

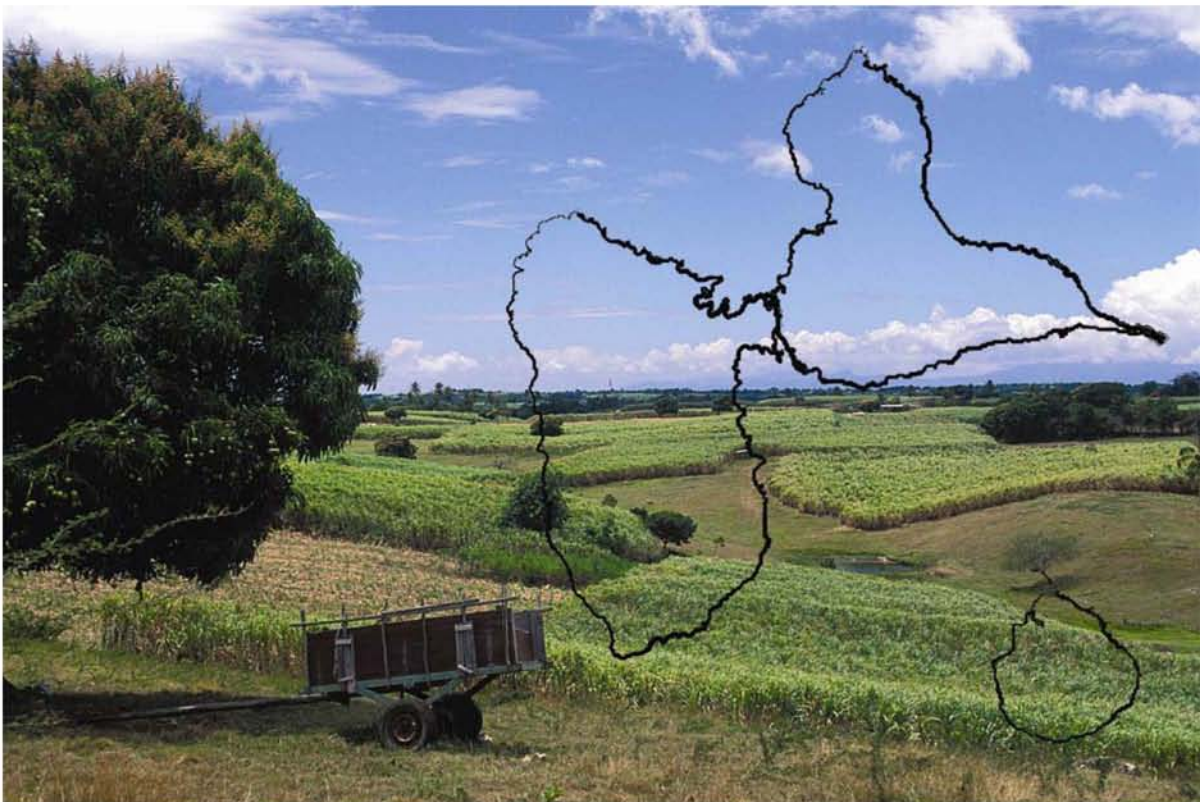


Académie de Montpellier

Master 2 Biologie Géosciences Agroressources Environnement
Mention Géosciences et Hydrosociences Appliquées
Parcours Professionnel Géorisques

