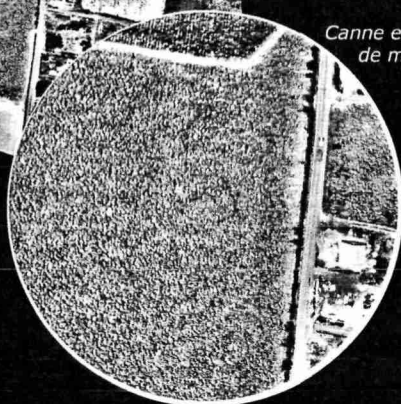
Hétérogénéité
intra-parcellaire



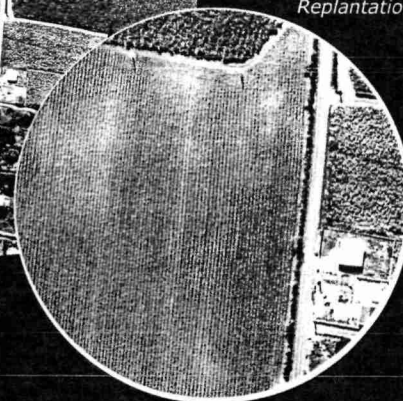
Ortho-photo
du **8 juin 2007**
(résolution 20 centimètres)



Canne en cours
de maturation



Replantation



Gestion spatialisée de la production cannière

Utiliser la télédétection de la parcelle à la région

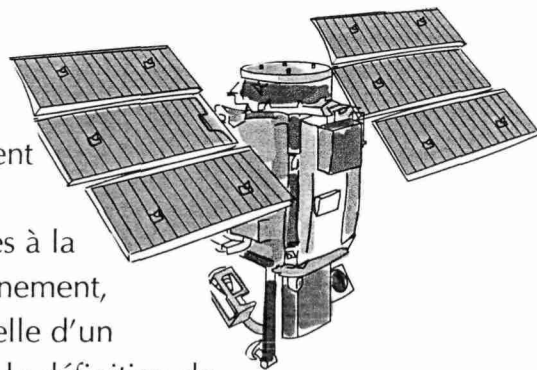
L'

information spatialisée tient

une place déterminante dans toutes les prises de décision liées à la production agricole et à l'environnement, depuis la prise de décision individuelle d'un agriculteur sur son exploitation jusqu'à la définition de

stratégies globales des filières agricoles ou des régions. L'acquisition d'images par capteurs embarqués satellitaires ou sur systèmes légers (ULM, drone) et leur

interprétation « agronomique » sous forme de cartes d'indicateurs pertinents pour les professionnels de la filière constituent un enjeu fort pour l'aide à la gestion de la production cannière.



Une vision exhaustive de l'état des plantations

Les experts du Cirad sont disponibles pour :

- Aider à définir les besoins des utilisateurs en informations spatialisées.
- Proposer des solutions en fonction de la zone d'étude et du budget disponible.
- Commander les images satellite et fournir les cartes d'indicateurs.
- Organiser une campagne aéroportée et traiter les images.
- Organiser des formations à partir de logiciels commerciaux ou libres.

Les bénéfices de la télédétection

L'utilisation d'images aérospatiales permet un diagnostic rapide et fiable de l'état de la culture, une gestion facilitée de la campagne de récolte et une meilleure anticipation des rendements.

L'information spatialisée extraite des images Spot ou des photographies aériennes est objective, précise, spatialement exhaustive, en temps quasi-réel et économique par rapport aux métho-

des de terrain (moins de un euro par hectare). Cette information est diffusée et traitée à l'aide d'outils libres et adaptés à des utilisateurs non spécialistes du traitement de l'information géographique.

Pour en savoir plus

Agnès Bégue
Cirad

UMR Territoires, environne-
ment, télédétection
et information spatiale

Maison de la télédétection
TA C-91 / MTD

34398 Montpellier Cedex 5
France
agnes.begue@cirad.fr

Pierre Todoroff
Cirad

UR Systèmes Canners
7 chemin de l'Irat
97410 Saint-Pierre
Réunion
pierre.todoroff@cirad.fr

Cartographie 3D de la dynamique de récolte de la canne
au 26 octobre à la Réunion (V. Lebourgeois) sur fond
d'image Spot. © Cnes, Distribution Spot image

Acquisition d'images dans l'infrarouge thermique par ULM. La température de surface augmente du bleu vers le rouge. © V. Lebourgeois et B. Roux.

Les deux grands types d'information spatialisée

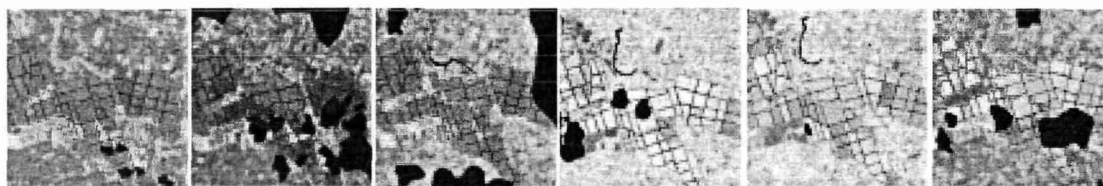
- Des informations sur les surfaces, par l'identification des limites du parcellaire culturel sur des images à résolution métrique.
- Des informations sur l'état des cultures, par analyse de la variabilité spatio-temporelle de la vigueur des cultures.

La cartographie, outil de gestion des plantations pour l'ensemble de la filière

L'information agronomique issue des images de télédétection aide les planteurs de canne à sucre à :

- Détecter les anomalies de croissance à l'échelle de la parcelle : les images aériennes et satellitaires permettent une meilleure gestion culturale par la détection précoce de l'enherbement ou des plants manquants en début de culture, le repérage d'anomalies de croissance et de stress hydrique en fin de croissance, et le suivi de la maturation.

Octobre 2002 Décembre 2002 Janvier 2003 Mars 2003 Mai 2003 Juillet 2003



Cartographie évolutive de la vigueur de parcelles de canne à sucre en Guadeloupe produite à partir d'images Spot. © A. Bégué

- Piloter l'irrigation : la température de surface d'un couvert végétal est fortement corrélée à l'état hydrique des cultures. Sa cartographie à partir de vecteurs aéroportés est utilisée pour localiser des zones présentant un stress hydrique. Cette information spatiale peut être un élément important du conseil aux agriculteurs pour la position des systèmes d'irrigation ou le zonage des apports d'eau.

L'information régionale issue des images de télédétection est utilisée par les usiniers et les organismes techniques pour :

- Réaliser un zonage des bassins de production : l'analyse spatiale de la vigueur des cultures permet d'établir des zonages à différentes échelles, de la typologie des exploitations à la définition de campagnes d'échantillonnage de terrain.
- Suivre la récolte et les replantations : l'utilisation des séries d'images satellite mensuelles permet de détecter les principales interventions culturales telles que les coupes ou les labours. Ce suivi spatio-temporel est utilisé pour l'organisation de la récolte, le calcul des rendements, la quantification des replantations ou des surfaces de cannes restant sur pied.
- Estimer la quantité et la qualité de la production : quantifiée de façon ponctuelle avant la campagne de récolte, la vigueur de la canne est un bon indicateur de la production potentielle de la culture. Cette estimation précoce est un élément important pour organiser la récolte et planifier les flux financiers. Le dessèchement de la canne, également suivi par télédétection, peut être utilisé comme un indicateur qualitatif de la richesse en sucres.



Mesures de terrain avec un pistolet infrarouge thermique, faites en synchronisation avec les acquisitions ULM. B. Roux © L'Avion jaune

Partenaires...

- Avion jaune, France
- Cerf (Centre d'essai de recherche et de formation), Réunion
- Cnes (Centre national des études spatiales), France
- Msiri (Mauritius Sugar Industry Research Institute), Maurice
- Spot Image, France



Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
www.cirad.fr

Annexe 5 : Séminaire final

- Plaquette annonce Atelier Régional « Canne08 » (version française)
- Programme détaillé de l'atelier régional
- Liste des inscrits.

Contacts au CIRAD

Marion Houlès
Station de la Bretagne
Ch. Grand Canal
BP 20
97408 Saint-Denis Messagerie Cedex 9
Ile de La Réunion
Tél. : +262 2 62 52 80 26
Fax : +262 2 62 52 80 11
Email : marion.houles@cirad.fr

Inscriptions

Vous pouvez demander le bulletin d'inscription à Marion Houlès (contact ci-dessus) ou bien le télécharger à l'adresse suivante : <http://canne2008.teledetection.fr>, rubrique "Inscriptions".

Le bulletin est à renvoyer, avant le 04 Avril 2008, par télécopie ou par email (contact ci-dessus).

Comité d'organisation

Agnès Bégué (CIRAD)
Christophe Gossard (CA)
Marion Houles (CIRAD)
Sylvain Labbé (Cemagref)
Christine Lebon (SFSR)
Valentine Lebourgeois (CIRAD)

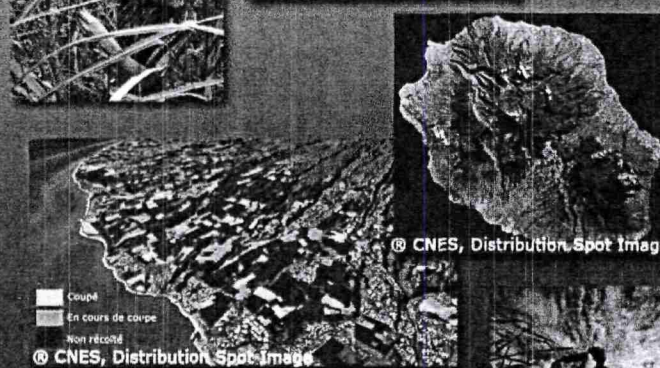
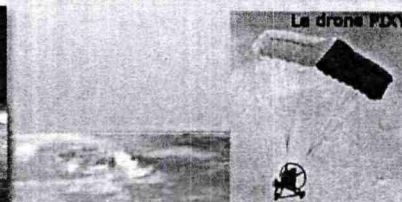
Pascal Marnotte (CIRAD)
Christophe Poser (CIRAD)
Bernard Siegmund (CERF)
Pierre Tessier (CR)
Pierre Todoroff (CIRAD)
Nicolas Villeneuve (IRD - Université)

Informations pratiques

L'atelier se déroulera à La Réunion, au museum Stella Matutina à St Leu.

Les assemblées plénières (le matin) auront lieu dans l'amphithéâtre et les ateliers (après-midi) dans les salles de réunion et les espaces ouverts.

Retrouver toutes les informations relatives à cet atelier sur : <http://canne2008.teledetection.fr>



ATELIER RÉGIONAL "Télédétection & canne à sucre"

Quels services pour les professionnels ?
Quels enjeux pour la recherche ?

15 et 16 Avril 2008

Museum Stella Matutina
St Leu, Ile de La Réunion



LA TÉLÉDÉTECTION

pour la gestion de la canne à sucre

ATELIER RÉGIONAL

"Télé-détection et canne à sucre"

PROGRAMME

L'information spatialisée tient une place déterminante dans toutes les prises de décision liées à la production agricole et à l'environnement, depuis la prise de décision individuelle d'un agriculteur sur son exploitation, jusqu'à la définition de stratégies globales des filières agricoles ou des régions.

L'acquisition d'images par capteurs embarqués satellitaires ou sur systèmes légers (ULM, drone) et leur interprétation « agronomique » sous forme de cartes d'indicateurs pertinents pour les professionnels de la filière constituent un enjeu fort pour l'aide à la gestion de la production cannière.

Quels services pour les professionnels ?

Quels enjeux pour la recherche ?

Cet atelier régional a pour double objectif la **présentation des travaux** réalisés depuis 5 ans dans le domaine de la télédétection pour la gestion de la production cannière et **l'expression des besoins en terme de services**, actuels et futurs, des professionnels de la canne.

Le séminaire fera le point sur l'avancement des produits « surfaces cannières » et « état des cultures » (cartographie dynamique des coupes et des replantations, détection des anomalies de croissance, estimation des rendements) ...

... et sur les systèmes d'acquisition des données et de diffusion de l'information qui leurs sont associés.

Mardi 15 avril

► Matin (9h - 12h) :

De la photographie aérienne à la carte ; des outils de précision pour la gestion des exploitations cannières

► Après-midi (14h - 16h30) :

Ateliers de démonstration et de manipulation : de l'acquisition des images à l'analyse des cartes

Mercredi 16 avril

► Matin (9h - 12h)* :

Des images satellites pour le suivi de la canne à l'échelle du bassin de production

► Après-midi (14h - 16h30)* :

Ateliers de démonstration et de manipulation : de l'acquisition des images à l'analyse des cartes

** Les ateliers proposés le mardi et mercredi après-midi sont identiques*



Atelier « Télédétection et canne à sucre »

PROGRAMME PREVISIONNEL

Mardi 15 Avril : Des outils de précision pour la gestion parcellaire

8h30 - 9h00	Accueil des participants	
9h00 - 9h20	Exposé Introductif : <i>Présentation générale de l'atelier / organisation de la journée / outils agriculture de précision pour les grandes cultures (AGriDrone)</i>	Agnès Bégué (CIRAD-Montpellier)
9h20 - 9h40	Les besoins de la filière canne à sucre (exploitation) <i>Besoins en information spatiale et temporelle pour la gestion des exploitations</i>	
9h40 - 10h00	Les systèmes aéroportés d'acquisition des données : de la photographie à l'image géoréférencée <i>Présentation des vecteurs (drone/UML) et des capteurs (optiques et thermiques) + création d'ortho-images</i>	Bruno Roux (Avion Jaune)
10h00 - 10h20	Traitement des données : de l'image à la carte thématique <i>Corrections radiométriques, analyse visuelle, indices et extraction d'informations</i>	Sylvain Labbé (Cemagref)
10h20 - 10h45	Pause	
10h45 - 11h05	Produits de base et utilisation thématique : de la carte à l'interprétation agronomique <i>Mosaïques vraies couleurs, MNT, délimitation parcellaire, délimitation des anomalies de croissance, détection de stress hydrique</i>	Marion Houles (CIRAD-St Denis)
10h05 - 11h25	Recherches en cours <i>Diagnostic sur l'état nutritionnel et hydrique des cultures</i>	Valentine Lebourgeois (CIRAD-St Denis)
11h25 - 11h45	Utilisation actuelle et potentielle de la télédétection pour l'industrie sucrière à Maurice	Maryse Chung Tze Cheong (MSIRI - Maurice)
11h45 - 12h00	Débat	
12h00 - 14h00	Déjeuner	
14h00 - 16h30	Ateliers de démonstration et de manipulation : ATELIER 1 : Présentation du drone (vol de démonstration si la météo le permet) ATELIER 2 : Présentation des capteurs optiques et thermique. ATELIER 3 : Manipulation d'un logiciel simple de traitement d'images ATELIER 4 : Visualisation des images sous Google Earth + démonstration du software dédié LIMAGE	2 ateliers au choix (1h par atelier)



Atelier « Télédétection et canne à sucre »

PROGRAMME PREVISIONNEL

Mercredi 16 Avril : Des images satellite pour la gestion du bassin de production.

8h30 - 9h00	Accueil des participants	
9h00 - 9h20	Exposé Introductif : <i>Présentation générale de l'atelier / Organisation de la journée / Résumé des présentations du mardi / BD KALIDEOS & SUCRETTE</i>	Agnès Bégué (CIRAD-Montpellier)
9h20 - 9h40	Les besoins de la filière canne à sucre (bassin de production) <i>Besoins en information spatiale et temporelle pour la gestion cannière à l'échelle d'un bassin de production</i>	Bernard Deranchin (ex-CPC)
9h40 - 10h00	Produits de base et utilisation thématique <i>Mise à jour du parcellaire, cartographie des jachères, variabilité inter-parcellaire, suivi des coupes, suivi des labours, ...</i>	Aurore Bury (SFS - ex-CIRAD)
10h00 - 10h20	Recherches en cours <i>Estimation des rendements, images radar, systèmes expert</i>	Pierre Todoroff (CIRAD-St Pierre)
10h20 - 10h45	Pause	
10h45 - 11h05	Recherche en télédétection au SASRI <i>(South African Sugar Research Institute)</i>	Maurits Van Der Berg (SASRI - Afrique du Sud)
11h05 - 11h25	Programme d'installation d'une antenne de réception satellitaire haute résolution à La Réunion	Nicolas Villeneuve (IRD/Université)
11h25 - 11h45	Outils de diffusion et de manipulation des cartes <i>Présentation de LIMAGE et de Google Earth</i>	Pascal Degenne (CIRAD-Montpellier)
11h45 - 12h00	Débat	
12h00 - 14h00	Déjeuner	
14h00 - 16h30	Ateliers de démonstration et de manipulation : ATELIER 1 : Présentation du drone (vol de démonstration si la météo le permet) ATELIER 2 : Présentation des capteurs optiques et thermique. ATELIER 3 : Manipulation d'un logiciel simple de traitement d'images ATELIER 4 : Visualisation des images sous Google Earth + démonstration du software dédié LIMAGE	2 ateliers au choix (1h par atelier)

Nom	Prénom	Compagnie	15/04/08 AM	Repas	15/04/08 PM	16/04/08 AM	Repas	16/04/08 PM
Augusseau	Xavier	CIRAD - St Denis				Oui	Oui	
B.	Julien	Pôle Canne Bois Rouge	Oui	Oui	Oui			
Barau	Jean-Marie	Planteur	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	
Barau	Mederic	Planteur	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	
Barbet-Massin	Wloulimir	Association réunionnaise de pastoralisme	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Baudouin	Nolwenn	CNASEA	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	
Bégué	Agnès	CIRAD - Montpellier	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Brelle	François	CTICS	Oui	Oui				
Carron	David	COROI	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Caruel	Bertrand	CERFA	Oui	Oui	Oui			
Chabaliér	Pierre-François	CIRAD - St Denis	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Chopart	Jean-Louis	CIRAD - St Pierre	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Chung tze cheong	Maryse	MSIRI (Maurice)	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
D.	Stephanie	Pôle Canne Bois Rouge	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui
De la Giroday		Agriculteur	Oui	Oui	Oui			
De Laburthe	Bruno				Oui	Oui	Oui	Oui
Degenne	Pascal	CIRAD - Montpellier	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Delabaere	Françoise	QUALITROPIC	Oui					
Demené	Camille	CNASEA	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	
Derand	Michel	Indépendant	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	
Derrien	Luigi	Maitre d'œuvre indépendant	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Derrien	Roger	Maitre d'œuvre indépendant	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Deurveilher	Dany	CIRAD - St Denis	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	
Durand	Yves	SAFER	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	
Esther	Jean-Jo	CIRAD - St Denis	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Fabre	Céline	CNASEA	Oui	Oui	Oui			
Fillon	Christophe	COROI	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Gossard	Christophe	Chambre Agriculture	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Gout	Bruno	Coopérative de la Cave	Oui	Oui	Oui			
Greffion	Jean-Marie	Lycée Pierre Lagourgue	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Gueno	Maurice	CIRAD - St Denis	Oui	Oui		Oui	Oui	
Guilbot	Nadège	CTICS				Oui	Oui	
Houlès	Marion	CIRAD - St Denis	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Jard	Adeline	Chambre Agriculture				Oui	Oui	Oui
Labbé	Sylvain	Cemagref	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Lagesse	Patrick	Deep river beau champ (Maurice)	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Le Mezo	Lionel	CIRAD - St Pierre	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Lebourgeois	Valentine	CIRAD - St Denis	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Lincoln	Jean-Robert	CIEL Agro-industry	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

Mahadou	Rady	Coopérative des avirons	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	
Mandret	Gilles	CIRAD - St Denis	Oui	Oui				
Marion	Daniel	CERF	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Marnotte	Pascal	CIRAD - St Denis	Oui	Oui	Oui			
Martignac	Cécile	CIRAD - Guadeloupe	Oui	Oui	Oui			
Martiné	Jean-François	CIRAD - St Denis	Oui	Oui	Oui			
Mezino	Mickael	CIRAD - St Pierre	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Moutama	Jean-François	CERFA	Oui	Oui	Oui			
Mwatha Muturi	Stephen	Kenya Sugar Research Foudation (Kenya)	Oui	Oui	Oui			
Nativel	Raymond	CIRAD - St Pierre	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Parfait	Jean-Noël	Medine Sugar Estate - Maurice	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Paulin	Louis	CIRAD - St Pierre	Oui	Oui		Oui	Oui	Oui
Payet	Didier	Coopérative des avirons	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	
Payet	F.	CTICS	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Poiny	Fabrice	CERF	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Poser	Christophe	CIRAD - St Denis	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Renaud	Héléna	CIRAD - St Pierre	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Rhodes	Fredérique	CERFA	Oui	Oui	Oui			
Rondeau	Philippe	Sucrière de la Réunion	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Roux	Bruno	Avion Jaune	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Siegmund	Bernard	CERF	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Sonnier	Lionel	Les passagers du vent						Oui
Thibault	Florent	SFS				Oui	Oui	Oui
Thierry	Marc	Pôle Canne Bois Rouge				Oui	Oui	
Thong Chang	Audrey	CERF	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Tillard	Emmanuel	CIRAD - St Pierre	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	
Todroroff	Pierre	CIRAD - St Pierre	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Van de Berg	Maurits	SASRI (Afrique du sud))	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Vilmin	Olivier	F.R.C.A	Oui	Oui	Oui			
Virama Latchoumy	Raymond	DDRAF	Oui	Oui	Oui	Oui		
Zettor	Alix	DDRAF				Oui	Oui	Oui

Annexe 6 : Plaquette de l'offre de service

DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES

pour l'aide à la production cannière

LES BESOINS

L'évolution actuelle du marché du sucre et des bio-carburants, et les nouvelles difficultés rencontrées par les planteurs comme la hausse du prix de l'engrais, nécessitent d'améliorer la productivité des filières canne.

Ces filières sont en attente d'outils de suivi et de diagnostic leur permettant de gérer au mieux la production et d'intervenir plus rapidement en cas de problèmes sur le terrain.



AGRIDRONE

Objectif : développer une offre de service destinée à la filière canne réunionnaise, basée sur la diffusion de cartes d'état des cultures pour une optimisation des interventions culturales.

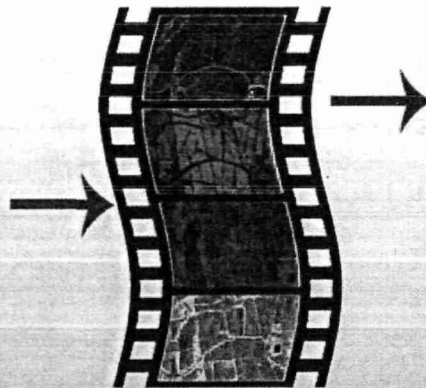
- Les produits cartographiques sont issus de photographies aériennes à très haute résolution
- Les produits sont accessibles par des outils de diffusion et de visualisation de l'information



LA TÉLÉDÉTECTION A VOTRE SERVICE !



Un ULM ou un drone, équipé de capteurs survole votre exploitation et prend des photos de vos parcelles



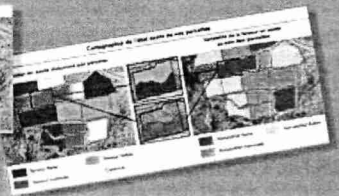
Des experts en agronomie et en télédétection analysent et interprètent les images...



Recevez en cours de campagne, des cartes sur l'état de vos parcelles. Chaque carte vous apporte des informations directement exploitables pour optimiser vos interventions culturales



...et les traduisent en diagnostic agronomique sous forme de cartes :



LES PRODUITS DE BASE

La souplesse d'utilisation du système aéroporté (drone, ULM) permet d'acquérir des images à la **demande** et à des résolutions spatiales pouvant atteindre quelques **centimètres**.

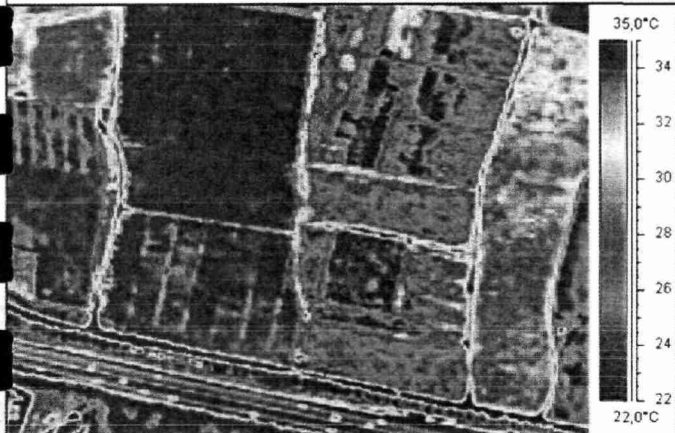
Les images sont transformées en **orthophotographies**, dont les couleurs sont calibrées et corrigées. Elles deviennent alors des cartes numériques qui peuvent être directement utilisées dans un système d'information géographique.

Le Modèle Numérique de Terrain est une représentation de la **topographie**. A partir du MNT, il est possible de visualiser en **3 dimensions** le territoire et de calculer des **pentés**.



Exemple de Modèle Numérique de Terrain en vision 3D (maille de 5m)

Température de surface



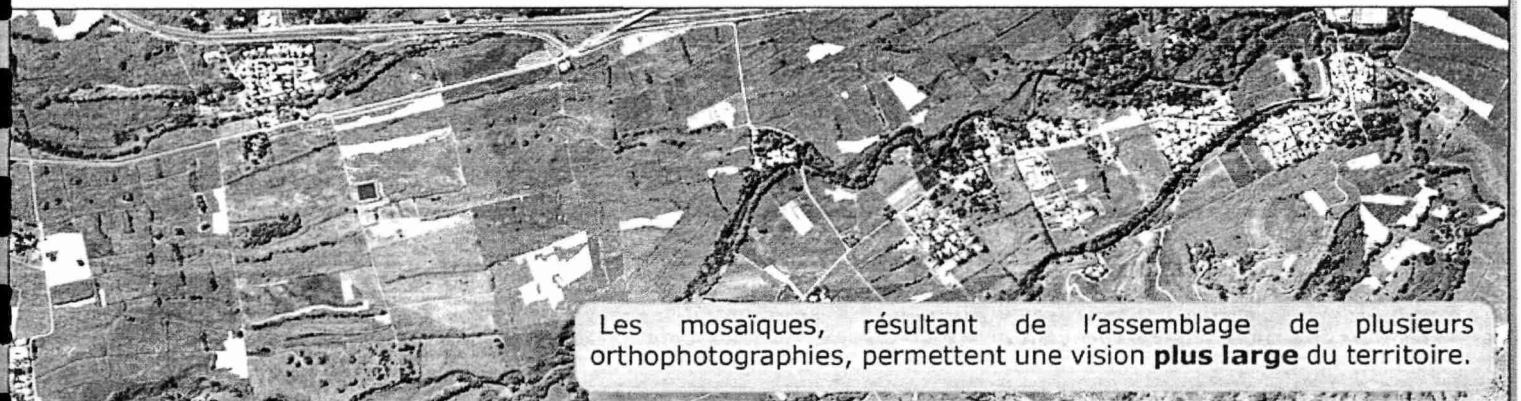
La caméra infrarouge thermique, embarquée à bord de l'ULM, permet d'obtenir des images de **température** de surface caractéristique de l'**état hydrique** de la végétation.

A partir des différentes bandes spectrales, il est possible de calculer des **indices de végétation**, tel que le NDVI, permettant de caractériser l'**activité végétale**.

Indice de végétation (NDVI)



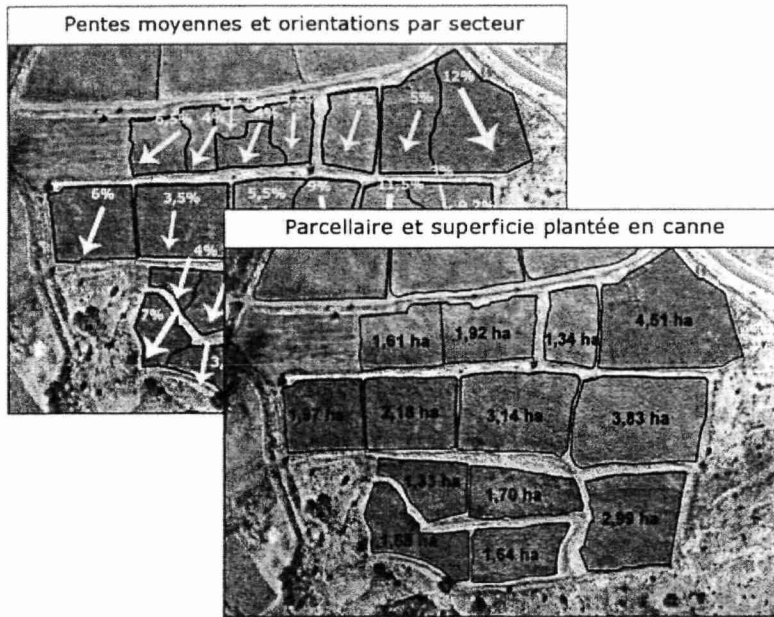
Mosaïque de 27 orthophotographies



Les mosaïques, résultant de l'assemblage de plusieurs orthophotographies, permettent une vision **plus large** du territoire.

MIEUX CONNAÎTRE VOTRE EXPLOITATION ...

... POUR MIEUX LA GÉRER



Organiser, observer, raisonner, c'est avant tout **mieux connaître son exploitation**, ses parcelles, ses plantations.

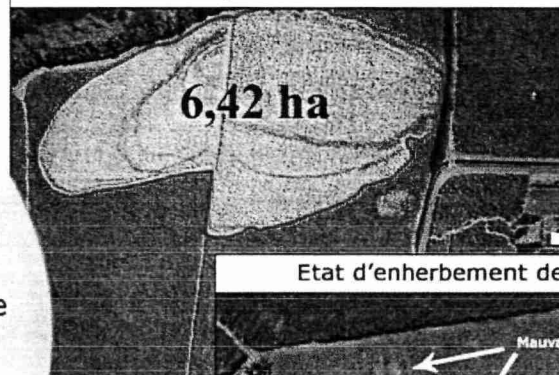
Pour éviter le sur-dosage et le gaspillage d'intrants, adaptez vos doses à la **surface réelle** de vos parcelles et tenez compte **des pentes** pour moduler vos apports.

LA SURVEILLANCE DES CULTURES

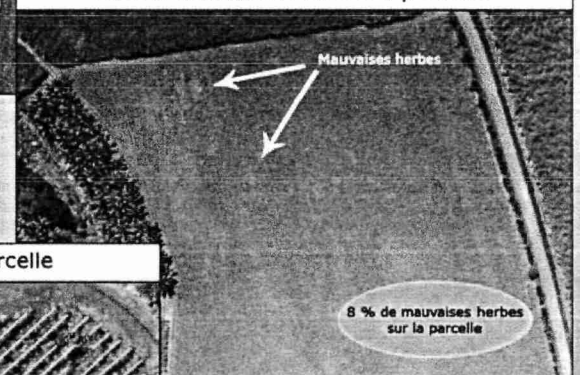
Enherbement, plants manquants, défauts d'irrigation, ver blanc, incendie ... **prenez de la hauteur** pour surveillez vos cultures et pour :

- **quantifier** l'étendue d'un phénomène (enherbement, incendie...) afin d'évaluer la perte de rendement
- **cibler** les observations terrains pour un tour de champs plus rapide
- **détecter** les anomalies de croissance pour une intervention plus efficace

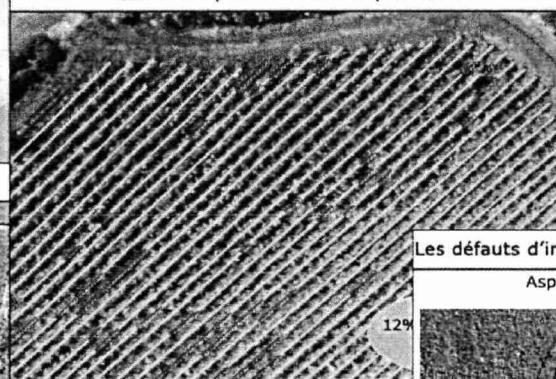
Etendue des dégâts causés par un incendie



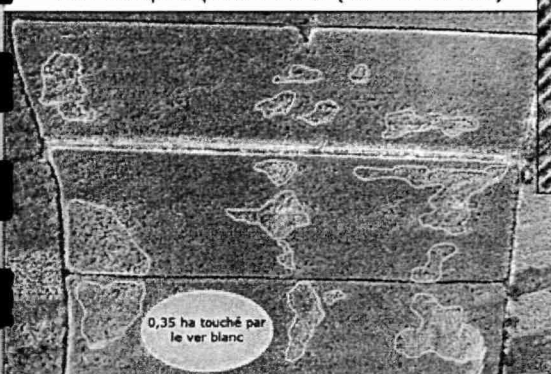
Etat d'enherbement de la parcelle



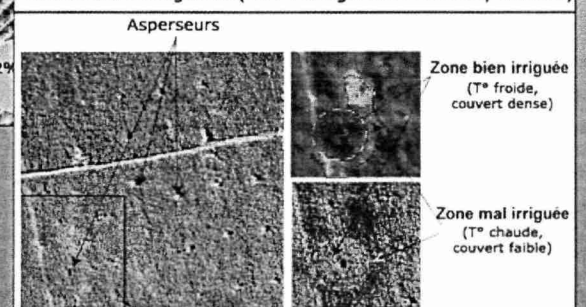
Les manquants dans la parcelle



Les attaques parasitaires (ex : ver blanc)



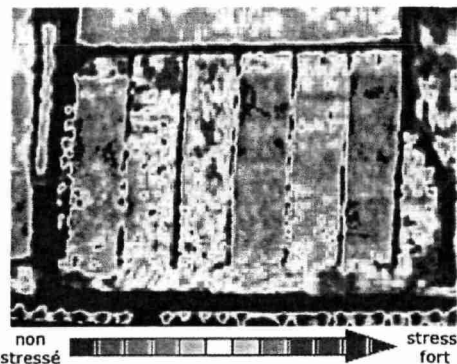
Les défauts d'irrigation (ex : l'éloignement des asperseurs)



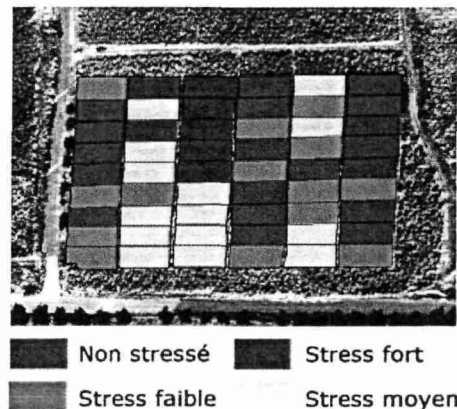
LA RECHERCHE AVANCEE

La caractérisation / le diagnostique de l'état **hydrique** et **nutritionnel** est un élément clé pour le conseil à l'irrigation et à la fertilisation. Les chercheurs du Cirad travaillent à mettre en évidence des **relations** entre les images aériennes de la canne à sucre et ses paramètres biophysiques (hydrique et azoté) Ces vues permettront ainsi d'appréhender la variabilité des plantations à l'échelle de l'exploitation ou de la parcelle. Le conseil aidé par cette spatialisation a pour objectif d'améliorer l'efficacité de l'irrigation et le dosage des fertilisants.

Image d'indice de stress hydrique sur une parcelle expérimentale



Classification de l'indice de stress hydrique sur une parcelle expérimentale



LES BÉNÉFICES

- La prise en compte de l'hétérogénéité des parcelles permet de **moduler** et **d'optimiser** les intrants. Elle permet aussi de mieux **cibler** la prise d'échantillons.
- Gain de temps : la vision aérienne de vos parcelles permet de réduire les observations terrain aux endroits suspects et de les identifier avant qu'ils ne soient visibles au sol.
- Augmentation de la rentabilité : en adaptant les doses et formules d'intrants aux besoins réels de la culture, vous augmentez vos rendements tout en réduisant ou maintenant les doses apportées.
- Préservation de l'environnement : grâce aux conseils issus de la télédétection, vous évitez les sur-dosages et le gaspillage et maintenez ainsi des pratiques respectueuses de l'environnement.
- Pour les techniciens agricoles, la connaissance plus pointue des exploitations suivies, permet d'optimiser les conseils aux planteurs.

COMBIEN CA COÛTE ?
De 8 à 12€/ha

Produits délivrés :

- mosaïque RVB
- imagerie thermique
- NDVI

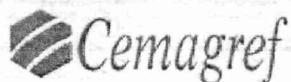
- produits cartographiques à la demande (superficies, manquants, incendies...)

Livrés au format papier ou numérique

Couverture minimale : 200ha

LES UTILISATEURS

Tous les acteurs de la filière : planteurs, techniciens agricoles, usiniers, coopératives, assureurs, collectivités locales, organisations professionnelles, opérateurs et sous-traitants, grâce à la simplicité et à la modularité des produits fournis



CONTACTS

Agnès Bégué
begue@teledetection.fr
04 67 54 87 39

Maison de la télédétection
500 rue Jean-François Breton
34093 Montpellier Cedex 5
FRANCE

Annexe 7 : Papiers et communications

- 1- BÉGUÉ A., V. LEBOURGEOIS, S. LABBÉ, B. ROUX, L. PRÉVOT and B. MALLAVAN, 2009. Can digital cameras be used as radiometric sensors for crop monitoring ? *Sensors Journal* (soumis).
- 2- LEBOURGEOIS, V., A. BÉGUÉ and J.-F. MARTINÉ, 2008, Sensitivity of airborne-derived crop water deficit indices to the cropping practices. In *Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering & Industry Exhibition (AgIng08)*, Hersonissos, Crete (Greece), 13 p.
- 3- LEBOURGEOIS, V., S. LABBÉ, A. BÉGUÉ and F. JACOB, 2008, Atmospheric corrections of low altitude thermal infrared airborne images acquired over a tropical cropped area. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS'08)*, Boston (Massachusetts, US), 6 p.
- 4- LEBOURGEOIS, V., A. BÉGUÉ, S. LABBÉ and B. ROUX, 2007, An airborne imaging system for mapping spatial variability in sugarcane. In *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT)*, Durban (South Africa), 4 p.
- 5- LABBÉ, S., B. ROUX, A. BÉGUÉ, V. LEBOURGEOIS and B. MALLAVAN, 2007, An operational solution to acquire multispectral images with standard light cameras: Characterization and acquisition guidelines. In *Proceedings of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Workshop - Airborne Digital Photogrammetric Sensor Systems*, Newcastle (UK), 6 p.

Article

Can Commercial Digital Cameras Be used as Multispectral Sensors? A Test on Crop Monitoring

Agnès Bégué^{1*}, Valentine Lebourgeois², Sylvain Labbé³, Benjamin Mallavan¹, Laurent Prévot⁴ and Bruno Roux⁵

- 1 CIRAD UMR TETIS, Maison de la Télédétection, Montpellier, F-34093 France
- 2 CIRAD UPR SCA, Station La Bretagne, Saint-Denis, La Réunion, F-97408 France
- 3 Cemagref UMR TETIS, Maison de la Télédétection, Montpellier, F-34093 France
- 4 INRA UMR LISAH, SupAgro, Montpellier, F-34060 France
- 5 Avion Jaune, Minéa Incubation, Montpellier, F-34196 France

E-Mails: agnes.begue@cirad.fr (A.B.); valentine.lebourgeois@cirad.fr (V. L.); sylvain.labbe@cemagref.fr (S. L.); benjamin.mallavan@teledetection.fr (B.M.); laurent.prevot@supagro.inra.fr (L.P.); bruno.roux@lavionjaune.fr (B.R.)

* Author to whom correspondence should be addressed; Tel.: +33-4-67-54-87-39; Fax: +33-4-67-54-87-00

Received: / Accepted: / Published:

Abstract: The use of consumer digital cameras or webcams to characterize and monitor different features has become prevalent in various domains, especially in environmental applications. Despite some promising results, such digital camera systems generally suffer from signal aberrations due to the on-board image processing systems and offer limited quantitative data acquisition capability. The objective of this paper was to test a series of radiometric corrections that have the potential to reduce radiometric distortions due to camera optics and environmental conditions, and to quantify the effects of these corrections on our ability to monitor crop variables. In 2007, we conducted a five-month experiment on sugarcane trial plots using original RGB and modified RGB (Red-Edge and NIR) cameras loaded onto a light aircraft. The camera settings were kept unchanged throughout the acquisition period and the images were recorded in JPEG and RAW formats. These images were corrected to eliminate the vignetting effect, and normalized between acquisition dates. Our results suggest that 1. the use of unprocessed image data did

not improve the results of image analyses, 2. vignetting had a significant effect, especially for the modified camera, and 3. normalized vegetation indices calculated with vignetting-corrected images were sufficient to correct for scene illumination conditions. These results are discussed in the light of the experimental protocol and recommendations are drawn for the use of these versatile systems for quantitative remote sensing of terrestrial surfaces.

Keywords: digital camera; spectral sensitivity; vignetting; radiometric correction; crop monitoring; airborne images.