RAPPORT DE STAGE

Cartographie de l'épaisseur des vertisols de Guadeloupe par topographie



Pierre Willems

**CIRAD CA, Station de Roujol
Petit Bourg (Guadeloupe)**

Septembre 2007

Sommaire

Introduction.....	- 1 -
1 Cadre et contexte de l'étude	- 4 -
1.1 Présentation de l'entreprise.....	- 4 -
1.2 Présentation générale de la Guadeloupe.....	- 4 -
1.2.1 Géographie des Petites Antilles	- 4 -
1.2.2 Géodynamique de l'arc antillais	- 4 -
1.2.3 Géomorphologie et pédologie	- 5 -
1.2.4 Climat	- 6 -
1.2.5 Présentation du secteur d'étude : L'exploitation de Gardel	- 6 -
1.3 Origines de l'étude.....	- 7 -
1.4 Importance de la culture de la canne à sucre en Guadeloupe	- 8 -
1.4.1 Présentation générale de la filière.....	- 8 -
1.4.2 Caractéristiques culturelles	- 9 -
1.5 Les vertisols de Grande Terre et Marie Galante	- 10 -
1.5.1 Phénomène de retrait gonflement des minéraux argileux	- 10 -
1.5.2 Composition minéralogique et structure des vertisols.....	- 10 -
1.5.3 Système poral des vertisols et réserve en eau	- 11 -
2 Matériels et méthodes	- 14 -
2.1 Calcul de la convexité de surface du sol.....	- 14 -
2.1.1 Mesures topographiques à l'échelle de la parcelle	- 14 -
2.1.2 Ré-échantillonnage des mesures brutes.....	- 16 -
2.1.3 Calcul de convexité	- 17 -
2.1.4 Choix de l'écartement du calcul de convexités	- 17 -
2.2 Choix d'une méthode de profondeurs de référence.....	- 19 -
2.3 Cartographie existante des vertisols par le BRGM	- 21 -
2.4 Calcul d'un indice de végétation des parcelles de canne à sucre	- 21 -
2.4.1 Calcul de la réflectance	- 22 -
2.4.2 Corrections géométriques et radiométriques	- 22 -
2.4.3 Choix d'une image SPOT discriminante de la profondeur de sols.....	- 23 -
2.4.4 Calcul d'un indice de végétation NDVI.....	- 24 -
3 Résultats et Discussion.....	- 26 -
3.1 Modèle expérimental de calcul de la profondeur des vertisols	- 26 -
3.1.1 Calage de la relation linéaire.....	- 26 -
3.1.2 Validation statistique de la relation linéaire	- 27 -
3.1.3 Evaluation de la précision du modèle	- 27 -
3.2 Validation du modèle topographique expérimental.....	- 30 -
3.2.1 Validation du modèle expérimental à l'échelle de la parcelle	- 30 -
3.2.2 Comparaison du modèle expérimental avec des cartographies existantes.....	- 30 -
3.2.3 Comparaison du modèle expérimental avec un indice de végétation.....	- 34 -
4 Conclusion et perspectives	- 38 -
Liste des figures	- 39 -
Liste des tableaux	- 40 -
Liste des équations	- 40 -
Bibliographie.....	- 42 -
Annexes.....	- 45 -

Introduction

La profondeur de sol est un paramètre essentiel de la croissance de la canne à sucre. Elle intervient dans le calcul du bilan hydrique par le biais de la Réserve Utile (RU) qui correspond au volume d'eau maximal que l'épaisseur de sol colonisé par les racines peut contenir.

La culture sucrière est traditionnellement une activité majeure de l'agriculture Guadeloupéenne. Cependant, la filière connaît de sérieuses difficultés depuis les années soixante face à la concurrence du marché mondial, en raison d'une production à la limite de la rentabilité. La pérennisation de la filière nécessite une augmentation de la production à court terme qui passe par une amélioration du bilan hydrique car l'eau est le facteur limitant la croissance canne à sucre en Guadeloupe.

C'est pourquoi, afin d'optimiser la production (prévisions des rendements, aide à la décision...), un modèle de croissance de la canne à sucre (Mosaicas) simulant la croissance en biomasse d'une parcelle homogène de canne au pas de temps journalier, a été développé au CIRAD à partir de travaux réalisés à La Réunion et en Guadeloupe. A partir de données d'entrée caractérisant l'environnement de la parcelle (météorologie, sol, itinéraire cultural ...), on peut ainsi simuler la croissance végétale à l'optimum, c'est-à-dire un développement dans des conditions d'alimentation hydrique idéales, ou en alimentation hydrique limitante.

Ce modèle, adapté dans un premier temps à La Réunion, a été validé en conditions réelles sur l'ensemble des parcelles de l'exploitation sucrière de Gardel SA, (Remond, 2002 ; Todoroff *and al.* 2002). L'amélioration de la fiabilité et la précision des simulations du modèle Mosaicas passe par une meilleure connaissance des paramètres liés au bilan hydrique, en particulier la profondeur du sol sur laquelle se développe le couvert végétal.

Les vertisols de Guadeloupe, majoritaires en Grande Terre et à Marie Galante, présentent une variabilité de leur profondeur à courte distance. Un certain nombre de techniques de référence existent déjà pour déterminer la profondeur d'un sol, mais elles sont souvent très consommatrices en main d'œuvre (sondages à la tarière, sondages électriques).

L'INRA et le CIRAD travaillent à la mise au point d'une technique simple à mettre en œuvre basée sur la corrélation entre profondeur des vertisols et topographie de surface. En effet, il semble exister une bonne corrélation entre la convexité de surface et la profondeur des sols, liée à la pédogenèse particulière de ces sols (comblement du calcaire corallien exhumé par des dépôts argileux et volcaniques).

Dans une première partie, le présent travail s'attachera à décrire le cadre général de l'étude, la localisation de la zone d'expérimentation, et présentera les principales caractéristiques des vertisols.

Dans une seconde partie, les études précédentes seront prises en compte, en particulier les travaux effectués en 2006 sur la parcelle Sahara de l'exploitation de Gardel SA, et les mesures topographiques seront étendues aux deux parcelles mitoyennes. Le meilleur ajustement linéaire entre convexité de surface et profondeur de sols obtenue avec une méthode de référence (tarière), sera tirée de ces deux parcelles. Cette étape correspond au calage du modèle expérimental à partir de mesures topographiques.

La dernière étape de cette partie constituera la validation du modèle topographique reliant la convexité d'un vertisol à la profondeur.

Dans un premier temps, la relation linéaire obtenue précédemment sera validée sur la 3ème parcelle expérimentale

Le modèle expérimental sera ensuite validé sur une région plus large à partir d'une cartographie pédologique réalisée par le BRGM.

Enfin, les données de profondeurs seront comparées avec des évaluations de profondeurs de sol provenant d'un diagnostic de croissance végétale à partir d'une image SPOT 5 choisie en période de stress hydrique, période au cours de laquelle la croissance est le plus fortement corrélée à la disponibilité en eau, donc à la profondeur des sols.

1 Cadre et contexte de l'étude

1.1 Présentation de l'entreprise

Le CIRAD (Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement) est l'institut français de recherche agronomique au service du développement des pays du Sud et de l'outre-mer français. Il privilégie la recherche en partenariat. C'est un établissement public à caractère industriel et commercial (Epic). Son budget est de 203 millions d'euros. Il rassemble 1 820 agents, dont 950 cadres. La répartition des agents CIRAD à travers le monde est reportée en **Annexe I**.

Le stage s'est déroulé d'Avril à Août 2007, au sein du CIRAD-CA (Cultures Annuelles, station de Roujol) dans l'UPR (Unité Propre de Recherche) « Systèmes Canniers », pour le service SIG Modélisation, sous la direction de Pierre Todoroff (chercheur, responsable de projets). 130 agents dont 31 chercheurs composent l'antenne régionale de Guadeloupe.

1.2 Présentation générale de la Guadeloupe

1.2.1 Géographie des Petites Antilles

La Guadeloupe, d'une superficie de 1704 km², se présente sous la forme d'un archipel de huit îles principales, situées dans l'arc des petites Antilles à environ 6700km de la métropole. (

Figure 1). Les deux plus grandes îles sont celles de la Guadeloupe dite « continentale » située entre les latitudes 16° et 16°40', et les longitudes 61°10' et 61°50. Ce sont la Grande Terre (590km²), et la Basse Terre (848km²) séparées par un isthme marin très étroit, la Rivière Salée. Les dépendances de l'archipel sont Marie Galante (158km²), La Désirade (20km²), et l'archipel des Saintes (13km²). Celles-ci sont relativement proches par rapport aux « îles du nord », que sont Saint-Martin et Saint-Barthélemy (Lainé 2001).

1.2.2 Géodynamique de l'arc antillais

Les Petites Antilles sont alignées sur trois arcs d'est en ouest, qui sont les marques successives de la ligne d'activité volcanique près de la limite orientale de la plaque caraïbe. (

Figure 1).

A l'heure actuelle, la subduction de la plaque Nord Américaine sous la plaque Caraïbes se produit à une vitesse de l'ordre de 2 cm/an (Feuillet, 2000).

L'arc volcanique ancien date de 50 à 6.5 millions d'années et correspond à la formation des îles du nord (Saint Martin, Saint Barthélémy et La Désirade). C'est l'arc volcanique intermédiaire qui a donné naissance aux îles de Grande Terre et Marie-Galante. L'arc volcanique le plus récent, âgé de moins de 6 millions d'années, permis l'émergence de la Basse Terre et des Saintes. Les arcs insulaires offrent un contraste géomorphologique frappant entre des zones avec des transgressions sédimentaires comme la Grande-Terre (arc intermédiaire) et des zones de mise en place de chaînes éruptives comme la Basse-Terre (arc actuel).



Figure 1 : Géographie et géodynamique de l'arc Antillais

1.2.3 Géomorphologie et pédologie

La Grande-Terre, où est localisée notre étude est géomorphologiquement comparable à Marie Galante, plutôt calcaire et sans relief, avec des mornes peu élevés (135 m maximum) et géologiquement homogène (arc intermédiaire).

Elle est la conséquence du soulèvement d'un ancien massif corallien comblé par la suite par des dépôts sédimentaires argileux et volcaniques.

Les effets de l'érosion ont fait qu'aujourd'hui les mornes sont recouverts de sols courts montmorillonitiques tandis que dans les fonds de vallées, on trouve plutôt des sols hydromorphes sur des argiles de décalcification.

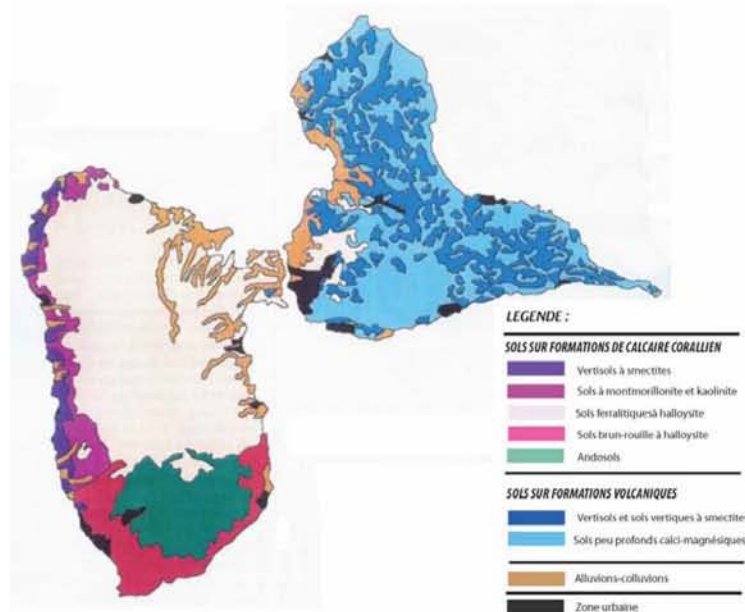


Figure 2 : Carte pédologique de la Guadeloupe continentale
Source: Morel, 1994

Enfin, sur les versants dénudés et aux extrémités septentrionales des deux îles, sont présents des lithosols (sols squelettiques et pauvres) (

Figure 2).Ce relief relativement plat explique qu'on y trouve de vastes étendues de cultures et les plantations de canne à sucre.