1. Introduction

Recent developments in sensor technologies have made consumer digital cameras more and more efficient and affordable. The main advantage of digital photography lies in simplified image processing. The use of digital cameras or webcams to characterize and monitor features of interest has appeared across multiple different domains, including both laboratory-based [1-2] and environmental applications [3-4]. Agricultural applications benefit significantly from the use of digital cameras in plant phenology monitoring [5-6], precision farming [7-9], production assessment [9-11], and vegetation structure characterization using hemispherical lenses [12-13]. Digital cameras can be used either in a stationary installation [5-6] or on board a light aircraft or unmanned aerial vehicle, a deployment which is made possible thanks to their low weight [14-15]. In most cases, the digital photographs are recorded in JPEG or TIFF formats, and the Red, Green and Blue (RGB) channels are obtained through simple image processing. The RGB channels are then either used for image classification, or combined in spectral indices to be correlated with the surface parameters of interest. Despite a number of interesting results, these digital camera systems generally suffer from signal distortions due to the on-board image processing algorithms, and they offer limited quantitative data acquisition capabilities.

Several factors affect the signal, and the conversion between object luminance and digital image measurement is not straightforward (Figure 1). These factors are camera-related (color processing algorithms, camera settings and vignetting) and environment-dependent (sun geometry, atmosphere and flight altitude). Although researchers have paid significant attention to image geometry [16], to date much less attention has been paid to the relation between pixel values and target radiance [13]. In certain cases, like time series analysis or quantification of surface parameters, pixel radiometry must be corrected in order to be comparable across time and space. The main sources of radiometric distortions are:

- **Gamma correction:** Digital cameras are based on CCD (charge-coupled device) detectors that are linear photoconductive devices. If twice the flux of photons is received on a given pixel, twice the output value will be generated. Despite the intrinsic linearity of CCD sensors, digital value output from standard digital images is not a linear measure of object brightness, since the image processing software embedded in digital cameras is designed to emulate the non-linear

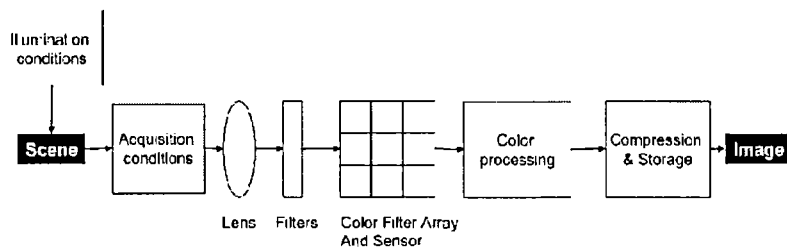
behavior of the human eye. Accordingly, most modern consumer cameras use some type of gamma adjustment to map the image to the available quantization range in order to improve esthetics [17].

- CFA interpolation (or demosaicing): Digital cameras use a single sensor with a color filter array (CFA) that permits only one color to be measured at each pixel (Red, Blue or Green). To create the color image, the two missing color values are estimated for each pixel by means of CFA interpolation. The color interpolation process, also known as demosaicing, is generally achieved using a proprietary algorithm.

- Vignetting: This distortion refers to the phenomenon of brightness attenuation away from the image center, and is an artifact that is prevalent in digital photography. Several mechanisms may be responsible for vignetting effects. Some arise from the optical properties of camera lenses, the most prominent of which is off-axis illumination falloff or the \cos^4 law. Other sources of vignetting are geometric in nature, including the light arriving at oblique angles to the optical axis and subsequently being partially obstructed by the field stop or lens rim [18]. Although lens manufacturers attempt to design their lenses so as to minimize the effects of vignetting, it is still present to some degrees in all lenses. Vignetting presents problems in measurement applications when radiometric quantities are estimated from images [19].

- Radiometric normalization between images: The camera measures radiance, the energy reflected by the scene. This radiance depends on the incident radiation at the time the image was acquired, and on the optical properties of the scene (Figure 1). The quantity and quality (spectral composition) of the incident radiation is related to the solar zenith angle and to atmospheric conditions. The radiance is converted into Digital Numbers (DN) depending on the camera settings (the lens f-stop, the exposure time, and the gain via the ISO setting). To compare images, one must take into account both the incident radiation and the camera settings.

Figure 1. Environment-dependent (blue boxes) and camera-related (white boxes) factors involved in the image acquisition process.



We observed that many factors play a role in image acquisition: built-in gamma correction and image interpolation, vignetting, camera settings, and quality and quantity of incoming radiation conditions. All these factors have been widely studied by different specific communities and solutions for correcting each of them are known, but these solutions have not

been used sequentially for an airborne data set to verify whether a comprehensive image processing workflow is possible for real-time crop monitoring using commercial digital cameras. The objective of this paper was to test simple radiometric corrections of the aforementioned camera-related distortions and environmental conditions, and to quantify the corrections in terms of ability to better monitor vegetation variables. Our algorithm employed three steps: 1. correction of the camera-related factors, 2. correction of the environment-dependant factors and 3. quantification of the signal correction in terms of vegetation variables monitoring.

To achieve this, in 2007 we conducted a five-month experiment in which we flew over sugarcane trial plots using original RGB and modified RGB (Red-Edge and NIR) cameras loaded onto an ultralight aircraft. Our hypothesis was that if accurate radiometric data could be derived from the images using simple post-processing, we could design a cost-effective imaging system that could lead to exciting possibilities for new approaches in precision farming.

2. Data acquisition

Our radiometric data acquisition system consisted of an ultralight aircraft equipped with modified digital cameras that acquired and measured the sunlight reflected in five different spectral bands. Between May and September 2007, seven airborne flight trials were conducted over a 7.3 ha experimental sugarcane field on Reunion Island, a territory of France that lies in the Indian Ocean.

2.1. Digital cameras

We used three Canon® EOS 400D digital cameras (10.1 Megapixel CMOS sensor); each of which had a focal length of 35 mm. The spectral sensitivity of the three cameras was measured in the laboratory with a monochromatic source 1.2 nm wide [20-21]. The original camera measured radiation in Red, Green and Blue spectral bands (Figure 2a), and is hereafter referred to as the RGB camera. The other two cameras were modified to allow them to detect radiation in additional spectral bands (Figure 2b). The modification consisted of removing the original internal NIR high-pass filter (Figure 2a) and adding specific band-pass filters [7-14]. One camera was then equipped with an external band-pass Oriel filter (690-709 nm 50% cut), and the other with a LDP LLC XNiteBPG filter (808-855 nm 50% cut); these cameras are hereafter referred to as the RDG (Red-edge) and the NIR (Near Infrared) cameras. Figure 2b shows that the wavebands are broad for the RGB camera, and especially narrow for the RDG camera. If we consider the standard spectral profile of a green vegetation canopy, our results also indicate that the RDG is located at the beginning of the slope between the red and near infrared spectral domains.

Figure 2. Normalized spectral sensitivity of CANON EOS 400D cameras: (a) the original (RGB) and modified (without NIR filter), (b) the original (RGB) and modified (RDG and NIR). The colours of the lines correspond to the camera channels. The grey line is a standard reflectance profile of a green vegetation canopy.

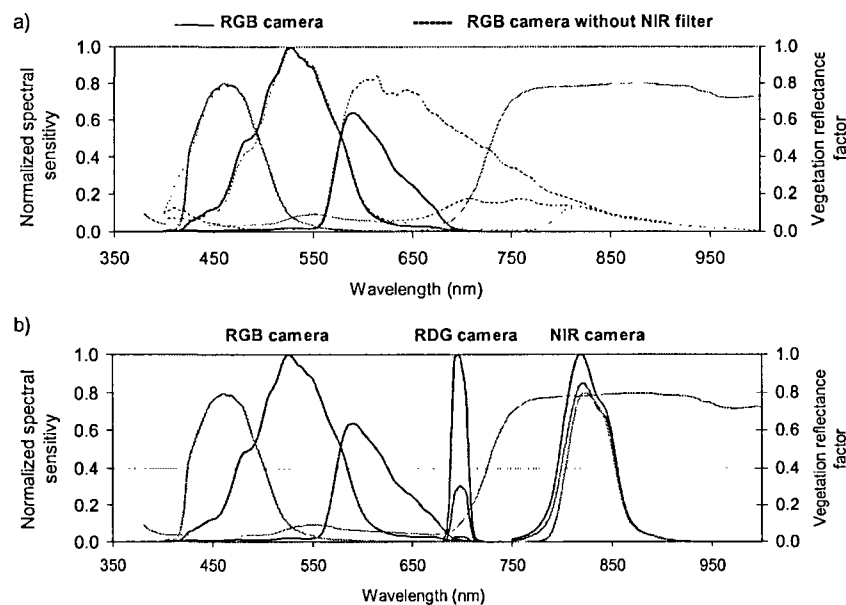


Table 1. CANON EOS 400D camera settings.

Camera	Shutter speed	Sensitivity	Aperture*
RGB	1/640	100	f-5
RDG	1/160	200	f-5
NIR	1/1000	200	f-5

*f-numbers = diameter of the entrance pupil / effective focal length of the lens

The camera focus was set to infinite. The settings of the three cameras (aperture, shutter speed, and sensitivity, Table 1) were determined by flight acquisition tests, and were adjusted manually to eliminate saturated values in any band. The settings were kept unchanged throughout the experiment.

2.2. Airborne image acquisition

The three multispectral cameras (2.8 kg) were assembled and mounted on board an ultralight aircraft [21]. The cameras were pointed in the same direction (vertical viewing). Their shutters were synchronized to a single trigger. The ultralight aircraft has a slow flight speed (apparent ground speed between 50 km/h and 70 km/h depending on wind conditions) that does not result in motion blur when images are taken at a low altitude (600 m). The position of the aircraft was recorded by a GPS data unit during each flight.

Seven flights were undertaken over the La Mare site between May and September 2007: May 2, May 25, June 8, June 29, July 23, August 13, and September 5. The flights were performed between 11:00 am and 12 noon solar time, on clear days. The aircraft flew transects over the field at about 600 m altitude, producing images with a ground resolution of between 10 and 12 cm.

During the same period, additional airborne acquisitions were taken from other agricultural regions of the island at different altitudes (between 300 m and 1500 m), leading to a total of about 500 photographic images per camera acquired under similar atmospheric conditions (clear days) and irradiance geometric parameters (around 12:00 solar hour).

All the images were recorded in JPEG and RAW (termed CR2 for CANON cameras) formats.

2.3. The ground experiment

The sugarcane experimental field is located in La Mare, Sainte Marie (Lat 20.9°S; Lon 55.5°E), in the northern part of Reunion Island (average altitude of 60 m). The field was divided into three randomised blocks cultivated with three cultivars of sugarcane (R570, R575, R579) under three different nitrogen inputs (0/N, 65/N, 130/N) and two water treatments (irrigated and rainfed) (Figure 3). For each combination of treatments (cultivar, nitrogen, irrigation), the size of the plot in each block was 135 m². Each comprised 5 rows 18 m in length, with a 1.5 m inter-row separation.

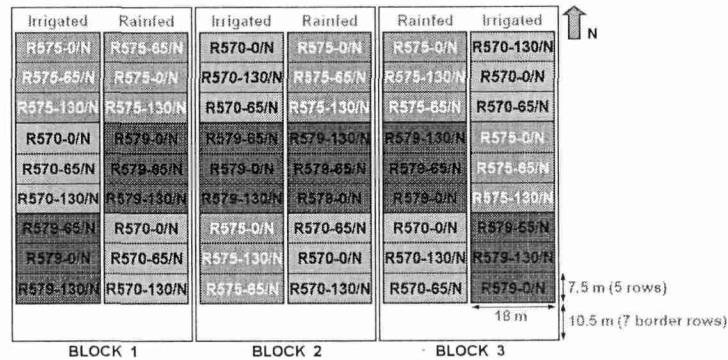
The sugarcane field was in its seventh month of growth at the beginning of the experiment in May, and exhibited a closed canopy at that time. Plant measurements were performed monthly on the R570 and R575 cultivar plots, including Leaf Area Index (LAI) and leaf greenness (SPAD, SPAD-502 MINOLTA). Values of LAI and SPAD were obtained using non-destructive measurements on the three central rows of each plot in order to avoid border effects, and were averaged for each plot [22]. An integrated index, the canopy chlorophyll content CC, was estimated from the following equation:

$$CC = SPAD * LAI \quad (1)$$

The CC index is linked to NDVI [23-24].

The mean annual precipitation in the study area was 1514 mm/year, but the experiment took place during the dry season (alternating dry and wet periods).

Figure 3. Layout of the La Mare 2007 experimental trials: irrigated/rainfed, three sugarcane cultivars (R570, R575, R579), and three nutrient inputs (0N, 65N, 130N), three replications each.



3. Data processing

The data processing steps aimed to recover comparable values of crop variables across both space and time. The sources of radiometric distortions in the measurements, derived both from the camera itself and from the acquisition conditions, were listed in the introduction. The radiometric correction process implemented in this study included the following stages:

- Decoding unprocessed digital photo;
- Correcting the vignetting;
- Normalizing the image series over time.

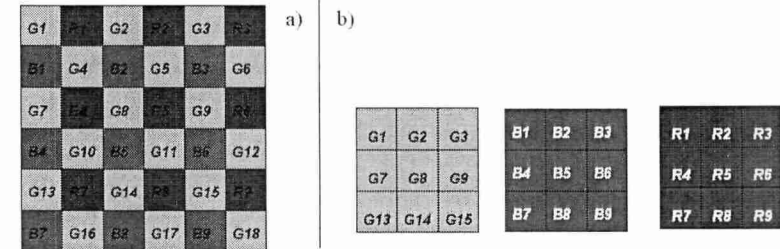
We then calculated the relationship between image spectral values and ground measurements.

3.1. Decoding unprocessed digital photos

The CANON cameras produce their images by means of a Bayer matrix (or Bayer CFA) whereby each individual pixel is filtered and coded as red (R), green (G) or blue (B) (Figure 4). As explained in the introduction, for most commercial cameras, a “black box” proprietary interpolation algorithm is applied to the Bayer matrix to calculate a full frame RGB image which simulates a realistic appearance for the human eye. The image radiometric resolution is often lowered during this operation (generally from 12 to 8 bits) and compressed (using JPEG format). In order to preserve the information contained in the image, we worked with the unprocessed CCD data files (CR2 format for CANON cameras). To decode these unprocessed images, for which the camera manufacturer does not always provide decoding software, we used IRIS 5.5, a free software package available on the web (Buil C., personal communication; <http://www.astrosurf.com/buil/iris/iris.htm>). This software is based on a portable open source

program, *dcrw* (Coffin D., personal communication; <http://www.cybercom.net/~dcoffin/dcrw/>) which supports most RAW formats and is available on most operating systems. IRIS splits the CR2 files into four monospectral images, each corresponding to a spectral band (G, G, R, B). The resulting output images (1953 x 1301 pixels) are four times smaller than the originals. [12] who also used the *dcrw* program, demonstrated perfect linearity between the DN of decoded images and quantum sensor measurements.

Figure 4. (a) Color Frame Array of the Canon EOS 400D and (b) extraction of “spectrally pure” images.



For the RGB camera, we kept the Red image, one of the two Green images, and the Blue image. Only the Red image extracted from the CFA was stored for the RDG and NIR cameras, as the Red band has the best signal to noise ratio (Figure 2b). This process resulted in five spectral bands (Red, Green, Blue, Red-Edge, NIR) for each shot.

The difference between the unprocessed images and JPEG images was studied by comparing their respective DN values. Because of the intrinsic nature of the JPEG and unprocessed formats, and the difference in image size (JPEG: 3888 x 2592 pixels - RAW: 3906 x 2602 pixels), it was not possible to compare the images on a pixel-by-pixel basis. Accordingly, we made the comparison on a set of training polygons with a large range of radiometric values. The polygons were chosen in homogeneous areas to limit location uncertainty.

3.2. Vignetting correction

The correction of the image vignetting was performed using three steps: preparation of the data set, calculation of the radiometric distortion by model fitting, and the correction itself. The calculations were made separately for each spectral band.

To determine the vignetting effects in an image, the most straightforward approach involves capturing an image that spans a uniform scene region, such that brightness variations can be attributed solely to vignetting [25]. However, obtaining suitable imaging conditions for this approach can be challenging, and measurements are valid only for images captured by a single camera using identical settings [18]. We thus chose to calculate for each spectral band an average image from the 500 images acquired during the whole experiment over all different sites

and at different altitudes. In order to avoid radiometric artifacts, we thresholded the DN values so as not to include pixels with a very high signal (buildings for example). Specific thresholds were applied to each spectral band. We ultimately subtracted from the mean image the dark current (DN = 255) added by the IRIS software during the decoding step. The resulting five mean images (Red, Green, Blue, Red-Edge, NIR) were then assumed to be directly proportional to luminance and were used to calculate and model the 2D radiometric profiles.

Most methods for vignetting correction use a parametric model to simplify estimation and minimize the influence of image noise [18]. Empirical models such as polynomial functions and hyperbolic cosine functions are typically used. We chose to fit the radiometric profile by using least square mapping to a bidimensional polynomial, resulting in a smoothed approximation of the vignetting effect. On our mean images, we tested different polynomial orders, from 2 to 7, to fit the optical deformation. Ultimately this polynomial function was used to create a filter mask that was applied (in a multiplicative way) to each image in order to eliminate vignetting.

Assuming that illumination conditions could cause vignetting-like effects (for instance "hot spot" effects) this process was initially performed separately for each date. In our experiment, this approach did not improve correction results (results not shown), so we chose to average a larger number of images that covered all dates in our study (about 500 images) to derive the vignetting profile.

3.3. Radiometric normalization

Radiometric normalization consists of rendering images acquired under different irradiance conditions and with different cameras that are comparable in terms of DN. By normalization, we mean here that neither absolute calibration coefficient nor incident radiation measurement was available.

The simplest and most common normalization method involves calculating normalized brightness for the RGB channels. This is performed for each image by dividing the brightness value for each of these channels by the total brightness of the image [6-5]. This method is satisfactory because it succeeds for acquisitions made with different irradiance and camera settings. However, despite its effectiveness, residual variations can be attributed to differences in the spectral distribution of incident solar radiation which are linked to the fraction of diffuse radiation in the total incident light [6]. The same advantages and limitations play a role when a spectral vegetation index is calculated [9-5]. Another empirical method, often used with satellite images, consists of using invariant dark and bright points in the image [26- 27]. These points can either be invariant scene features like roads, parking areas or buildings [14], or experimental targets like colored panels.

We tested two methods of radiometric normalization: normalization with invariant targets, and normalization using the cosine of the solar zenith angle:

- Six invariant targets were selected by photo-interpretation (three types of soil, a road, a bush and a building). Polygons were used to extract the DN in the five bands across all the images from the time series. Subsequently, we chose the June 29th image as our reference

for the normalization process. For each spectral band, we calculated a transfer function between the DN of the invariant targets on the reference image and the other dates.

- In the absence of a global radiation measurement, we approximated the global radiation from the cosine of the sun's zenith angle (between 28.6° and 45.5° during the experiment). This method was possible only because the settings of the cameras did not change during our study.

The invariant and cosine normalization methods were validated using four plastic panels ranging in color from white to dark grey (1 x 1 m², about 4 x 4 pixels at 600 m altitude flight after image decoding). They were installed on the ground at each spectral acquisition date, close to the La Mare experimental field.

3.4. Relationship with surface parameters

To link the spectral and vegetation measurements, we first had to conduct some image post-processing: geometric correction, extraction of values related to the experimental plots, calculation of spectral indices, and ground data interpolation.

Referenced to a metric camera, the CANON camera lens distortion was measured as less than one pixel (Pierrot-Deseilligny M., 2008; personal communication), and so no correction was applied. For each set of images (RGB, RDG and NIR) acquired simultaneously using the trigger, we first co-registered the different bands to each other. We then performed a geometric correction on each date using a reference image chosen from the data set (June 29th).

The radiometric average value for each band was calculated at the plot scale. This calculation was made using the boundary map of the experimental field, after applying a negative buffer of two pixels in order to eliminate mixed border pixels and avoid possible errors due to the geometric correction.

From these mean values, and for each plot, we derived three normalized vegetation indices.

- The Normalised Difference Vegetation Index (NDVI [28]):

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

- The Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI [29]):

$$GNDVI = (NIR - G) / (NIR + G) \quad (2)$$

- The Normalized Difference of the Green and Red bands (VIgreen [30]):

$$VIgreen = (G - R) / (G + R) \quad (3)$$

where NIR, R and G stand for DN in the Near-infrared, Red and Green bands respectively.

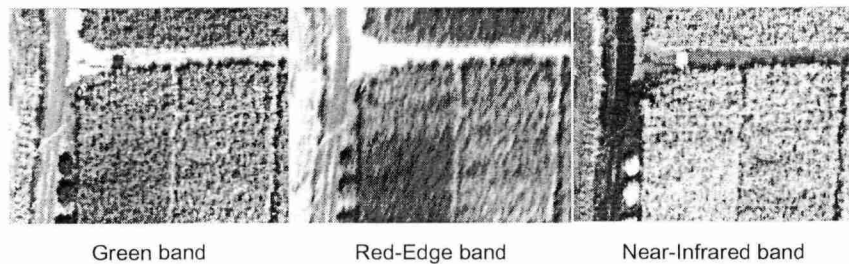
As plant measurements were not taken on the same dates as the airborne acquisitions, a linear interpolation between two ground measurement dates was applied in order to estimate LAI and SPAD values on the required image acquisition dates [22]. We then related the three vegetation indices to the CC (Chlorophyll Content) values and fitted regression functions using the entire data set.

4. Results

4.1. Airborne images

The images acquired from the ultra-light aircraft (ULA) were generally neat, with good contrast in the visible and NIR bands (Figure 5). The quality of the Red-Edge images was less satisfactory with a fuzzy rendering (motion blur) certainly due to the combined effects of exposure time and aircraft vibrations.

Figure 5. Subset of spectral images acquired with the three cameras (June 29).



The RGB image time series over the La Mare experimental site is shown in Figure 6. One can see that the sugarcane canopy is fully developed, and that the main change between the dates is in canopy color. The global yellowing of the canopy during the experiment is due to the senescence of the vegetation. Color variability within the experimental field (mosaic of experimental plots) is caused by the different cultivars, irrigation and nutrient treatments.

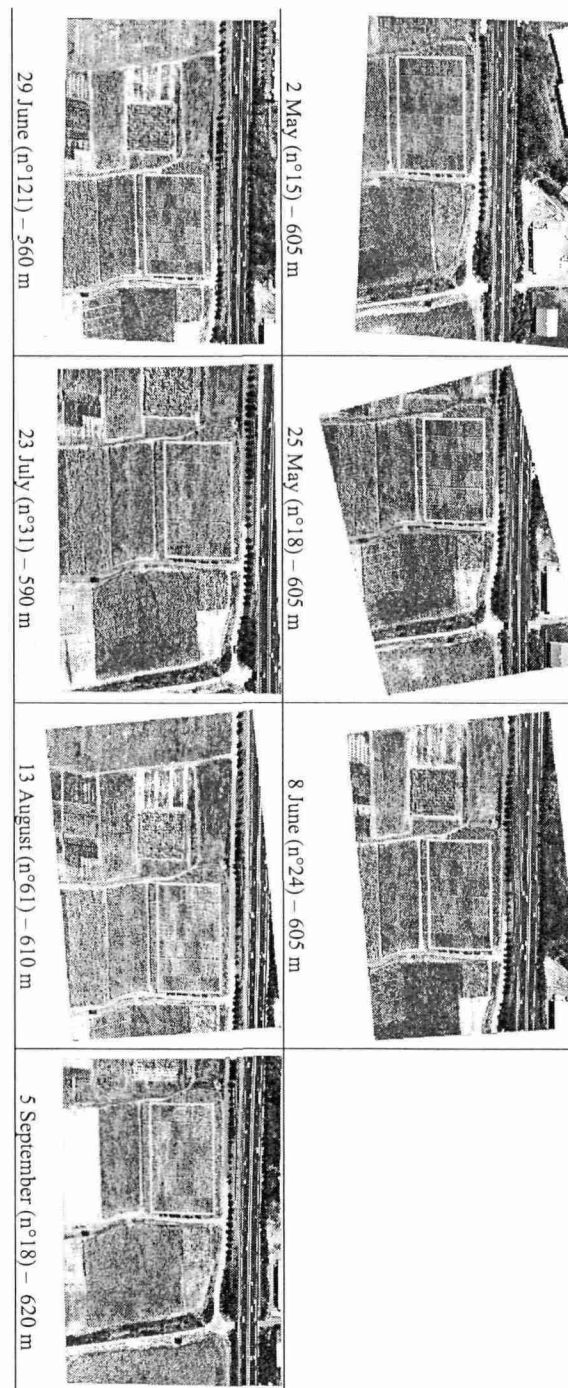


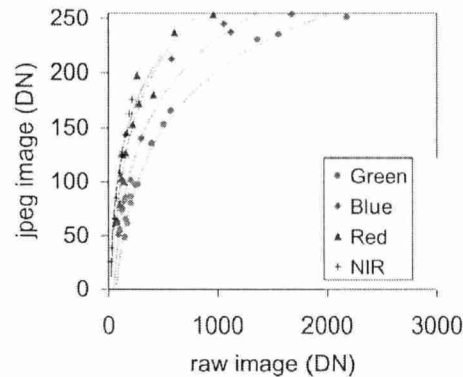
Figure 6. "La Mare" time series of visible images (BGR) taken at an aircraft altitude between 560 m and 605 m. The experimental field is identified by a yellow boundary.

4.2. Radiometric corrections

Decoding the unprocessed digital photos

We compared the unprocessed (RAW) and JPEG images on a polygon basis. The relationships between the digital numbers from the unprocessed and JPEG versions of one image are shown in Figure 7 for both visible and NIR bands. First, one observes a difference in value depths (8-bit image for JPEG, 10-bits for unprocessed), except for the NIR unprocessed image which suffered from under-exposure. Secondly, the relation is not linear and the tonal mapping can be modelled with a logarithmic function.

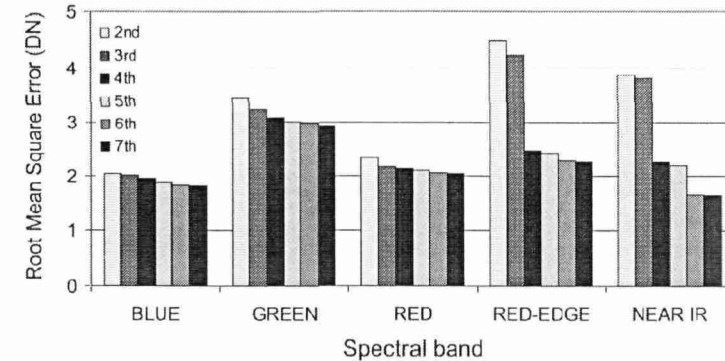
Figure 7. Comparison of the digital numbers (DN) of an image in unprocessed (RAW) and JPEG formats. Logarithmic curves are drawn for each band.



Vignetting correction

For each spectral band, we calculated a vignetting correction filter by fitting a polynomial function distribution onto an average image computed over the whole data set (about 500 images acquired in different locations and at different altitudes). This vignetting distribution function expresses the vignetting factor for a given position in the image as a polynomial function of position (i.e., row and column coordinates). Different degrees of polynomial were tested for each band and the resulting Root Mean Square Errors (RMSE) are as shown in Figure 8. In the visible (R, G, B) bands, an increase in the polynomial degree led to a small decrease in the RMSE. In the RDG and NIR, a significant decrease of the RMSE occurred between the 3rd and 4th degree. A second decrease between the 5th and 6th degree was observed for the NIR band; the 6th degree polynomial resulted in a good fit at the centre and corners of the image (Figure 9). These results led us to choose a 3rd polynomial degree function to correct the vignetting effects for the RGB, and a 4th and 6th polynomial degree function for the RDG and NIR, respectively.

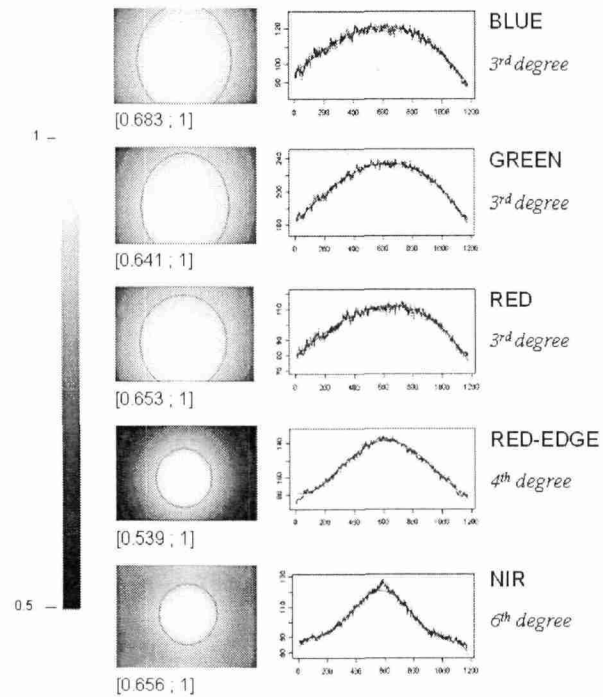
Figure 8. Effect of the polynomial degree of the vignetting function on the quality of the fitted model in each spectral band.



Once the optimal polynomial function had been found, we produced a vignetting filter image for each spectral band (Figure 9). Analysis of the filters indicated that the images taken with the RGB camera showed similar vignetting profiles, characterized by a smooth decrease in the signal (cosine-type function) as the distance from the centre increased. The signal attenuation was as high as 35% at the corners of the image. In the Red-Edge band the vignetting profile was somewhat sharper, and the loss reached 46% in the corners. The vignetting profile of the NIR images displayed a sharp shape, and attenuation of up to 35%. The shape of the vignetting profile seems more pronounced as the wavelength increases (from the visible to the NIR). Furthermore, in all bands the mask pattern was not symmetrical; recorded maxima were slightly shifted from the centre of the image.

The results obtained with the RGB camera indicate that today's commercial digital cameras are far from perfect, but are still of relatively good optical quality provided the borders of the photo are ignored. This is because vignetting effects are reduced during the manufacturing process. However, when the cameras are modified, as in the case of the RDG and NIR cameras, the vignetting effects are no longer compensated for, and this results in increased signal aberrations due to large amplitude losses in the RDG, and a sharp profile shape in the NIR.

Figure 9. Vignetting filters for the Visible, RDG and NIR images (the circles are iso-contours for a signal loss of 10%), and the corresponding fitted diagonal profiles.

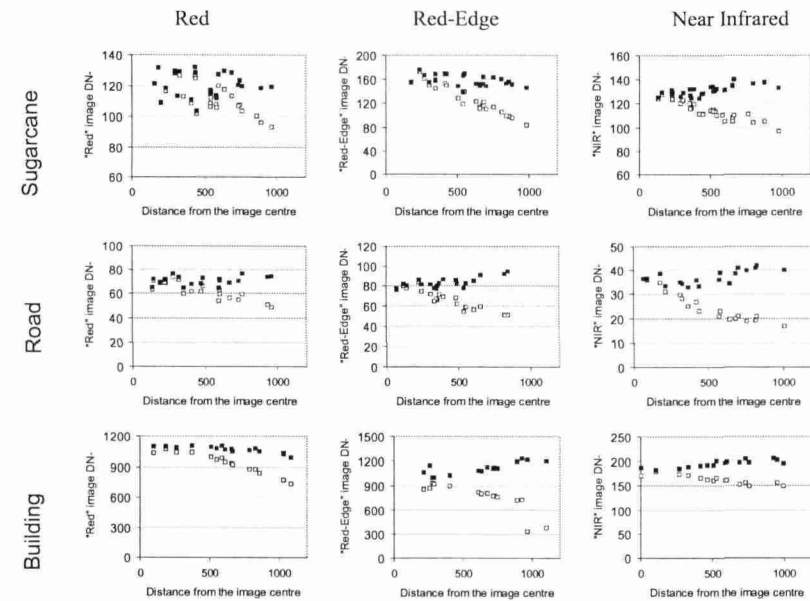


Effect of the vignetting correction on the radiometric stability of targets on one acquisition date

To isolate vignetting effects, we tested the correction on images taken under identical irradiance conditions (same date, around midday), but with changing object positions within the image (different distances from the centre resulting from different framing at different flight altitudes). The effect of the vignetting corrections on the DN of three targets (sugarcane, road, and building) with different spectral properties is shown in Figure 10 for the Red, Near Infrared and Red-Edge bands.

The vignetting effect was visible in all spectral bands and for the three targets, with progressively decreasing DN away from the image centre. The vignetting correction was generally appropriate, yielding a slight over-correction in the NIR. This over-correction does not seem to be linked to the nature of the target. The relative dispersion of the points in all spectral bands can be explained by different flight altitudes, which partly resulted in variable atmospheric noise in the signal. For the sugarcane target, the variability of points in the visible bands (Green and Blue not shown) can be explained by the effects of wind on the canopy (as observed on the images acquired at low altitude). Given these external effects, we consider the vignetting correction to be successful.

Figure 10. Effect of the vignetting correction on the DN values of three targets (open symbols = before correction; closed symbols = after correction), expressed in distance of the pixel to the centre of the image. The images were acquired on June 29, at different altitudes.



Effect of the radiometric normalization on the stability of invariant target DNs over time

We applied the cosine and invariant normalization methods on a time series of images acquired at 600 m altitude. The effects of these radiometric normalizations on the artificial targets' DNs are shown in Figure 11 for the five spectral bands. The invariant target correction reduced the variations significantly, from a range of variation of [15%-19%] for non-corrected DN, down to a range of variation of [9%-12%]. The cosine correction is globally equivalent to the invariant correction with a variation range of [9%-14%], and it exhibits a slight advantage in the Red and Near-Infrared bands.

When examining the invariant targets in the Red and NIR bands (Figure 12), we observed that bright objects are better corrected in the NIR using the invariant method, but this does not seem to be the case for darker targets. The red-edge radiometric correction is not satisfactory (not shown), presumably because of a location default of the target within the image due to poor image quality.

Overall, the cosine and invariant methods gave similar results. The advantage of the invariant method is to take into account atmospheric variations. The atmosphere is not a first order driving

factor in this case as the atmospheric conditions on the acquisition dates were similar (clear days); the first order driving factor is the solar zenith angle.

Figure 11. Comparison of different methods of radiometric normalization based on artificial invariant targets: no normalization, cosine and invariant methods. The mean coefficient of variation (CV) is the average of CV of the four artificial targets' digital numbers measured over the acquisition period.

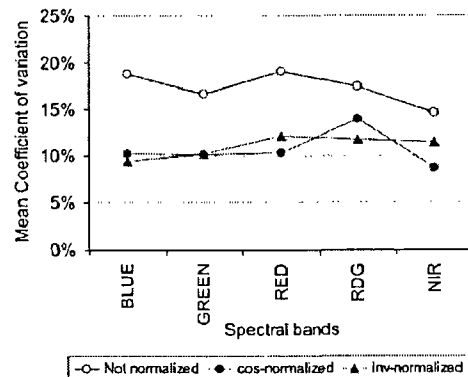
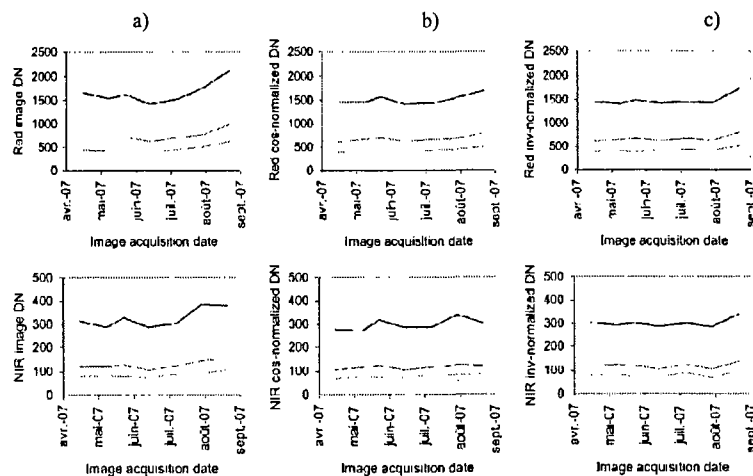


Figure 12. Radiometric values (DN) of artificial invariant target signals in the Red and Near Infrared bands. Comparison of (a) uncorrected values, (b) cosine-corrected values and (c) invariant-corrected values.



4.3. Effect of the radiometric correction level on the assessment of crop parameters

To assess the impact of the radiometric correction on vegetation monitoring, we tested the quality of regressions obtained between NDVI and chlorophyll content (CC). Figure 13 shows four regressions obtained with NDVI calculated for images that are corrected using four different levels of radiometric correction. The images were extracted from the temporal data set acquired over La Mare site in 2007 at 600 m altitude (Figure 6). The four levels of radiometric correction are:

- NDVI_jpg, calculated from the Red and NIR bands extracted from the JPEG images. The JPEG images are downloaded directly from the camera, and the spectral bands are split using image processing software.
- NDVI_raw, calculated from the spectral bands extracted from the decoded unprocessed images.
- NDVI_raw+dev, calculated from spectral bands extracted from the decoded unprocessed images, and corrected from the vignetting effect.
- NDVI_raw+dev+norm, calculated from spectral bands extracted from the decoded unprocessed images, corrected from the vignetting effect, and normalized over time using the invariant method.

As observed in other studies [23], the relationship between NDVI and CC was curvilinear due to NDVI saturation at high LAI values [31]. The point scattering is due to local soil condition variability, and plant measurement inaccuracy (essentially due to the destructive sampling method and the interpolation between dates). Despite the variability, the four regressions can be compared. The key conclusion is that there is no clear advantage between the use of NDVI_jpg, NDVI_raw and NDVI_raw+dev+norm ($r^2 = 0.65$, $r^2 = 0.63$, and $r^2 = 0.65$ respectively). Only the NDVI_raw+dev shows a better relationship with CC ($r^2 = 0.72$). We reached the same conclusions when NDVI was replaced by GNDVI (Figure 14), with a more significant effect of the vignetting correction ($r^2 = 0.71$ with NDVI_raw+dev, r^2 between 0.57 and 0.6 for other corrections). When NDVI is replaced by VIgreen (Figure 14), the correction levels were similar, with a slight superiority for the vignetting correction ($r^2 = 0.67$).

The absence of an effect from decoding unprocessed images can be explained by two factors. First, the DN values of the vegetation were low in the visible image (strong radiation was absorbed by the vegetation) and in the NIR (resulting from under-exposure of the camera). With DNs of below 200 (Figure 7), the vegetation pixel values were situated in the linear part of the gamma-type correction function embedded in the camera. Second, the DN values were calculated on a polygon basis and therefore the spatial interpolation of the JPEG images did not impact the mean radiometric value. For other types of target, with high radiometric values, our conclusions would be different, and a significant effect of RAW conversion correction would be expected.

In conclusion, the vignetting correction is the only correction that significantly improves the quality of the vegetation indices when a visible (red or green) and a Near Infrared band are used. When two visible bands are incorporated into a vegetation index (VIgreen for example), the vignetting correction is less pronounced. This is because the NIR and visible bands were derived from different cameras with different vignetting functions (Figure 9), while the Red and Green images were acquired using the same optics.

We were surprised to note that the normalization of the spectral bands prior to the calculation of the vegetation index reduced the quality of the relationship. Normalization is a difficult operation with various sources of errors (image registration error, photo-interpretation error, etc.). When individual bands (Red or NIR) are related to vegetation parameters, the relationships are improved by the normalization step (data not shown). In the case of vegetation indices, the radiometric errors of the individual bands are summed, resulting in a very variable result.

Figure 13. Fitted exponential functions between the Chlorophyll Content (LAI*SPAD) and NDVI for the 36 experimental plots across six dates. NDVI is calculated from the Red and NIR images at different levels of radiometric corrections (jpg = JPEG format; raw = unprocessed format; dev = vignetting-corrected; norm = normalized by invariant targets).

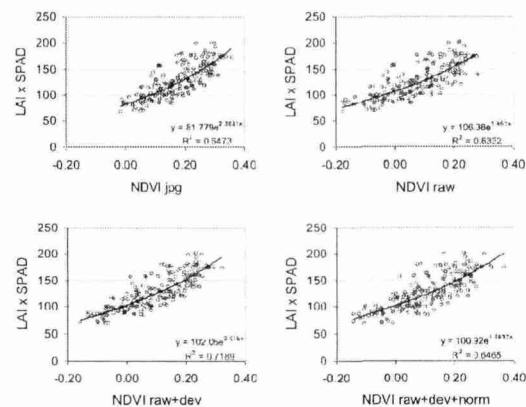
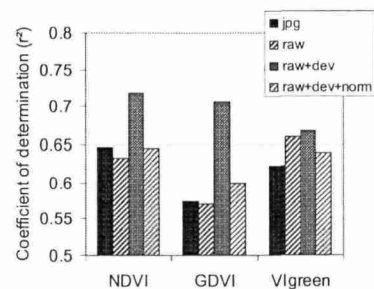


Figure 14. Coefficient of the regression functions between CC (LAI*SPAD) and three vegetation indices (36 experimental plots across six dates). VIs are calculated from the Red, Green and NIR images at different levels of radiometric correction (jpg = JPEG format; raw = unprocessed format; dev = vignetting-corrected; norm = normalized by invariant targets).