1.2.4 Climat

En climat tropical humide, la saison sèche, ou « carême », s'étend de janvier à mai et la saison humide appelée « hivernage » de juin à décembre. Les cyclones se manifestent généralement de juillet à octobre.

Bien que l'action tampon des masses océaniques maintiennent les températures moyennes mensuelles entre 24°C et 30°C tout au long de l'année, les effets cumulés de l'altitude et des alizés conduisent à une très grande variation spatiale de la pluviométrie. (

Figure 3).

Les précipitations ne cessent de diminuer en allant de l'ouest vers l'est. Les bas plateaux calcaires de la Grande Terre et de Marie Galante offrent une rugosité insuffisante aux masses d'air chargées d'humidité et sont incapables de provoquer des pluies de relief comme sur les versants au vent des montagnes de la Basse-Terre.

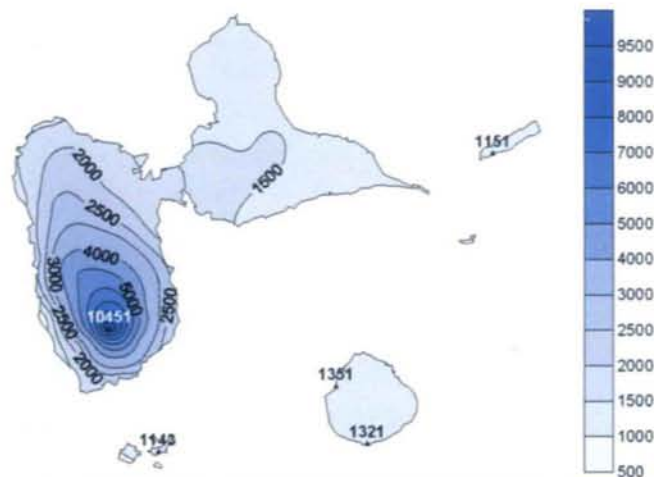


Figure 3 : Exemple de répartition des précipitations annuelles moyennes (en mm) entre 1986 et 2000 en Guadeloupe

Source : Atlas climatique Météo France, 2004

La canne à sucre est essentiellement cultivée sur vertisols dans les zones les plus sèches de la Guadeloupe, avec une pluviométrie annuelle inférieure à 1500 mm (Marie-Galante et l'est de la Grande-Terre), voir 2000 mm (ouest de la Grande-Terre et nord-est de la Basse-Terre), (Brevignon, 2005).

Notre zone d'étude située à l'est de la Grande Terre est donc soumise à une forte hétérogénéité interannuelle et spatiale des précipitations avec une pluviométrie annuelle plutôt comprise entre 1000 et 1500 mm.

1.2.5 Présentation du secteur d'étude : L'exploitation de Gardel

L'exploitation de Gardel SA a une superficie supérieure à 1000 ha répartis sur trois communes (Saint Anne, Le Moule, Saint François) du sud Grande Terre (

Figure 4).

L'usine sucrière de Gardel reste la seule usine de transformation encore en activité de la Guadeloupe continentale.

Les trois parcelles expérimentales Tour, Hippolyte 1 et Sahara se situent au nord de

l'exploitation.



Figure 4 : Image satellite SPOT5 de l'exploitation de Gardel SA en mai 2003

Source : Projet SUCRETTE, 2004

Les conditions agro-climatiques sont celles qui prévalent sur la majeure partie de la Grande Terre à savoir un sol argileux gonflant avec une distribution spatiale de leur profondeur très aléatoire, et une très forte variabilité interannuelle de la pluviométrie, avec une saison sèche marquée de janvier à juin.

1.3 Origines de l'étude

La concurrence du marché mondial nécessite des transformations des méthodes de production à court terme si l'on veut pérenniser la filière canne Guadeloupéenne. En effet, les rendements moyen annuels de l'ordre de 46 t/ha (9.3% de richesse saccharine), sont nettement inférieurs à ceux d'autres îles telles que la Réunion (73 t/ha (13.8%)), ou Maurice (89 t/ha). La marge d'amélioration de la production est donc importante. C'est pourquoi la Recherche a un rôle fondamental à jouer dans la modernisation de la culture de la canne à sucre de Guadeloupe.