5. Discussion

In this paper, we tested a simple method of radiometric correction of a series of images acquired over time with three digital consumer cameras onboard a light aircraft. Two out of the three cameras were modified in order to measure radiation in bands other than the default RGB. The quality of the radiometric correction was evaluated against a ground data set of biophysical variables that were independently acquired from sugarcane trials on Reunion Island. The sources of radiometric distortions were both camera-related (image format and vignetting) and environment-dependent (incident radiation).

The modification of digital cameras to allow acquisition in the near infrared band is not new. In 2002, [32] captured infra-red images using a filter over the camera lens to block energy in the visible bands, and by using the residual sensitivity of the silicon CCD array in near-infrared wavelengths. Today, modern digital cameras are equipped with an efficient infra-red blocking filter that has to be removed before blocking the visible band [7-14]. We showed in this paper that the use of an external band-pass filter allows us to acquire images in any spectral band from 400 nm to 900 nm. However, in that configuration, particular attention must be paid to the camera settings since the energy captured by the CCD is lower than in the unmodified camera (narrower band or reduced spectral sensitivity in the near-infrared). This leads to a requirement for longer exposure times with the result that data acquisition becomes susceptible to interference as a result of aircraft speed and vibration frequencies.

In theory, there are two reasons to use unprocessed images instead of JPEG or TIFF images: JPEG compression is lost and the DN's are not linear with the brightness of the scene. However, our results show that the image format (JPEG versus unprocessed) has no effect on the correlation between a spectral band (or a vegetation index) and actual surface parameters. We showed our range of values for vegetation surface lies in the linear region of the tone mapping algorithm; this is particularly true for the Near Infrared images that were under-exposed. We did not observe saturation and the JPEG signal was proportional to the unprocessed signal. Furthermore, as we worked at the plot scale with averaged DN values of several pixels, the spatial interpolation due to the JPEG format, and the CFA interpolation, had no visible effect on the signal.

In respect of image vignetting, the effect was low on the vegetation indices that were calculated with visible bands only, but was high on the vegetation indices calculated with visible and infrared bands like the NDVI. To characterize and subsequently correct the vignetting effects, we developed an original method that is based only on the acquisition data set. Our method has the advantage that it remains usable even when the camera type is unknown or unavailable. However, our method does require a large series of different images with different acquisition and illumination scene conditions. Our results showed that 1. vignetting is still present in modern RGB digital cameras, and it can be modelled with a second-degree polynomial function, 2. modification of the camera increases the vignetting observed on the images as quantified by [14], and 3. at minimum, a fourth-degree polynomial function is necessary for modelling the vignetting on modified cameras. This spectrally-dependent distortion was responsible for the high sensitivity of the visible-infrared vegetation indices to vignetting.

Ultimately, the radiometric normalization between images still remains a problematic operation. Radiometric normalization using scene invariant targets and linear regression calculations for each

spectral band has the advantage that it takes into account variations in incident radiation in each band (this is not the case when using spectral indices [6]). But the invariant method is also more time consuming because it involves additional image processing. Artificial targets generally suffer from insufficient size (often the size is no larger than five pixels) and logistical constraints. Natural targets are generally not invariant, except in the case of bare soil or buildings that are not representative of the vegetation spectral range that we are interested in. In our case, the radiometric normalization using invariant points increased the noise of the vegetation indices because the errors in the Red and Near Infrared bands were cumulative. When working with individual spectral bands, we recommend using the solar zenith angle correction. This simplified radiometric correction is valuable because acquisitions are generally conducted under clear sky and at around midday, and they therefore are captured under similar atmospheric conditions. Furthermore, this method can be used only if the camera settings are manually adjustable and remain unchanged during the experiment. In case of change in camera settings, [33] developed a calibration method for using digital cameras as luminance meters that is independent of exposure settings.

The next step in our radiometric correction of time-based image series will be 1. to take into account the spectral variations in radiation due to atmospheric conditions, and 2. to correct for any directional effects [14].

6. Conclusions

The use of consumer digital cameras or webcams is increasingly prevalent in environmental applications. The acquisitions are generally performed with automatic settings and the images are saved in JPEG or TIFF formats. Under these conditions, image analysis can be qualitatively satisfying, but the accuracy of the image radiometry is generally too low to permit quantitative estimation of surface parameters.

We showed in this paper that, with a simple procedure, it is possible to increase the radiometric measurement capacity of images acquired by an ultralight aircraft. The use of modified cameras permits image acquisition in spectral bands that are not currently used in traditional photography, such as NIR, but that are important for accurate surface characterization. Using free software, we read the images in unprocessed camera output format to obtain spectral images that exhibited values close to the true radiance. These spectral images were corrected from the camera vignetting effect using an original method, and were normalized across acquisition dates. The results showed that the Normalized Vegetation Indices calculated from vignetting-corrected images are acceptable indicators for crop monitoring purposes.

In conclusion, for quantitative remote sensing of terrestrial surfaces, the use of commercial digital cameras will increase in the future, thanks to the versatility and multispectral capacities of the available acquisition systems. Their versatility is increased thanks to the flexibility and cost of various lightweight acquisition systems (Ultra-Light Aircraft or Unmanned Aerial Vehicles) that can transport this type of camera. Modifications to camera filters permit narrow-band acquisitions in the visible and in the near-infrared domains; these measurements could be used for example to calculate hyperspectral indices like the PRI (Photochemical Index). However, in cases where bands are too narrow, more investigation is yet required to avoid motion blur due to the speed and vibrations of the aircraft.

7. Acknowledgements

The ground data acquisition was performed with help from Marion Houles. The spectral characteristics of the digital cameras were measured in the ONERA laboratory in Toulouse, and we thank Mr Philippe Deliot for his assistance. This work is supported by the French Ministry of Agriculture (AgriDrone project) and the Reunion Region (V. Lebourgeois Fellowship).

References

1. Wee, A.G.; Lindsey, D.T.; Kuo, S.L.; Johnston, W.M. Color accuracy of commercial digital cameras for use in dentistry. *Dent Mater* **2006**, *22*, 553-559.
2. Stevens, M.; Parraga, C.A.; Cuthill, I.C.; Partridge, J.C.; Troscianko, T.S. Using digital photography to study animal coloration. *Biol J Linn Soc* **2007**, *90*, 211-237.
3. Jafri, M.Z.M.; Abdullah, K.; Lim, H.S.; Ismail, W.R. Mapping of total suspended solids in reservoir using images captured by a conventional digital camera from a low-altitude light aircraft. In Proceedings of SPIE's Third International Asia-Pacific Environment Remote Sensing Symposium, Hangzhou, China, 24-26 October 2003, **2003**; pp. 320-325.
4. Lejot, J.; Delacourt, C.; Piegay, H.; Fournier, T.; Tremelo, M. L.; Allemand, P. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surf Process Landf* **2007**, *32*, 1705-1725.
5. Crimmins, M.A.; Crimmins, T.M. Monitoring plant phenology using digital repeat photography. *Environ Manage* **2008**, *41*, 949-958.
6. Richardson, A.D.; Jenkins, J.P.; Braswell, B.H.; Hollinger, D.Y.; Ollinger, S.V.; Smith, M.L. Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. *Oecologia* **2007**, *152*, 323-334.
7. Jensen, T.; Apan, A.; Young, F.; Zeller, L. Detecting the attributes of a wheat crop using digital imagery acquired from a low-altitude platform. *Comput Electron Agric* **2007**, *59*, 66-77.
8. Johnson, L.F.; Bosh, D.F.; Williams, D.C.; Lobitz, B.M. Remote sensing of vineyard management zones: Implications for wine quality. *Appl Eng Agric* **2001**, *17*, 557-560.
9. Hunt, E.R., Jr.; Cavigelli, M.; Daughtry, C.S.T.; Mc Murtrey, J.E.; Walthall, C.L. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. *Precision Agric* **2005**, *6*,
10. Vanamburg, L.K.; Trlica, M.J.; Hoffer, R.M.; Wetz, M.A. Ground based digital imagery for grassland biomass estimation. *Int J Remote Sens* **2006**, *27*, 939-950.
11. Mobasheri, Chahardoli, M.; Jokar, J.; Farajzadeh, M. Sugarcane phenological date estimation using broad-band digital cameras. *Am J Agric Biol Sc* **2008**, *3*, 468-475.
12. Cescatti, A. Indirect estimates of canopy gap fraction based on the linear conversion of hemispherical photographs - Methodology and comparison with standard thresholding techniques. *Agr For Meteorol* **2007**, *143*, 1-12.
13. Kuusk, A.; Paas, M. Radiometric correction of hemispherical images. *ISPRS-J Photogram Remote Sens* **2007**, *61*, 405-413.

14. Lelong, C.C.D.; Burger, P.; Jubelin, G.; Roux, B.; Labbé, S.; Baret, F. Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots. *Sensors* **2008**, *8*, 3557-3585.
15. Johnson, L.F.; Herwitz, S.R.; Lobitz, B.M.; Dunagan, S.E. Feasibility of monitoring coffee field ripeness with airborne multispectral imagery. *Appl Eng Agric* **2004**, *20*, 845-849.
16. Sugiura, R.; Noguchi, N.; Ishii, K. Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. *Biosyst Eng* **2005**, *90*, 369-379.
17. Withagen, P.J.; Groen, F.C.A.; Schutte, K. CCD color camera characterization for image measurements. *IEEE Trans Instrum Meas* **2007**, *56*, 199-203.
18. Zheng, Y.; Lin, S.; Kang, S.B. Single-image vignetting correction. In Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, New York, US, 17-22 June 2006, **2006**; pp. 461-468.
19. Goldman, D.B.; Chen, J.-H. Vignette and Exposure Calibration and Compensation. In Proceedings of the Eleventh IEEE International Conference on Computer Vision, Beijing, China, October 2005, **2005**; pp. 899-906.
20. Déliot, P.; Duffaut, J.; Lacan, A. Characterization and calibration of a high-resolution multi-spectral airborne digital camera. In Proceedings of the 20th Congress of the International Commission for Optics, Changchun, China, 21-25 August 2005, **2005**; pp. 603104:1-603104:10.
21. Labbé, S.; Roux, B.; Bégué, A.; Lebourgeois, V.; Mallavan, B. An operational solution to acquire multispectral images with standard light cameras: Characterization and acquisition guidelines. In Proceedings of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing Workshop, Newcastle, United-Kingdom, 11 - 14 September 2007, **2007**, pp. TS10:1-TS10:6.
22. Lebourgeois, V.; Bégué, A.; Martiné, J.-F. Sensitivity of airborne-derived crop water deficit indices to the cropping practices. In Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering & Industry Exhibition, Hersonissos, Crete, Greece, 23-25 June 2008, **2008**.
23. Serrano, L.; Filella, I.; Penuelas, J. Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Sci* **2000**, *40*, 723-731.
24. Hinzman, L.D.; Bauer, M.E.; Daughtry, C.S.T. Effects of nitrogen fertilization on growth and reflectance characteristics of winter wheat. *Remote Sens Environ* **1986**, *19*, 47-61.
25. Yu, W. Practical anti-vignetting methods for digital cameras. *IEEE Trans Consum Electron* **2004**, *50*, 975-983.
26. Schott, J.R.; Salvaggio, C.; Volchok, W.J. Radiometric scene normalization using pseudoinvariant features. *Remote Sens Environ* **1988**, *26*, 1-16.
27. El Hajj, M.; Bégué, A.; Lafrance, B.; Hagolle, O.; Dedieu, G.; Rumeau, M. Relative Radiometric Normalization and Atmospheric Correction of a SPOT 5 Time Series. *Sensors* **2008**, *8*, 2774-2791.
28. Rouse, J.W.; Hass, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS Tech. Report No. Accession Number: 74N30727; Document ID: 19740022614. NASA Center, **1974**.
29. Gitelson, A.A.; Kaufman, Y.J.; Merzlyak, M.N. Use of green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens Environ* **1996**, *58*, 289-298.

30. Gitelson, A.A.; Kaufman, Y.J.; Stark, R.; Rundquista, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sens Environ* **2002**, *80*, 76-87.
31. Asrar, G.; Fuchs, M.; Kanemasu, E.T.; Hatfield, J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. *Agron J* **1984**, *76*, 300-306.
32. Milton, E.J. Low-cost ground-based digital infra-red photography. *Int J Remote Sens* **2002**, *23*, 1001-1007.
33. Wuller, D.; Gabele, H. The usage of digital cameras as luminance meters. In Proceedings of the SPIE Digital Photography III Conference, San Jose, CA, US, Jan 29-30 2007, **2007**; pp. 650201:1-650201:11.

© 2008 by the authors; licensee Molecular Diversity Preservation International, Basel, Switzerland.
This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>).

Sensitivity of airborne-derived crop stress indices to the agricultural practices

Lebourgeois Valentine¹⁾, Bégue Agnès²⁾, Martiné Jean-François¹⁾

¹⁾ CIRAD, UPR Systèmes de Culture Annuels, Chemin de Grand Canal, BP 20, 97 408 Saint Denis Messagerie Cedex 9, La Réunion - France, valentine.lebourgeois@cirad.fr

²⁾ CIRAD, UMR TETIS, Maison de la télédétection, 500 rue J-F Breton, 34 093 Montpellier Cedex 5, begue@cirad.fr

Abstract

When acquired both in optical and thermal infrared domain, remotely sensed data can provide a wide range of information about the status of a crop. Several studies have demonstrated the utility of such information for the development of stress indices that can be related to water, nitrogen or global physiological status of the plant.

In this paper, we investigate the relationships between crop biophysical parameters (LAI, SPAD, Humidity) and two airborne-derived spectral indices (NDVI: Normalized Vegetation Index, and CSI: Crop Stress Index) under different agricultural practices in terms of water treatment, nitrogen input and cultivar for sugarcane crop. We then discuss of the potentialities of the combined use of these two indices for a better understanding of crop status.

Introduction

Variable-rate technologies and site-specific crop nutrient or water management require real-time spatial information about the potential for response to in-season crop management interventions. Thermal and spectral properties of canopies can provide relevant information for non-destructive measurement of crop stresses. Thanks to the development of numeric cameras and the miniaturisation of the thermal sensors, remote sensing methods are now easier to implement for operational monitoring.

Nitrogen or water status of the plants has an effect on the spectral and thermal response of the canopy. Nitrogen status affects the leaves' chlorophyll content (Penuelas and Filella, 1998) altering the canopy reflectance in the red band (chlorophyll absorption band). Water status affects the leaf transpiration resulting in changes in the leaf temperature - this mechanism is also valid when the canopy is considered as a whole (Idso and Baker, 1967). In consequence, plant temperature has long been recognized as having potential to determine the water status of crops (Idso, 1982; Jackson et al., 1981). Any stress occurring over long periods of time will also affect the crop development (vegetation cover, LAI) and

can be observed in the red, near-infrared (Ripple and Schrumpp, 1987; Penuelas et al., 1993) and thermal bands.

For crop monitoring, spectral measurements are generally made to develop indicators. Well known, the Normalized Difference Vegetation Index - NDVI (Rouse et al. 1973), based on near infrared and red reflectance measurement, is an indicator of the photosynthetic activity of the vegetation. More Recently, (Rodriguez et al. 2005) proposed a Canopy Stress Index - CSI, based on the difference between the canopy temperature (T_c) and the air temperature (T_a), normalised by vapour pressure deficit (VPD).

Few studies have focus on the effect of cultural practices on canopy temperature-derived stress indices. When applied at field scale, new questions emerged such as the sensitivity of such a index to cropping practices (cultivar and nitrogen input).

To respond to this question, in 2007, an experiment was conducted in Reunion (an overseas French department in the Indian Ocean) over sugarcane trials conducted with different practices (variety, irrigation, nitrogen). Visible, Near Infrared and Thermal Infrared measurement were acquired using an ultra-light aircraft, and used to derive crop stress indices. These indices were related to ground measurement in order to quantify their stability through time, and to test their sensitivity to various cropping practices.

Materials and methods

The investigation took place in Reunion Island, over a 5 ha sugarcane experimental field. From May to September 2007, seven airborne campaigns coupled with ground measurements were conducted.

Study site description

The sugarcane experimental field is located in La Mare, Sainte Marie, in the northern part of Reunion Island. Two cultivars (R579 and R570) were combined with three nitrogen inputs (noted 0/N, 65/N, 130/N in kg ha^{-1}) under two water treatments (irrigated or rainfed) making twelve treatments in a randomized block design with three replicates. For each combination of treatments (variety, nitrogen, irrigation), the size of the plot in the blocks was 135 m^2 and was made up of five rows each of 18 m length with a 1.5 m inter-row distance (Fig.1)

The sugarcane field was in the 5th ratoon and in the 7th month of growth when the experiment began. In the study area the mean annual rainfall amount is 1514 mm. On the irrigated blocks, the irrigation stopped on 5 September.

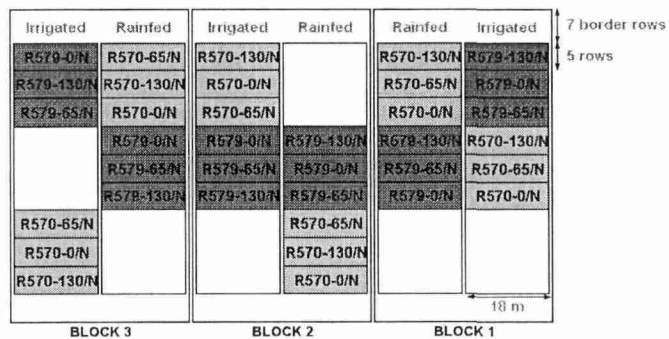


Fig.1 – Layout of the experimental field

Crop, radiometric and weather in-situ measurements

Crop measurements were done on the 36 trial plots, monthly, but not simultaneously with the airborne acquisitions. In order to not damage the crop, remotely studied, we carried out less possible destructive measurements.

The nitrogen status was estimated by measuring the chlorophyll content of the leaves with an optical chlorophyll-meter (SPAD-502, Konica Minolta). A relative green leaf area index (LAI) was calculated thanks to an algometric relationship linking the area of the leaves to the stalk heights and the number of green leaves. At last, humidity was approached using sheaths water content measurements.

In order to correct the atmospheric effects on thermal infrared airborne acquisitions, ground surface temperature data were acquired simultaneously with airborne acquisitions on cold (sugarcane canopy), hot (dark cloth) and intermediate (grassy road) targets using a handheld infrared thermometer (KT19, Heitronics). Due to the height of the sugarcane, this thermometer was mounted on a mast for vertical acquisitions over the canopy to avoid angular variation between airborne and *in situ* measurements.

During the airborne acquisitions, the air temperature and relative humidity were recorded at 5 min intervals in a data logger. The daily rainfall and global radiation were obtained from a weather station located near the experimental site (Fig.2)

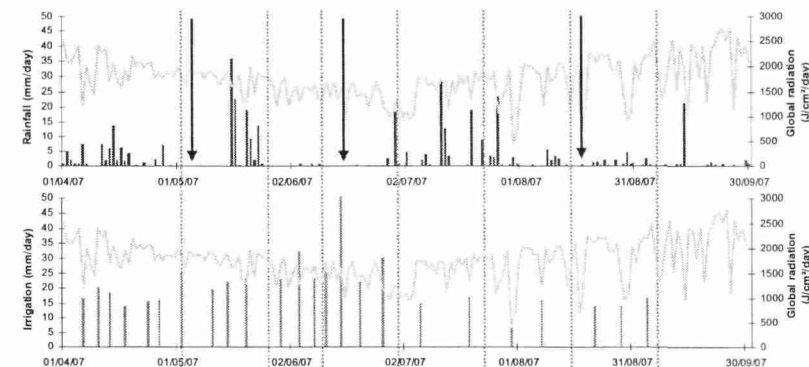


Fig.2 – Daily sum of global radiation and rainfall/irrigations during the experiment (La Mare, CIRAD). Grey dotted lines show the airborne acquisition dates. Red arrows locate dry periods.

On 24th September, date of field harvest, the final yield was collected for each plot.

Airborne acquisition system

The data acquisition system consisted of an ultra light aircraft equipped with sensors that measured the sunlight reflected in four different spectral bands and the radiation emitted by the Earth surface.

To measure the radiometric signal in the visible RGB spectral bands (Red, Green and Blue), a commercial camera (EOS 400D, CANON) was used. Same type of camera was adapted and equipped with a 710 - 855 nm band pass filter (LDP LLC XNiteBPG) to measure the radiation in the Near Infrared (NIR) spectral band. The settings of the two cameras (aperture, shutter speed, and sensitivity) were unchanged throughout the experiment.