La principale caractéristique de cette production cannière est une très forte variabilité de la production et des rendements interannuels depuis les années soixante. La Surface Agricole Utile (SAU) a diminué de 33% depuis 1981 et les principaux acteurs s'interrogent sur leur avenir. Cette tendance s'explique par deux raisons :

- Une partie de la SAU a été remplacée au profit d'aménagements urbains et touristiques plus rentables.
- Mais la principale raison expliquant la fluctuation de la production est une insuffisance et une grande variation interannuelle des précipitations qui induisent un degré de satisfaction de la plante en eau aléatoire.

En dépit de lourds investissements déjà mis en place, les potentialités d'irrigation ne permettent pas de faire face à la demande. C'est pourquoi il est nécessaire d'avoir recours à une gestion plus raisonnée de l'eau d'irrigation. (Brunet, Mathieu, 1998).

De plus, une meilleure gestion dans l'approvisionnement des usines de transformation s'impose. En effet, la récolte de la canne à sucre demande une grande organisation logistique car une fois coupée elle doit être acheminée à l'une des deux usines et transformée en moins de 48h. C'est pour cela qu'à l'heure actuelle, le calendrier de coupe n'est pas lié au degré de richesse saccharine de la plante mais plutôt à des critères logistiques fixés par les usines.

Par ailleurs, l'augmentation de la richesse saccharine n'est possible que par une amélioration dans l'alimentation hydrique du végétal.

1.4 Importance de la culture de la canne à sucre en Guadeloupe

L'importation de la canne à sucre dans l'archipel caribéen date de 1493 lorsque Christophe Colomb découvrit le Nouveau Monde. L'expansion sucrière qui s'en suivra durant le XVIIIème siècle, dans les Antilles françaises, sera étroitement liée au sort des esclaves. Le « roseau sucré » finit son tour du monde à l'aube du XIXème siècle en ayant traversé tous les continents.

A l'heure actuelle, la culture de la canne à sucre est présente dans 73 pays et arrive en tête des productions mondiales avec le blé et le riz. En 2004, la surface cannière mondiale représentait 20 millions d'hectares pour un rendement annuel après transformation d'environ 107 millions de tonnes de sucre brut soit à peu près 75% de la production mondiale sucrière (F.O. Licht, 2004). Le marché suit l'évolution de la consommation et augmente en moyenne de 2% par an (FAOSTAT 2005¹).

1.4.1 Présentation générale de la filière

La production atteignit son apogée dans les années soixante où 16 usines étaient encore en activité, puis elle a décliné régulièrement jusqu'en 1983 avec le plan Mauroy, qui permit la mise en place de réformes foncières et la restructuration de la filière (création des SICA2 et des CUMA3). La production est alors remontée jusqu'en 1988 pour continuer de décroître depuis. Aujourd'hui, seule deux usines de transformation restent en activité : Gardel en Grande Terre et Grande Anse à Marie Galante. Cependant, la filière canne génère encore 15000 d'emplois et reste un moteur essentiel de la vie économique et sociale.

Cette culture présente pourtant un intérêt majeur pour le développement d'une agriculture Guadeloupéenne durable car elle ne pose pas de problèmes environnementaux cruciaux. En effet, son pouvoir assainissant et protecteur des sols ainsi que son adaptabilité à des conditions climatiques difficiles (sécheresse et cyclone) en font une plante robuste particulièrement adaptée aux environnements tropicaux (Dinis et Wagner, 2005).

La sole cannière couvre plus de 14245 ha (Agreste, 2006), ce qui représente environ 30% de la SAU, répartis en 5000 exploitations.

C'est la 1ère production agricole (devant la banane) ce qui représente 20% de la production totale. L'agriculture est largement dominée par ces deux pôles de production et secondairement par les cultures maraîchères et vivrières (J. Malessard, 1998).

Les marges brutes offertes par cette économie primaire sont inférieures à celles de ces cultures annexes, c'est pourquoi les producteurs bénéficient d'importantes subventions de la part de l'Etat via les aides à la replantation, au transport, à la garantie de prix (environ 1500€/ha). Face au marché mondial, les subventions versées par l'Union Européenne dans le cadre de la PAC sont nécessaires pour assurer le maintien et l'amélioration du niveau de performance de la filière canne dans les DOM.