The radiation emitted by the canopy was also measured using a micro-bolometer thermal infrared (TIR) camera (B20 HSV, FLIR). The radiance, detected over the 7.5 - 13 μ m spectral band, is expressed in temperature, assuming a target emissivity of 1. The system provides 240 x 320 pixels images with a radiometric resolution of 0.1°C and an absolute precision of 2°C.

Seven airborne data sets were acquired between May and September with identical cameras tuning. The images were acquired in vertical mode over the experimental field, at different altitudes recorded by a GPS (from 300 m to 1200 m) between 11:00 and 12:00 a.m solar

time. At 600 m, the ground resolution of the images was 10 cm for those taken in the visible and near infrared bands and 65 cm for those acquired in the thermal band.

Data processing

Remotely sensed data

Several processing steps are necessary to retrieve comparable values of pixel under space and time. The corrections concern the geometry and the radiometry of the images and are due both to the sensor itself and to the acquisition conditions.

The geometric distortions of the CANON cameras were very low (Pierrot-Desseilligny 2008) and consequently no geometric correction was applied.

Radiometric corrections of RGB and NIR Images

The signal measured by a numeric camera is not linear to the radiance of the target. Furthermore, the incoming radiation varies from one date to the other. In order to compare the digital counts measured all along the season, camera embedded radiometric interpolation, vignetting distortion, and incident radiation variations were corrected using methodologies presented by (Labbe et al. 2007).

Radiometric corrections of TIR Images

The thermal signal measured by the camera is a mix of the target signal and the atmosphere signal. In order to remove the atmospheric noise, we used transfer functions established between the soil and the aircraft temperature measurements, for each acquisition date and each altitude (Lebourgeois et al. 2008).

Calculation of indices

Indices were calculated from images acquired at 600 m altitude.

According to (Rodriguez et al. 2005), and based on the work of (Idso et al. 1981) and (Idso 1982), the canopy stress index is defined as the difference between canopy (T_c) and air temperature (T_a), normalized by vapour pressure deficit (VPD):

$$CSI = (T_c - T_a) / VPD \text{ (}^\circ\text{C/kPa)}$$

As well as water inputs, a lot of factors can cause stomatal closure and thus have consequences on the canopy temperature, like for example nutrient shortages (Broadley et al. 2001; Radin et al. 1985). Consequently, the CSI is an index of the general physiological status of the crop, expected to be positive and high when plant is under stress.

From Red and NIR acquisitions, we derived the normalised difference vegetation index (Rouse et al. 1973):

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R}$$

where R and PIR are the reflectances recorded by the sensors in the red and near infrared spectral bands respectively. In our case, the index is calculated using the digital numbers recorded by the cameras in these two spectral bands, normalized as described previously.

Both influenced by leaf chlorophyll content and canopy development, the NDVI is an indicator of the photosynthetic activity of the vegetation.

The mean NDVI and CSI for each plot were then calculated after subtracting one metre buffer from the original edge of the plot polygon to eliminate mixed border pixels.

Results and discussions

Crop parameters (Fig.3)

For irrigated crop, the quasi stability of the LAI values indicates that crop growth is almost finished. For high nitrogen inputs (65/N – 130/N), the crop was even fully covered from the beginning of the experiment (LAI above 4.5). For rainfed plots, the vegetation continues its growth up to end of august. The effects of the nitrogen treatment, water treatment, and cultivar are strong. The LAI difference is about 1 point between the lowest and highest nitrogen treatments during the whole experiment. The same difference is observed for water treatments at the beginning of the experiment. Values of LAI for R579 cultivar are always higher than those of R570 for irrigated treatment. The opposite effect is observed for rainfed treatment, showing a higher sensitivity of R579 to water treatment, while R570 is more tolerant.

SPAD observations are logically strongly influenced by nitrogen inputs with high values for the highest nitrogen treatments. Differences can also be observed between irrigated and rainfed treatments with a higher temporal variation and lower SPAD values for rainfed plots. SPAD records of rainfed plots are also marked by two dry periods (Fig.2). No cultivar effect is noticed. However, all figures show a decrease in SPAD values with time whatever the treatment (effect of plant senescing).

Sheath humidity varies with water inputs but also decrease with time due to plant physiology changes. For rainfed treatments, the decrease is punctuated with dry events.

These results are in agreement with most of the studies and easily explained by the plant physiology.

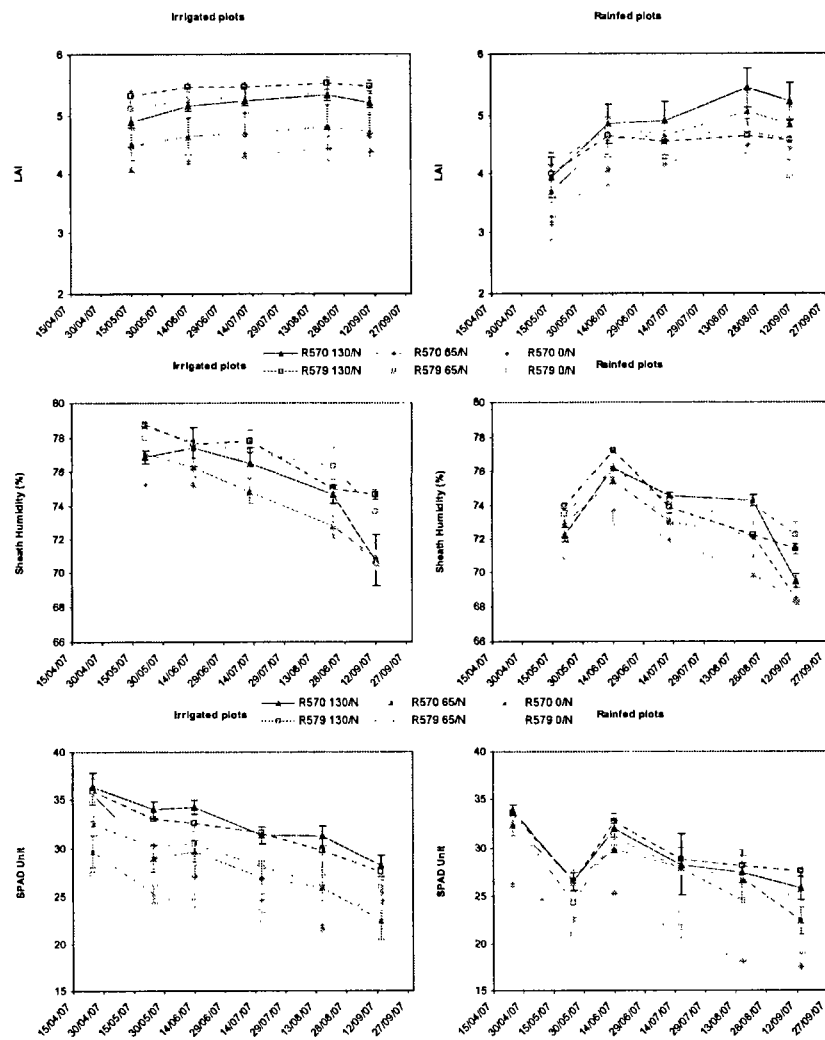


Fig.3 – Evolution of biophysical parameters (LAI, sheath humidity, SPAD) for each combination of "cultivar / nitrogen input" under irrigated (left) and rainfed (right) mode. Error bars indicate $\pm 1/2$ standard deviation of the mean ($n = 3$).

Radiometric measurements (Fig.4)

In this part, the links between airborne-derived indices and crop parameters are discussed. Figure 4 presents the evolution of NDVI and CSI through time during the experiment.

For NDVI, a high variability between the different treatments is observed. The effect of water is important, resulting in a decrease of 0.15 NDVI between irrigated and rainfed crops for all dates. The significant difference in NDVI values for the three nitrogen treatments shows a high relation between the crop nutrition and the radiometric index. This effect is strongly marked for 0/N treatment for which values of NDVI are very low.

A cultivar influence can be noticed, but it appears less significant than those of nitrogen or water.

For all the combinations of treatments and cultivar, the temporal evolution of the NDVI shows an increase at the beginning of the experiment, followed by a general decrease (senescence) until the harvest. For rainfed plots, the end of increase period occurs later than for irrigated plots, and the decrease tends to be marked by accidents due to dry (decrease of NDVI) or rainy (increase of NDVI) periods (see Fig.2).

Concerning CSI, the effect of cultivar is not apparent. The main parameter that affects the index is the water status. CSI is always higher for rainfed plots, varying according to an alternation of rainy and dry periods (Fig.2).

For irrigated plots, CSI is stable through time, except an accident for the August acquisition. This increase of CSI is due to a reduction of the irrigation frequency coupled with a dry period. In July, the same irrigation frequency is observed, but it has been compensated by rainfalls (Fig.2) resulting in a stabilization of the CSI.

The effect of nitrogen treatments is not really marked, but for each acquisition date, CSI for 0/N treatments is always a little higher than other nitrogen treatments.

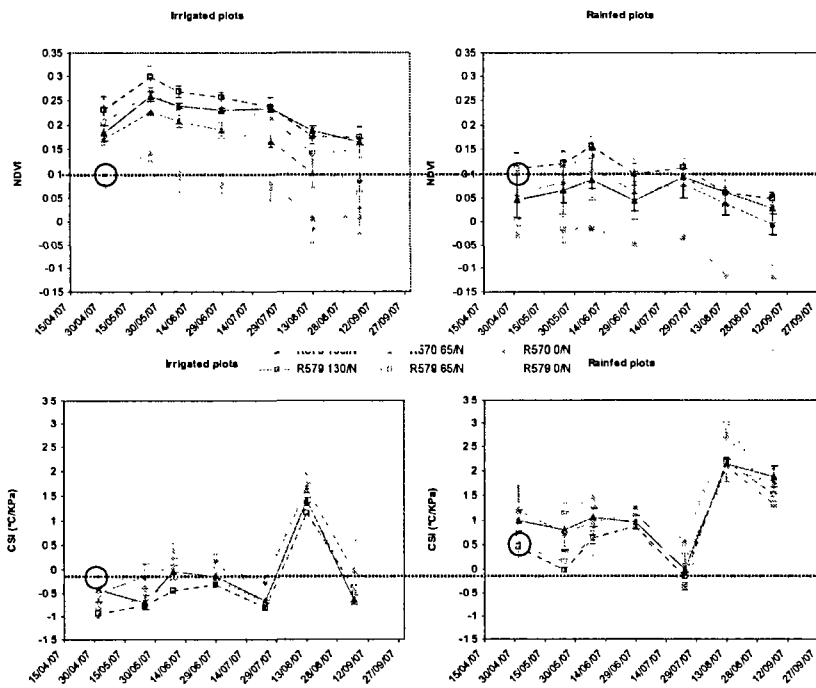


Fig.4 – Evolution of NDVI and CSI for each combination of "cultivar / nitrogen input" under irrigated (left) and rainfed (right) mode. Error bars indicate $\pm 1/2$ standard deviation of the mean ($n = 3$).

Another way to describe and explain NDVI and CSI variations is by making multiple linear regression analysis between the indices and the biophysical crop parameters. Concerning NDVI, results (Table.1) show that NDVI is more responsive to the LAI until the end of the growth period (end of July), and then to SPAD during senescence stage. The sensitivity of NDVI to humidity is lower. At the beginning of the experiment, the NDVI is thus sensitive to increase of foliage. Then, during maturation, the leaf color becomes the main illustrative factor.

For CSI, as for NDVI at the beginning of the experiment, the LAI is the main illustrative variable. Then, when vegetation is, for the majority of treatments, fully developed (LAI above 4.5), the CSI becomes more sensible to humidity. No sensitivity to SPAD is noticed.

NDVI	25/05/07	08/06/07	29/06/07	23/07/07	13/08/07	05/09/07	all dates
LAI	87.7%	8.2%	74.4%	71.1%		16.6%	12.2%
Humidity							
y	7.9%	18.0%	25.6%	21.6%	11.2%	7.2%	12.0%
SPAD	4.4%	73.8%		7.3%	88.8%	76.2%	75.8%
R ²	0.89	0.85	0.80	0.82	0.74	0.81	0.78

Table.1 – Results of the multiple linear regression analysis for NDVI.

CSI	25/05/07	08/06/07	29/06/07	23/07/07	13/08/07	05/09/07	all dates
LAI	85.2%	80.7%	11.8%	24.4%	76.1%		16.2%
Humidity							
y	14.8%	19.3%	88.2%	75.6%	23.9%	100.0%	83.8%
SPAD							
R ²	0.80	0.72	0.68	0.75	0.50	0.26	0.31

Table.2 – Results of the multiple linear regression analysis for CSI.

Figure 6 summarise the relationships between NDVI or CSI and the two main illustrative variables for each index.

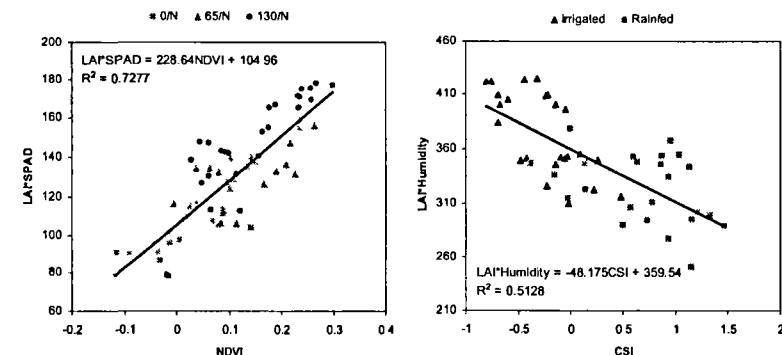


Fig.5 – Relationships between NDVI and LAI*SPAD (left) and between CSI and LAI*Humidity (right).

The following figure shows examples of the spatial distribution of NDVI and CSI of the experimental field for 3 dates. At the beginning of the experiment (2 May – Fig.), when both NDVI and CSI are influenced by LAI, the spatial patterns of the two indices corresponds for water treatments with highest NDVI corresponding to lowest CSI. However, less variability is

observed on CSI images between the different nitrogen treatments or cultivar. On 8 August, as both irrigated and rainfed treatment are under water stress, CSI is high for all combinations of treatments.

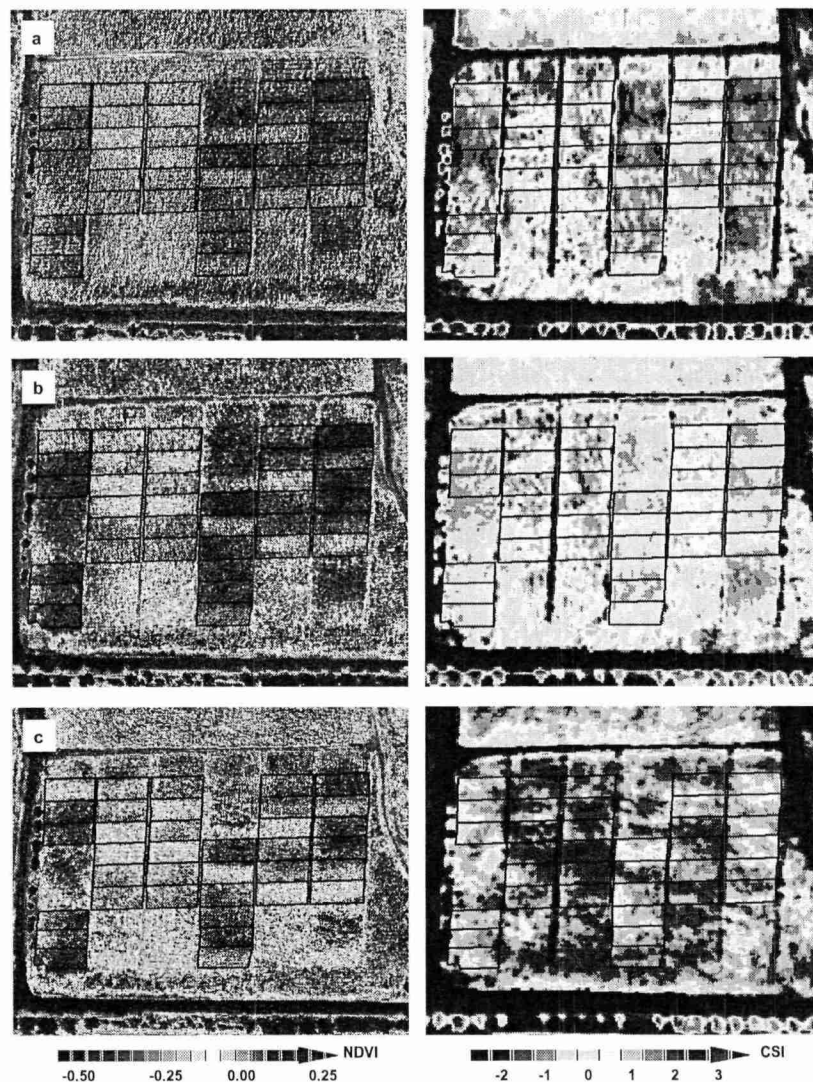


Fig.5 – Images of NDVI (left) and CSI (right) for 3 dates: 2 May (a), 29 June (b) and 8 August (c).

Combination of the two indices

As seen previously, NDVI and CSI present a different sensitivity to crop biophysical parameters. Both indices are logically influenced by LAI, but NDVI is more sensitive to leaf color (SPAD), while for CSI, the humidity prevails. The combined use of these two indices can thus provide new information for a better understanding of crop status. For example, in figure 4, one can see that for a given date, a same value of NDVI (red dotted line) can be induced by different combination of cropping practices (black circle): "R570 – Irrigated – 0/N" or "R579 – Rainfed – 130/N". However, for the same date, the CSI is different for those two combinations of treatments and is higher for rainfed crop, allowing the identification of a stress due to a lack of water.

Conclusion

New technologies and advancement in remote sensing sensors provide nowadays a wide range of ways to help on crop management. Understanding crop response to different agricultural practices is a key point for a better interpretation of remotely sensed-derived stress indices.

The preliminary results of our study show the necessary combination of optical and thermal indices for identification of stress causes.

In following steps, we will focus on consequences of cropping practices on the concept of Vegetation Index/Temperature (VIT) (Moran et al., 1994) that allows the application of the Crop Water Stress Index (CWSI) (Jackson et al., 1981) for partially covered canopies.

Acknowledgments

This work has been supported by the French Ministry of Agriculture (AgriDrone Project), and Reunion Region (V. Lebourgeois fellowship).

References

- Broadley, M.R., Escobar-Gutierrez, A.J., Burns, A., & Burns, I.J. (2001). Nitrogen limited growth of lettuce is associated with lower stomatal conductance. *New Phytologist*, 152, 97-106
- Idso, S.B. (1982). Non-water-stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27, 59-70

- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., & Hatfield, J.L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45-55
- Labbe, S., Roux, B., Lebourgeois, V., & Bégué, A. (2007). An operational solution to acquire multispectral images with standard light cameras: spectral characterization and acquisition guidelines. In, ISPRS workshop - Airborne Digital Photogrammetric Sensor Systems. Newcastle (England)
- Lebourgeois, V., Labbé, S., Bégué, A., & Jacob, F. (2008). Atmospheric corrections of low altitude thermal airborne images acquired over a tropical cropped area. In, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. China
- Pierrot-Desseilligny, M. (2008). Unpublished work - Cemagref, Montpellier (France). In. Montpellier (France): Cemagref
- Radin, J.W., Mauney, J.R., & Guinn, G. (1985). Effects of N fertility on plant water relations and stomatal responses to water stress in irrigated cotton. *Crop Science*, 25, 110-115
- Rodriguez, D., Sadras, V.O., Christensen, L.K., & Belford, R. (2005). Spatial assessment of the physiological status of wheat crops as affected by water and nitrogen supply using infrared thermal imagery. *Australian Journal of Agricultural Research*, 56, 983-993
- Rouse, J.W., Hass, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In proceedings of the 3rd ERTS Symposium, 309-317

Atmospheric corrections of low altitude thermal infrared airborne images acquired over a tropical cropped area

Lebourgeois, V., Labbé, S., Bégué, A., Jacob, F.

Introduction

This study focuses on simple atmospheric corrections of airborne thermal infrared imagery for precision farming management in tropical areas.

Surface temperature of canopy is known to be strongly related with the water status of the crop and is widely used for development of water deficit indices (Jackson et al., 1981, Moran et al., 1994). Several factors affect the thermal infrared response of a vegetative canopy as its temperature is both determined by external environmental factors and by internal plant factors (Boissard et al., 1999).

The availability of bolometric cameras at affordable price used in combination with ultralight aircraft or unmanned aerial vehicle pave the way for new water stress survey methods in precision farming applications.