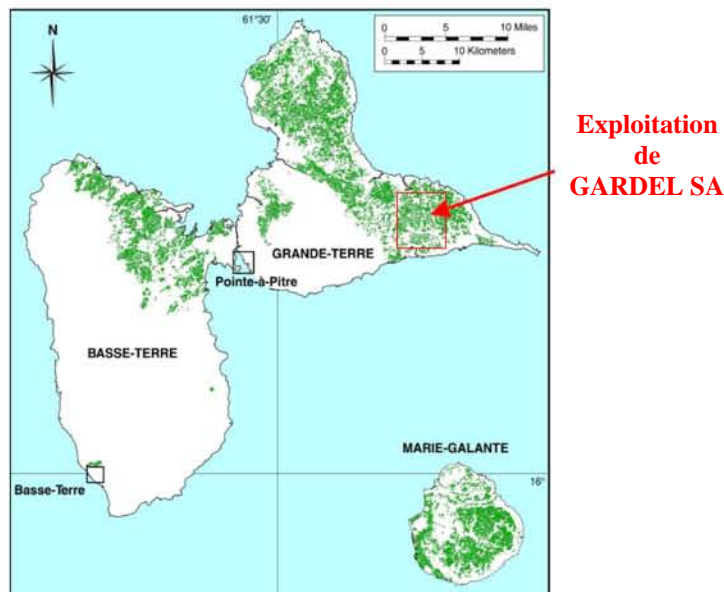


Figure 5 : Répartition de la sole cannière de Guadeloupe
Source : Lainé, 2000

² SICA : Société d'Intérêt Collectif Agricole

³ CUMA : Coopérative d'Utilisation du Matériel Agricole

1.4.2 Caractéristiques culturelles

La canne à sucre est une plante herbacée tropicale et subtropicale de la famille des Poacées (Graminées). (**Figure 6**)

Elle appartient au genre *Saccharum*, comprenant six espèces dont trois sucrées (*S. officinarum*, *S. sinense*, *S. barberi*) et trois non sucrées (*S. robustum*, *S. spontaneum*, *S. edule*). *Saccharum* sp (hybride interspécifique entre variétés sucrées et non sucrées) est cultivée pour ses tiges qui contiennent un jus sucré dont on tire le saccharose, sucre cristallisable et fermentescible qui permet la fabrication du rhum.



Figure 6 : Canne à sucre, *Saccharum officinarum* L

Source : <http://fr.wikipedia.org>, 2007

La canne à sucre est issue de repousses de souches coupées selon un cycle pluriannuel qui dure en général 5 ans jusqu'à ce que le rendement agricole soit jugé insuffisant et que l'on procède à une nouvelle plantation par bouturage (**Figure 7**).

La campagne de récolte se réalise en général pendant la période sèche : de février à juin.

La canne a besoin de chaleur pour ses phases végétatives de croissance mais nécessite une période de froid relatif, non gelant, ou de sécheresse pour établir des réserves de saccharose dans les tiges (Fauconnier, 1991).

Les différentes phases du développement végétatif au cours du cycle annuel sont énumérés en **Annexe II**.

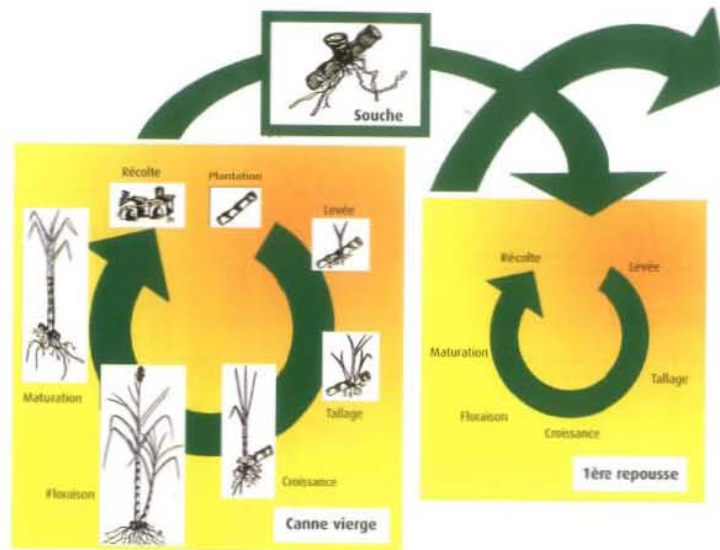


Figure 7 : Les cycles annuels de repousse de la canne à sucre

Source : CTICS⁴, Décembre 2005

La canne à sucre est peu exigeante vis-à-vis des caractéristiques du sol sur lequel elle pousse. Elle nécessite en revanche une forte quantité d'eau, avec une moyenne en besoin de 1500 mm pour une croissance optimale.

Toutefois, ces besoins en eau diffèrent selon le stade de croissance. Les phases de levée et de tallage sont demandeuses par rapport à la phase de maturation. Le sol a donc surtout une influence par sa profondeur et l'importance de la réserve hydrique.

⁴ : CTICS : Comité Technique Interprofessionnel cde la Canne à Sucre

1.5 Les vertisols de Grande Terre et Marie Galante

1.5.1 Phénomène de retrait gonflement des minéraux argileux

Les argiles sont des particules fines (<2 µm) issues du produit de décomposition des roches siliceuses et appartenant à la famille des phyllosilicates. Les minéraux argileux possèdent une structure ionique qui leur permet d'interagir avec les molécules polaires de l'eau. Ils sont organisés en feuillets à toutes les échelles de la structure argileuse.

Une particule argileuse est constituée par un empilement de feuillets élémentaires qui eux mêmes sont constitués par l'empilement de deux à trois couches élémentaires. Les feuillets sont joints les uns les autres par des liaisons assurant la stabilité et la rigidité de l'ensemble.