When remotely sensed, the thermal infrared signal emitted by the crop has to be corrected for atmospheric effects (Jimenez-Munoz, 2006). This correction can be calculated using radiative transfer models and need accurate measurements of many parameters at different layers between the target and the sensor as the temperature, pressure, and chemical composition of the atmosphere in aerosols and molecular gases (Jacob and al 2004). But these atmospheric parameters need radiosoundings profiles with complex sensors and are more often unavailable. Moreover, in tropical zones, changes of low-altitude atmospheric conditions can occur rapidly and near real-time parameters should be taken into account for a good estimation of the atmospheric effect in the temperature measurement.

This paper presents a simple method to estimate approximately the transfer function that corrects the atmosphere effect on the thermal measurement using on board cost effective sensors. This empirical method assumes that the thermal signal measured by the camera is a mix of an attenuated part of the emitted signal from the crop and the own particular atmospheric signal. The proportions in this mix are derived from on-board atmosphere temperature and relative humidity measurements. Assessment of this method is made using two approaches: comparing to truth-ground acquisitions, and using an atmospheric radiative transfer model MODTRAN: MODerate spectral resolution atmospheric TRANsmittance .

The experiment was conducted in Reunion Island (a French tropical overseas department located in the Indian Ocean), over sugarcane fields during 5 month in 2007.

Data acquisition

Airborne and ground acquisitions have been done twice a month around mid-day in order to obtain a large contrast of temperature between cold and hot parts of the observed site.

The airborne acquisition system

The airborne acquisition system consisted of an Ultra Light Aircraft equipped with a B20 HSV FLIR micro-bolometer thermal infrared camera. The radiance, detected over the 7.5 – 13 μm spectral interval, is expressed in temperature, assuming a target emissivity of 1. The system provides 240 pixel x 320 pixel images with a radiometric resolution of 0.1°C and an absolute precision of 2°C.

To achieve the meteorological and location measurements, a temperature and relative humidity probe coupled to a data logger were loaded in the Ultra-Light Aircraft, as well as a GPS that recorded the altitude and position during the flight.

These measurements are used to generate a temperature and relative humidity profile functions of altitude (figure 1).

Images were taken from 300 m to 1300 m in order to study the sensitivity of the signal to atmospheric transmissivity. Furthermore, the study campaign took place from may to September 2007 that allows acquisition of a wide range of sky conditions because of season effects which are very important in terms of humidity and temperature.

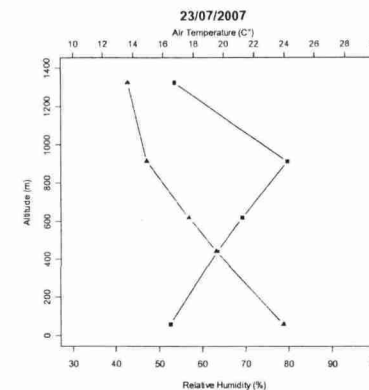


Figure 1: Example of an air temperature and relative humidity profile during a flight, on 27th July 2007.

Ground acquisition

Ground data were acquired simultaneously with airborne acquisitions on a cold (sugarcane canopy), hot (dark tissue) and intermediate (grassy road) targets (see example in figure 2) using a hand-held infrared thermometer HEITRONICS KT19. Due to the height of the sugarcane, this thermometer was mounted on a mast for vertical acquisitions over the canopy to avoid angular variation between airborne and in situ measurements.

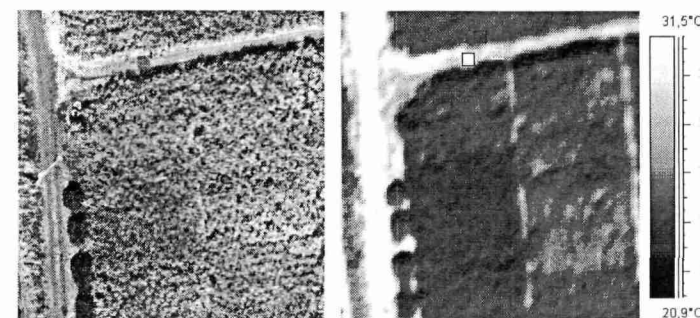


Figure 2: Location of the targets on a visible (left) and thermal infrared image (right) Targets are surrounded in red (hot), yellow (intermediate) and blue (cold) color.

In-situ meteorological factors (air temperature, relative humidity) were also collected using the same probe as the one previously mentioned.

Data analysis and results

First of all we tried to relate with a linear function the ground thermal infrared measurements with the airborne thermal images. Thus the mean temperature of each target was calculated in the image data set and compared with ground-truth measurements.

The linear regression shows (see example in figure 3) a variable slope decreasing with the altitude, linked to the attenuation of ground signal (hotter than the atmosphere). On the contrary, the constant term increases with the altitude, linked with the atmospheric signal proportion. For measured temperatures closer to air temperature,

altitude effects are lower as can be seen in figure 2 for cold targets (surrounded with blue color).

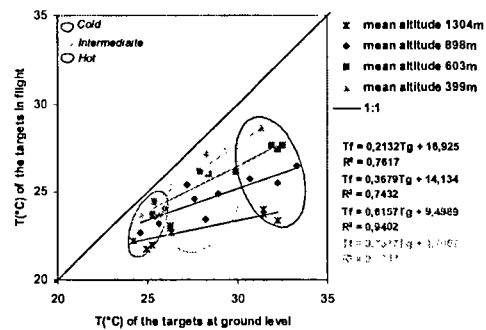


Figure 3: Relation between ground (Tg) and airborne temperature (Tf) measurements acquired on 27th July 2007 at different altitudes. Coloured circles indicate the type of target.

Same kind of relation is observed for the other acquisition dates. Thus, to calculate an estimation of the regression parameters, to allowing the retrieval of the ground temperature, it could be sufficient to acquire reference images at different altitudes.

To go further, we try to establish a more precise function between ground an airborne temperature measurement using sensors data. First results in the data analysis seem to give a major weight to the atmosphere temperature in the profile. Different simulations using MODTRAN are currently in process in order to assess these assumptions.

Conclusion

Results show that a simple approach based on combined use of ground and airborne data, or airborne data at different altitude can provide a good transfer function for correction of atmospheric effects. This simplifies the use of thermal imagery for water stress application in precision farming. Further analyses try to establish more precise algorithms using on-board temperature and humidity measurements.

References

- Berk, A., G. P. Anderson, et al. (1999). MODTRAN4 user's manual.
- Boissard, P., G. Guyot, et al. (1990). "Factors affecting the radiative temperature of a vegetative canopy." Applications of remote sensing in agriculture: 45-72.
- Jackson, R. D., S. B. Idso, et al. (1981). "Canopy temperature as a crop water stress indicator." Water Resource Research 17: 1133-1138
- Jacob, F; Petitcolin, F; Schmugge, T, et al.(2004) "Comparison of land surface emissivity and radiometric temperature derived from MODIS and ASTER sensors" Remote Sensing of Environment 90/2 137-152
- Jimenez-Munoz, JC; Sobrino, JA (2006) "Error sources on the land surface temperature retrieved from thermal infrared single channel remote sensing data" International Journal of Remote Sensing Vol 27/5-6 pp 999-1014
- Moran, M. S., T. R. Clarke, et al. (1994). "Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index." Remote Sensing of Environment vol 46/2 pp 246-263.

MAP1
AN AIRBORNE IMAGING SYSTEM FOR MAPPING SPATIAL VARIABILITY IN
SUGARCANE

By

V. LEBOURGEOIS¹, A. BÉGUÉ², S. LABBÉ³, AND B. ROUX⁴

¹CIRAD, UPR Systèmes Canniers
valentine.lebourgeois@cirad.fr

²CIRAD, UMR TETIS
agnes.begue@cirad.fr

³Cemagref, UMR TETIS
sylvain.labbe@teledetection.fr

⁴L'Avion Jaune
bruno.roux@lavionjaune.fr

KEYWORDS: sugarcane, NDVI, surface temperature, water, nutrient

Abstract

In order to develop a low-cost and easy to implement technical solution to map inside-field spatial variability and to explore its relationship with nutrient and water conditions of the sugarcane crop, an experiment was conducted, based on the use of an ultra-light aircraft, equipped with visible, near infrared and thermal infrared cameras. Very high resolution images were acquired above an experimental field in which irrigation and nitrogen treatments were controlled and measured for three different sugarcane varieties. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the surface temperature (Ts) of the experimental plots were calculated and used to interpret spatial variability in the field, in terms of growth responses to nitrogen and water treatments.

The preliminary results indicate that the techniques used can produce qualitative maps showing areas of variable cane growth conditions as influenced by nutrient and water in sugarcane fields.

A next step will involve combining canopy thermal and spectral properties to produce maps of the nutrient and water status of the crop, to enable the delineation of management zones inside the fields, and as a decision support tool to allow adjusting fertilization and water applications to the actual needs of each management zone.

Introduction

The interest in applications of remote sensing to agriculture is growing throughout the world (Pinter *et al.*, 2003). In Reunion Island, the sugarcane industry supports research on the use of such applications for crop monitoring.

Nitrogen or water status of the plants has an effect on the spectral and thermal response of the canopy. Nitrogen status affects the leaves' chlorophyll content (Penuelas and Filella, 1998) altering the canopy reflectance in the red band (chlorophyll absorption band). Water status affects the leaf transpiration resulting in changes in the leaf temperature - this mechanism is also valid when the canopy is considered as a whole (Idso and Baker, 1967). Any stress occurring over long periods of time affects the crop development (vegetation cover, LAI) and can be observed in the red, near-infrared (Ripple and Schrumppf, 1987; Penuelas *et al.*, 1993) and thermal bands.

For crop monitoring, spectral measurements are generally made to develop indicators: the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), as an indicator of the photosynthetic activity of the vegetation, and the surface temperature as an indicator of the water stress (Jackson *et al.* 1977; Idso *et al.*, 1978; Jackson *et al.*, 1981; Moran *et al.*, 1994).

Following a research project (Ribbes *et al.* 2002) whereby SPOT images were used to develop precision agriculture products at a regional scale over sugarcane areas, this study was undertaken to focus attention on mapping spatial variability at a field scale, by making use of more accurate high resolution images acquired with an ultra-light aircraft. The main aim was to provide a field-scale diagnosis method that would enable detection of stresses resulting from water and nutrient deficiencies which limit plant productivity and crop yield.

This poster presents the airborne imaging system, and the spectral and thermal images acquired with this system over an experimental sugarcane field with different water and nutrient treatments.

Materials and methods

Study site description and field measurements

The investigation was conducted in April 2006 on a 7.3 ha sugarcane experimental field located in La Mare, Sainte Marie, in the northern part of the Reunion Island. This field was separated in three randomised blocks cultivated with three varieties of sugarcane (R570, R575, R579) under three different nitrogen inputs (Kg/N - 0/N, 65/N, 130/N) and two water treatments (irrigated and rainfed) (Figure 1). For each combination of treatments (variety, nitrogen, irrigation), the size of the plot in the blocks was 135 m² and was made up of 5 rows each of 18 m length with a 1.5 m inter-row distance.

The sugarcane field was in the 3rd ratoon and in the 9th month of growth at the time of data acquisitions. Fertilizer was added in one single application two months after the previous harvest.

The mean annual precipitation in the study area is 1514 mm/year. It is important to note that 50 mm of rainfall occurred two days before the remotely sensed data were acquired.

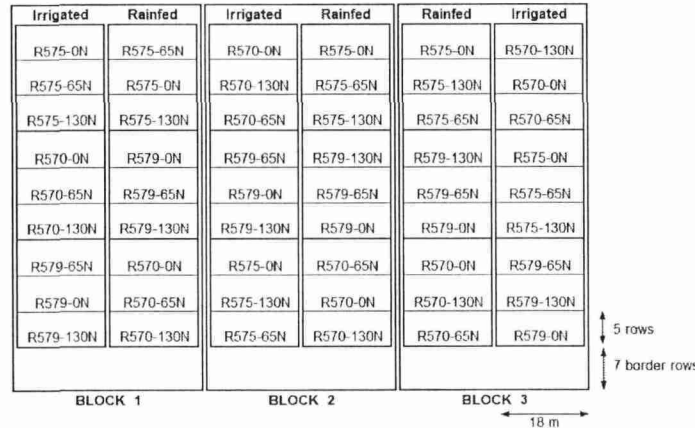


Fig. 1 – Layout of the experimental field

Data acquisition

The data acquisition system consisted of an ultra-light aircraft equipped with sensors that captured and measured the sunlight reflected in four different spectral bands and the radiation emitted by the Earth surface.

To capture the radiometric signal in the visible bands (blue, green and red), a CANON 350D commercial camera was used. A similar type of camera was adapted and equipped with a 710-855 nm band pass filter to measure the radiation in the near infrared spectral band. The radiation emitted by the canopy was also measured by using a thermal infrared (TIR) camera (NEC TH 7800) and was transformed into surface temperature (Ts) (emissivity $\epsilon = 1$). This temperature corresponds to a canopy temperature (Tc) when vegetation dominates the field of view minimizing the effect of soil (Norman *et al.*, 1995).

On 19th April 2006 at 11:25 a.m solar time, a first set of images was acquired in vertical mode over the experimental field, at an altitude of 500 m. The ground resolution of images was 8 cm for those taken in the visible and near infrared bands and 55 cm for those acquired in the thermal band.

Image processing and relevant calculations

The first step in image processing was to conduct a geometric correction to the images by referencing them to an existing referenced image, ground control points, and GPS data on the boundaries of the field.

An NDVI image was then generated using the following equation according to Rouse *et al.* (1973):

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

where R and NIR are the reflectances recorded by the sensors in the red and near infrared spectral bands respectively. In our case, the index is calculated using the digital numbers recorded by the cameras in these two spectral bands.

The mean NDVI and Ts for each plot were then calculated after subtracting one metre buffer from the original edge of the plot polygon to eliminate mixed border pixels.

Results and discussion

Figures 2 and 3 show the images of the NDVI and surface temperature (Ts) variability of the sugarcane crop in the experimental field, respectively, with respect to the location of the different nitrogen and water treatments. The NDVI values over the sugarcane plots ranged from 0.4 to 0.63, and for Ts from 28.1 to 33.2°C.

In general, the spatial patterns of the NDVI correspond to those of Ts. Ts values were on average higher for rainfed plots, and decreased with increasing nitrogen inputs. The opposite effect is observed for the NDVI, and reflects a negative correlation between Ts and NDVI ($r = -0.84$), as observed by Moran *et al.* (1994).

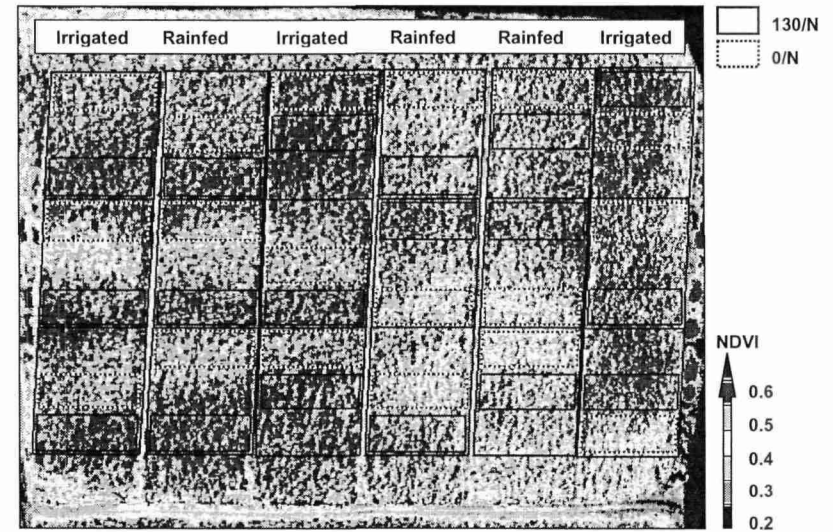


Fig. 2 – NDVI of the experimental field from measurements at 11:25 am solar time on 19th April 2006.

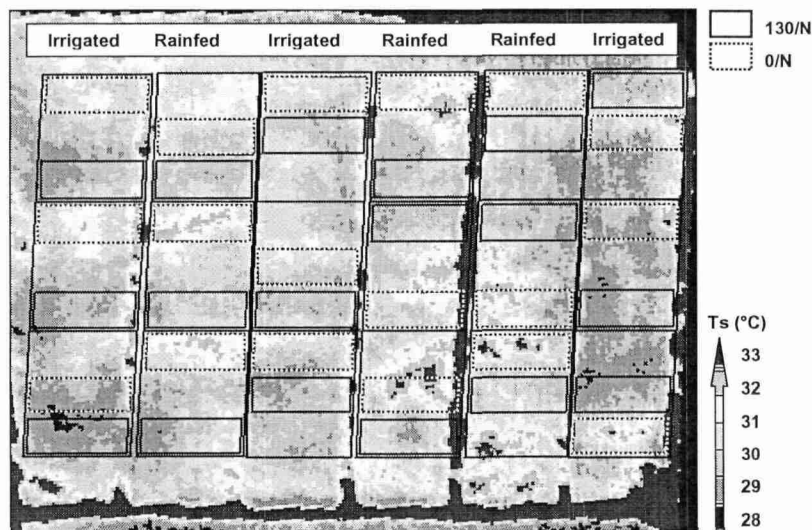


Fig. 3 – Surface temperature (Ts) of the experimental field from measurements at 11:25 am solar time on 19th April 2006.

The image interpretation of the different spatial patterns is validated by the quantitative results presented in Figure 4. Both water and nutrient treatments have an effect on Ts and NDVI. The decrease of NDVI due to reduced nitrogen has similar amplitude for both water treatments.

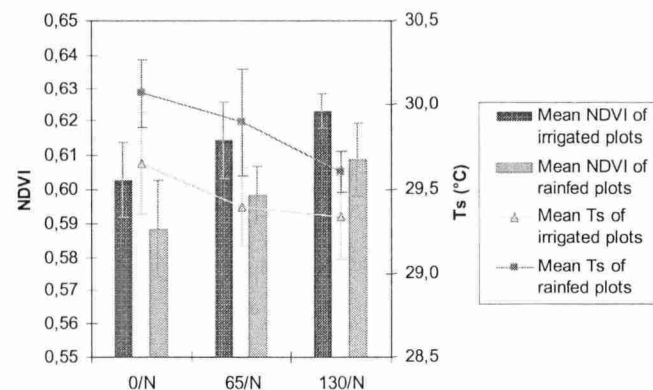


Fig. 4 – Mean NDVI and surface temperature (Ts) for all varieties and N treatments. Error bars indicate ± 1 standard deviation of the mean ($n = 9$).

High Ts values correspond to low NDVI parts of the experimental field, a situation which reveals the soil effect in the measurements of the surface temperature.

Though the NDVI appears to be well correlated with nitrogen inputs, additional Ts measurements are necessary to distinguish the application effect of water from that of nitrogen.

In the TIR (thermal infrared) domain, long-term effects are here observed. The TIR data did not discriminate the variations of water status of the sugarcane crop at the time of data acquisition because of the heavy rainfall which occurred two days earlier. The TIR radiation recorded would be mainly influenced by the density of the canopy cover.

Conclusion and further developments

The preliminary results of the study have enabled the production of maps of spatial variability as influenced by nutrient and water growth conditions of the sugarcane crop. Such maps would serve as a valuable decision support tool in solving management issues and in forward planning of farming operations.

The different steps followed afford a quantitative approach to characterize and possibly correct water or nutrient conditions before they actually affect the plant development. The techniques are promising because of their simplicity and low cost implication. Compared to satellite or airborne acquisitions, this tool is tailor-made for real-time observations at field or farm scale to help in management decisions.

In future investigations, we will focus on the concept of Vegetation Index/Temperature (VIT) (Moran *et al.*, 1994) that allows the application of the Crop Water Stress Index (CWSI) (Jackson *et al.*, 1981) for partially covered canopies.

In 2007, additional experiments are planned in Reunion Island, and will include the use of a drone aircraft.

Acknowledgements

This research was supported by a “Région Réunion” Ph.D grant and carried out in the context of the AgriDrone project funded by the French Ministry of Agriculture and Fishing.

Other funds were provided by the Réunion Department, the French Government, and the European Union. Special thanks are due to the CTICS (Centre Technique Inter-professionnel de la Canne et du Sucre) team.