Entre les feuillets, les substitutions isomorphes (variation de composition chimique) sont à l'origine de déséquilibres au niveau des charges : elles affaiblissent les forces ioniques de liaisons entre les charges et sont ainsi à l'origine de la capacité des argiles à absorber de façon réversible des cations ou dipôles d'eau alors nécessaires à leur électroneutralité.

Le gonflement interfoliaire est à l'origine du phénomène de retrait-gonflement.

1.5.2 Composition minéralogique et structure des vertisols

Les vertisols⁵ de Guadeloupe (classification FAO, UNESCO, 1974) sont des argiles

gonflantes de la famille des smectiques (montmorillonites) développé en milieu tropical à saison sèche marquée. Ils sont une chance pour l'agriculture en raison de leur haute fertilité minérale. Cependant, il n'est possible d'en tirer profit qu'en y alliant l'irrigation.

Ce sont des sols riches en minéraux basiques et neutres. Leur Capacité d'Echange Cationique (CEC) est élevée et occupée par les cations Ca et Mg. Le feuillet élémentaire est constitué de trois couches. (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

La faible charge et les désordres dans l'empilement des feuillets facilitent leur écartement et l'adsorption de molécules comme l'eau au niveau de l'espace interfoliaire.

La montmorillonite possède donc un fort potentiel de gonflement.

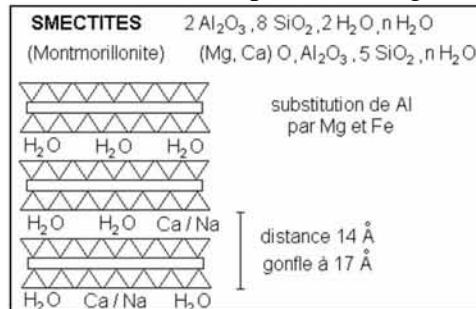


Figure 8 : Structure schématisée d'une particule de montmorillonite

Source : <http://www.u-picardie.fr>

La texture argileuse en Grande Terre et à Marie Galante est supérieure à 60% sur l'ensemble du profil. Les vertisols sont distribués spatialement en séquences courtes (de 10 à 200m) et peuvent être différenciés en deux entités caractéristiques (**Figure 9**):

❶ Les lithosols situés sur les mornes ont une faible épaisseur de sol (entre 20 et 40cm de profondeur donc une faible réserve en eau). Ces sols courts sont riches en calcaire (type rendzine) du fait de la proximité du substrat corallien (démantèlement de la roche mère).

❷ Les sols hydromorphes des vallées ont une profondeur de sols plus importante (supérieur à 40cm et jusqu'à 5m, donc une réserve en eau plus importante). Ils subissent particulièrement le phénomène de retrait gonflement. En profondeur, il peut y avoir un horizon compact et imperméable qui explique l'engorgement au niveau des horizons supérieur du sol.

⁵ : <http://www.fao.org/ag/agL/agll/wrb/newkey.stm#VERTISOLS>

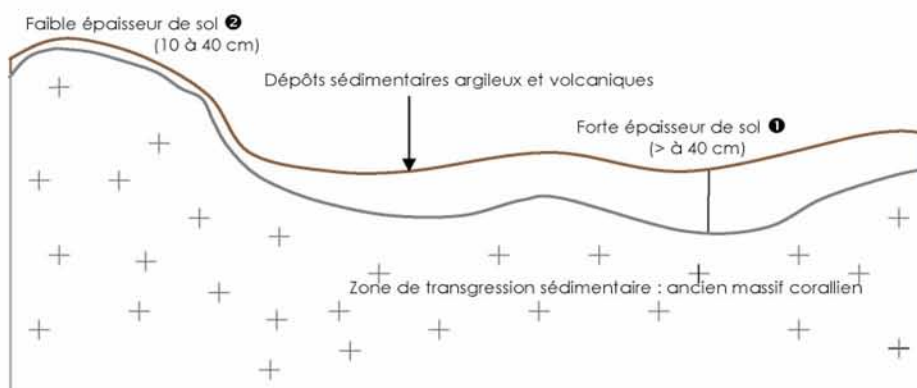


Figure 9 : Profil synthétique sur vertisols (Source : Douard, 2006)

1.5.3 Système poral des vertisols et réserve en eau

Le système de porosité des vertisols peut être schématisé en trois compartiments, différents tant par leur géométrie que par leur mode de formation, et tous trois déformables (Cabidoche, Ozier-Lafontaine, 1995) :

- La porosité matricielle (taille de 0.1 à 1 μm), toujours saturée en eau. C'est une réserve peu disponible pour le végétal, dont le volume dépend du mode d'assemblage des particules d'argiles et de la déformation du réseau poreux lors des phases d'humectation et de dessiccation (Tessier, 1984).

- La porosité macro-fissurale (large de plusieurs centimètres, profonde de plus d'un mètre en période sèche). C'est la conséquence macroscopique de la dessiccation entraînant une diminution de la porosité matricielle (retrait matriciel), et de l'ouverture de larges fissures, délimitant des prismes larges de plusieurs décimètres. Ces macro fissures jouent un rôle essentiel dans l'aération et dans l'infiltration (Ruy et al, 1999). Celle-ci est le siège transitoire entre une éventuelle nappe en réseau, résorbée en quelques jours par le gonflement des parois, qui cause une distribution hétérogène durable de la teneur en eau en profondeur (Jaillard, Cabidoche, 1984).