References

- Idso, S.B. and Baker, D.G. (1967). Relative importance of reradiation, convection and transpiration in heat transfer from plants. *Journal of Plant Physiology*, 42: 631-640.
- Idso, S.B., Jackson, R.D. and Reginato, R.J. (1978). Extending the “degree day” concept of phenological development to include water stress effects. *Ecology*, 59: 431-433.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J. and Ehler, W.L. (1977). Crop temperature reveals stress. *Crop Soils*, 29: 10-13.
- Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J. and Pinter, J.R. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Research*, 17: 1133-1138.
- Moran, M.S., Clarke, T.R., Inoue, Y. and Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 46: 246-263.

Norman, J.M., Divakarla, M. and Goels, N.S. (1995). Algorithms for extracting information from remote thermal-IR observations of the earth's surface. *Remote Sensing of Environment*, 51: 157-168.

Penuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L. and Save, R. (1993). The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 1887-1905.

Peñuelas, J. and Filella, I. (1998) Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*. 3: 151-156.

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 and Remote Sensing*, 69: 647-664.

Ribbes, F., Bégué, A., Siegmund, B., Todoroff, P. and Autrey, L.J.C. (2002). Potentialités de la télédétection satellitaire pour la filière canne à sucre (Projet SUCRETTE). *Proceedings of Perspectives de développement de la canne à sucre en milieu insulaire: approches technico-économiques, sociales et culturelles*, St Leu, La Réunion (FR), 2-5 Octobre, 10 p.

Ripple, W.J. and Schrumf, B.J. (1987). Remote sensing of leaf water status. In: *Proceedings of the International Conference on Measurement of Soil and Plant Water Status*, Vol.2, Plants, Utah State University, 6-10 July.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W. (1973). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium*, NASA SP-351, Vol.1: 309-317.

AN OPERATIONAL SOLUTION TO ACQUIRE MULTISPECTRAL IMAGES WITH STANDARD LIGHT CAMERAS: CHARACTERIZATION AND ACQUISITION GUIDELINES

S. Labbé^b, B. Roux^c, A. Bégué^a, V. Lebourgeois^a, B. Mallavan^a

^a CIRAD, UMR TETIS, Maison de la Télédétection, 34 093 Montpellier, France - (begue, mallavan, valentine.lebourgeois@cirad.fr)

^b Cemagref, UMR TETIS, Maison de la Télédétection, 34 093 Montpellier, France - sylvain.labbe@teledetection.fr

^c L'Avion Jaune Company, 34 093 Montpellier, France - info@lavionjaune.fr

Commission I/4

KEY WORDS: U.A.V., Ultra-Light, Aircraft, Imagery, radiometric, geometric, correction

ABSTRACT:

In order to develop a low-cost and easy to implement technical solution to map inside-field spatial variability, and to explore its relationship with crop conditions, several experiments were conducted using ultra-light aircraft and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) equipped with visible and infrared cameras.

The sensors consisted of a ramp of 3 small format digital cameras (EOS 350D, Canon[®]): one for the visible part of the spectrum, and two modified cameras in order to acquire red edge and near infrared radiations. The images acquisition on the 3 cameras is simultaneous using external triggers and can be activated through the operator remote control on the ground or programmed to be automatically done using an on-board GPS navigation system. On ultra-light aircraft we also add a micro-bolometer thermal camera to the system.

This paper describes the components of this acquisition system and focuses on the geometric and radiometric processing steps necessary for quantitative use of the data.

At an altitude of 500 m this system acquires images with a ground resolution of 8 cm for the visible and near infrared bands and 55 cm for the thermal band. Unmanned Aerial Vehicle common altitude stretches over several tenths of meters up to 500 m and is adapted to the survey of fields of several hectares with very high spatial resolution. Ultra-light aircraft offers a range of altitude up to 1 to 2 km and a larger survey capacity with smaller spatial resolution.

The spectral sensitivity of the cameras was measured using monospectral emittance sources. We worked both on the raw multispectral images and on the computed jpeg standard output. This allowed us to select the best band (or band combination) to produce red edge and near infrared images. We also developed an algorithm to compensate some radiometric distortion in the acquired images, particularly on vignetting effect.

Classical photogrammetric calibration was used in order to measure lens geometry of each camera and evaluate as precisely as possible the coefficients of the lens polynomial needed by commercial photogrammetric software.

Several sets of images were acquired over experimental fields in temperate zone (on wheat) and tropical zone (on sugarcane). These images were radiometrically and geometrically corrected used the above elements and are stored as georeferenced stackable images in a Geographic Information System.

The next step for a quantitative use of the data is to compensate changes due to atmospheric and illumination conditions in the image time series.

1. INTRODUCTION

Because they can provide information on large areas with rapid changes, low-cost aerial systems with high spatio-temporal resolution are particularly suited for agriculture and environment applications (Johnson et al., 2004; Sugiura et al., 2005). These systems are composed of a light platform, like an ultra-light aircraft or an Unmanned Aerial Vehicle (UAV), equipped with visible and infrared digital cameras. To utilize the full potential of this technology, the digital cameras can be used as sensors after considering a certain number of technical and scientific points (Tarel, 1995; Stevens et al., 2007).

The objective of this paper is to describe an easy to implement technical solution. We first describe the platform and sensors used, then we present the radiometric algorithms involved in the data processing steps (bands splitting, spectral characterization,

vignetting correction), and finally we point out what will be the next steps to get an efficient and cost-effective high resolution imagery system for agricultural and environmental applications.

2. PLATFORMS AND SENSORS

2.1 The Ultralight aircraft module

The multispectral module is made by the assembly of three Canon[®] EOS 350D digital cameras on a hard-wood mount (Figure 1). These cameras are equipped with the same lenses and are pointing in the same axis, their shutter being synchronized by a single trigger.

This equipment is light enough (2.8 kg) for a hand-help used (Figure 2) or can be mounted inboard an ultra-light

aircraft, the lens pointing through a hole practiced in the fuselage floor.

The ultra-light aircraft was chosen for its slow flight characteristics avoiding « motion blur » when images are taken at a low altitude (below 300 m).

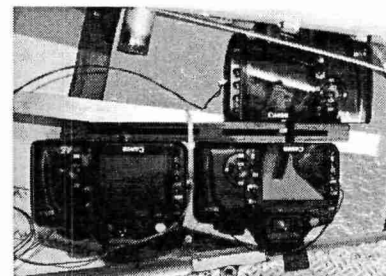


Figure 1. Canon[®] EOS 350D digital cameras device

The digital cameras are able to collect the radiation in five different bands (blue B, green G, red R, red edge RE and near infrared NIR) thanks to technical adaptations described in details in part 1.3.



Figure 2. Ultralight aircraft device

This cameras device is completed by a thermal imager (B20HSV, Flir Systems[®]), installed outside the fuselage side and also synchronised with the cameras (Figure 3).



Figure 3. Thermal infrared camera B20HSV, Flir Systems[®]

2.2 The Unmanned Aerial Vehicle module

Powered by an electric engine driving a pushing airscrew (Figure 4), the UAV is able to reach an altitude of 400 m and to maintain it during half an hour. Its control is supported by an IMU (Inertial Motion Unit) and can be manual, semi-automatic or fully automatic.

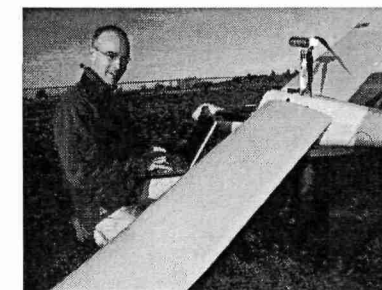


Figure 4. UAV designed by L'Avion Jaune Company

This UAV can lift a maximum of 2 kg payload, so that is not powerful enough to get in the air the cameras module described before. It carries only two cameras at a time and the thermal imager cannot fit inboard. So this UAV is generally used to collect only RGB and Near InfraRed images.

2.3 Cameras adaptations

The cameras are « off the shelf » products conceived to be used to get images within the visible light spectrum. As their CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor) detectors are sensitive from ultra violet (UV) to near infrared (NIR) wavelengths, they are manufactured with a visible pass-band filter that keeps UV and NIR from reaching the CCD surface. This equipment needs some adaptations in order to gather information situated outside the visible spectrum.

To modify the spectral sensitivity of the cameras, we first open the cases of two cameras and remove the visible pass-band filter located in front of the CMOS matrix. The filter was then replaced by an optical window transparent to visible and near infrared wavelengths and preserving the same optical path for the light rays.

After this operation the cameras are sensitive above 700 nm and additional filters are added in front of the lenses to obtain the desired spectrum range for the data acquisition: a red-edge filter (L.O.T. Oriol[®]) centred on 700 nm with a bandwidth of 25 nm at 10% cut, and a near infrared filter centred on 840 nm with a bandwidth of 80 nm at 10% cut (LDP LLC[®]).

Consequences of the adaptations:

- 1- A coating is applied on the front lenses for chromatic optimisation; for the modified cameras this coat produces a strong vignetting in the red-edge and infrared bands that has to be compensated.
- 2- The removal of the filter needs to be followed by a spectral characterization giving the new shape of the

response curve of the Bayer matrix. This operation can only be done in a specialized optical laboratory.

3. RADIOMETRIC CORRECTIONS

3.1 Splitting the image bands

The Canon cameras gives their images by the mean of a Bayer matrix where each individual pixel is filtered and thus coded in red, green or blue (Figure 5). On most of the commercial cameras, an interpolation is applied on the Bayer matrix in order to compute a 3 bands (R, G, B) image (Figure 6), with a realistic appearance for the human eye (logarithmic relation). Furthermore, the radiometric resolution is often lowered during this operation (generally from 12 to 8 bits) and compressed (e.g. JPEG format). Unfortunately, these image processing steps done by the manufacturer software are unknown. To get "spectrally pure" pixel values we had to develop a specific software to get a true linear signal from the RAW images.

R	G	R	G
G	B	G	B
R	G	R	G
G	B	G	B

Figure 5. Bayer matrix example.

This 16 pixels camera includes 4 red, 4 blue and 8 green individual filters. In the RAW format each of these 16 measurement are given (with a 12 bits radiometric resolution for the Canon® EOS 350 D)

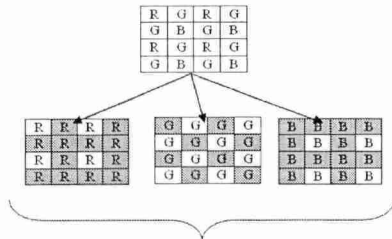


Figure 6. On board computed colour image (interpolated pixels are greyed)

3.2 Characterization of the spectral sensitivity

We carried out the spectral characterization of the original and modified cameras in ONERA laboratory in Toulouse. This characterisation is made with photos of a monochromatic source light. The monochromatic light is made by a tungsten lamp, a diffraction grating and a slot. The characteristics of this light are: bandwidth of 1.2 nm and a centre precision of 0.1 nm. The measurements are made 5 nm by 5 nm in the visible and near infrared bands, and 2 nm by 2 nm in the red-edge band. The cameras tunings are the same for all the measurements:

Shutter speed of 0.067s, relative aperture of f/5.6, sensitivity ISO = 100 ASA, and focal of 55 mm. The software chooses the 100th pixel of the image, ranked by decreasing digital counts. This value is extracted with a software developed by the "Avion Jaune" firm, based on *deraw* software (Coffin, 2007). The relative spectral response r has been calculated for a given wavelength λ and a given channel n (RGB) with the following equation:

$$r(\lambda, n) = R(\lambda, n) / R_{max} \quad (1)$$

with

$$R(\lambda, n) = (C(\lambda, n) - C_{black}) / I(\lambda) \quad (2)$$

where R is the spectral response given in digital count and I is the light intensity measured with a diode located at the same distance that the camera (Figure 7). C is the digital count corresponding to channel n . C_{black} is the mean of the obscurity current for the three channels RGB expressed in digital counts.

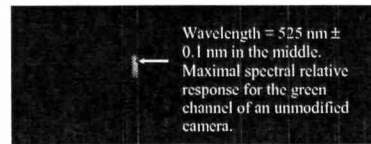


Figure 7. Example of an image of the monochromatic source light.

The relative spectral responses of the red, green, blue, red edge and near infrared bands are represented in Figure 6.

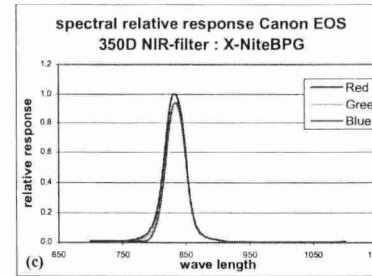
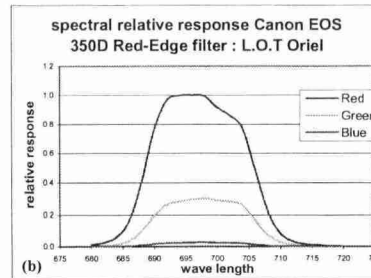
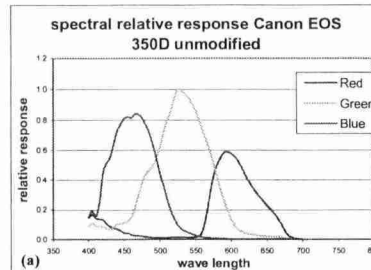


Figure 8. Spectral relative response of an original Canon EOS 350D with visible pass-band (a), a modified body equipped with : a red-edge external filter (b), a near infrared external filter (c)

The relative spectral response in the red-edge showed a stronger dynamic in the red channel. In the NIR, the spectral response is quite the same for the three channels, so we can keep one of those or use the three in order to get the entire resolution of the sensor.

3.3 Vignetting correction

The photography taken in the NIR and the Red-Edge showed some effects similar to vignetting. The strong darkening in the periphery of those images is the result of the interactions between the filter, the frontal lens and the missing of the band-pass filter in front of the matrix. These effects are specific to technologic choices. The correction of this visual effect follows the same principles than the corrections of the vignetting, and is performed with a software developed by the "Avion Jaune" Company.

First, a mean of an image series acquired with the same camera tunings is made. From the image mean, we calculate its radiometric profile. Secondly, we extract the coefficients of a fitted multiplicative polynomial. This polynomial is minimum a quadratic. Then, this polynomial function is applied to each image in order to obtain a corrected image (Figure 9).

3.4 Linear conversion of digital images

The actual output voltage from each cell of an image sensor in a digital camera is proportional to the number of photons that hit the cell during the exposure. This was confirmed by Cescatti (2007) who experienced a perfect linearity between the signal (DC divided by the shutter speed) and the raw signal of a LAI-2000 quantum sensor.

4. GEOMETRIC CORRECTIONS

For each camera, the lens distortion was measured using POIVILLIERS 'E' developed by Yves Egels (IGN-ENSG, Paris, France). Then a standard commercial photogrammetric software was used in order to produce orthorectified imagery for each band.

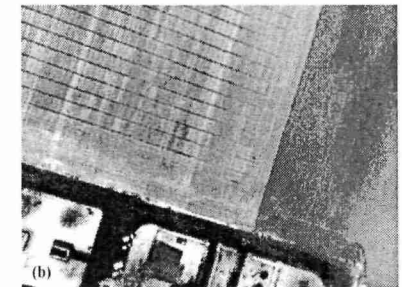
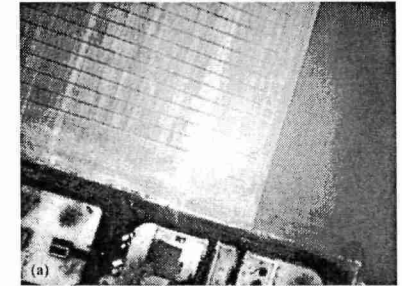


Figure 9. Near Infrared image before (a) and after (b) vignetting correction.

5. RESULTS

Figures 10a to 10d show radiometric and geometric corrected images acquired over sugarcane fields using the four cameras (visible, red edge, near infrared and thermal infrared). Parcel boundaries are overlaid.

Using the visible and near infrared images, an image of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI; Rouse et al, 1974) was calculated using the formula:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red) \quad (3)$$

where NIR and Red are respectively the Digital Counts in the Red and Near Infrared images.

On field measurement on these parcels shows good relationships between cane biomass and NDVI image and also between thermal infrared measurement and hydric stress (Lebourgeois et al., 2007). Current research works are conducted in order to better assess these relationships so that these products could be used directly for precision farming.

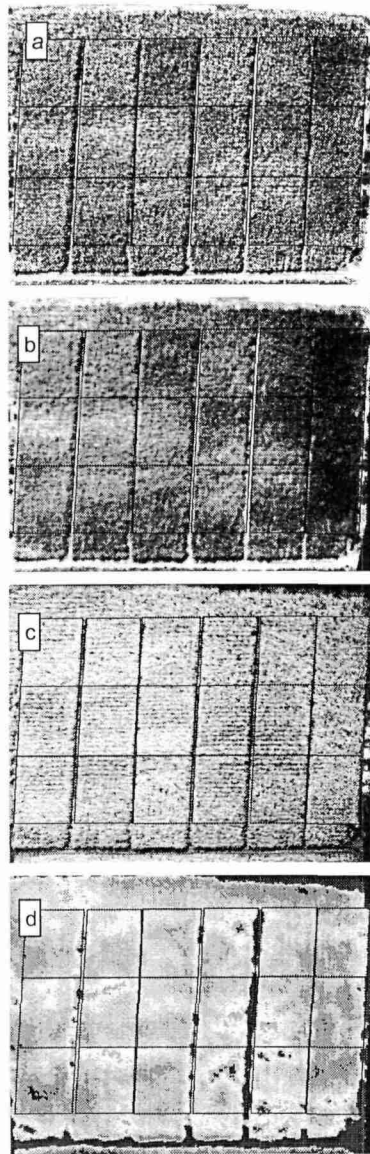


Figure 10. Geometric and radiometric corrected images in (a) RGB bands (Canon ® EOS 350 D), (b) Near Infrared band (modified Canon ® EOS 350 D), (c) Red Edge band (modified Canon ® EOS 350 D), and (d) Thermal infrared band (FLIR ® B20 HS).

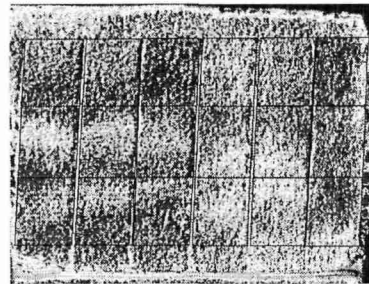


Figure 11. Example of an NDVI image produced with the Red band of the RGB image (Figure 10a) and the Near Infrared band (Figure 10b).

5. CONCLUSION

Ultralight aircraft and UAV in combination with small digital cameras permit to acquire low cost high resolution images particularly useful for applications with a high turn-over, like agriculture.

In this paper, through examples based on Canon cameras mounted on an Ultra Light aircraft, we tried to list and present a set of radiometric corrections (splitting spectral bands, correction of the vignetting effect in the near-infrared and red-edge bands, spectral characterization of the bands) that need to be applied to the images prior a quantitative use of the data.

The next step will be to compensate the radiometric changes due to atmospheric and illumination conditions in an image time series.

REFERENCES

- Cescatti A., 2007. Indirect estimates of canopy gap fraction based on the linear conversion of hemispherical photographs - Methodology and comparison with standard thresholding techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(1-2), pp. 1-12.
- Coffin, D. 2007. Decoding raw digital photos in Linux. <http://cybercom.net/~dcoffin/dcrw/> (1 July 2006).
- Johnson L. F., S. R. Herwitz, B. M. Lobitz and S. E. Dunagan, 2004. Feasibility of monitoring coffee field ripeness with airborne multispectral imagery. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(6), pp. 845-849.
- Lebourgeois V., A. Béguc, S. Labbé and B. Roux, 2007. An airborne imaging system for mapping spatial variability in sugarcane. *International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT)*, Durban (South Africa), 29 July - 2 August.
- Rouse J. W., R. H. Hass, J. A. Schell, D. W. Deering and J. C. Harlan, 1974. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect) of Natural

Vegetation, Final Report. NASA/GSFC, Greenbelt, Maryland (US), 371.

Stevens M., C. A. Parraga, I. C. Cuthill, J. C. Partridge and T. S. Troscianko, 2007. Using digital photography to study animal coloration. *Biological Journal of the Linnean Society*, 90(2), pp. 211-237.

Sugiura R., N. Noguchi and K. Ishii, 2005. Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. *Biosystems Engineering*, 90(4), pp. 369-379.

Tarel J.-P., 1995. Calibration radiométrique de caméra. In: INRIA (Editor). Rapport de recherche n°2509, INRIA, Le Chesnay (FR), 20 p.

ACKNOWLEDGEMENTS

This project was funded by the French Ministry of Agriculture and Fisheries. Special thanks to Mr Philippe Deliot (ONERA, Toulouse) for the radiometric calibration of the cameras, and to Mr Yves Egels (IGN/ENSG) and Mr Michel Assenbaum (Avion Jaune Company) for their help in computer softwares.