- La porosité structurale à l'intérieur des prismes (taille de 10 μm à 1 mm). Cette porosité constitue le réservoir d'eau facilement utilisable par les plantes (Ozier-Lafontaine, Cabidoche, 1995), créée en grande partie par l'activité biologique et modifiée par le travail du sol (Cabidoche, Ney, 1987). Elle est principalement tubulaire dans les horizons profonds, et comporte des microfissures dans les horizons de surface.

Cette porosité structurale conditionne le réservoir d'eau dont la plante a besoin pour sa croissance autrement dit la Réserve Utile aussi appelée RU, exprimée en mm, qui désigne le volume d'eau maximal qui peut être stocké dans l'épaisseur de sol colonisé par les racines. Il s'agit d'une notion physique liée au type de sol (Tableau 1).

La RU est liée à la profondeur racinaire mais aussi à la densité d'enracinement et la structure du sol. En effet, toute l'eau stockée dans la RU n'est pas disponible pour la plante à cause des forces de rétention hydrique des sols. La Réserve Facilement Utilisable (RFU) correspond à la fraction de la RU contenant la quantité d'eau réellement disponible pour la plante.

Ces propriétés de « réservoir » sont spécifiques au type de sol et leur connaissance est nécessaire au calcul du bilan hydrique sol-plante. Cette réserve est proportionnelle à la profondeur de sol.

	RU (mm/m)	RFU (mm/m)
Vertisols profonds de Grande Terre	140-150	85 50 (si travail excessif du sol)
Sols ferralitiques de Basse Terre	180-200 (remontées capillaires)	70

Tableau 1 : Capacité de réserve en eau des vertisols de Guadeloupe

Source : Ozier-Lafontaine, INRA-APC

Les deux principales conséquences du système poral des vertisols sont la déformabilité liée au niveau d'hydratation et la très faible conductivité hydraulique. Les variations de volume peuvent provoquer des variations de hauteur de l'ordre de 10% et l'apparition d'entrée d'air sous forme de fentes de retrait dont le positionnement est aléatoire. La conductivité hydraulique est quant à elle inférieure à 10^{-3} m/jour (Ozier-Lafontaine,

Cabidoche, 1995). Ceci induit :

- Une forte hétérogénéité spatiale de la répartition de l'eau en profondeur. Ainsi, l'alimentation des couches profondes s'effectue principalement par les fentes de retrait.
- La fermeture des macro-fissures peut provoquer un phénomène d'anoxie temporaire, préjudiciable à sa croissance de plante (dans le cas où les fentes n'atteignent pas le calcaire sous-jacent).
- Un drainage inadapté, même légèrement excessif pose également ce problème pour la plante.
- Une protection de surface comme un mulch (dégradation naturelle), limite les pertes de l'eau matricielle en surface et celles-ci deviennent nulles en profondeur (Cabidoche et al, 2000). Les plantes apparaissent ainsi comme le seul moteur de la déformation du sol au travers de leur alimentation hydrique par les racines (Richie et Burnett, 1971).
- La profondeur des fentes correspond à celle des racines actives de la culture.
- Une difficulté d'accès à l'eau matricielle pour les cultures à faible densité d'enracinement ou en phase d'installation (canne plantée).

2 Matériels et méthodes

L'hypothèse de départ de cette étude est qu'il existe une corrélation entre la convexité de surface des vertisols de Grande Terre et Marie Galante et la profondeur de la couche argileuse qui repose sur un ancien massif corallien exhumé. En effet, nous pouvons supposer que la topographie du socle calcaire guide l'épaisseur de sédiments ayant donné naissance aux vertisols.

Cette pédogenèse particulière permet d'émettre l'hypothèse que les portions convexes portent des sols plus ou moins courts et caillouteux en leur sommet et des sols plus ou moins profonds sur les versants. Les portions concaves quant à elles portent des sols profonds, constitués de smectites (Le Lann, 1989).

2.1 *Calcul de la convexité de surface du sol*

A partir de données brutes d'altitude, il est possible de calculer la pente d'un relief ainsi que la convexité de la surface du sol (la convexité est égale à l'accroissement de la pente). Une zone convexe se traduit par une augmentation de la pente dans le sens vertical, une zone concave par une diminution de la pente.

Notre méthode expérimentale consiste à déterminer une relation mathématique simple (équation linéaire) entre la convexité de la topographie et la profondeur de sol sous-jacente.

Les mesures topographiques réalisées avec un GPS et un tachéomètre ont été effectuées sur les parcelles expérimentales Tour et Hippolyte 1 en 2007 dans le cadre de ce stage, et sur la parcelle voisine Sahara l'année dernière (Douard, 2006).

2.1.1 Mesures topographiques à l'échelle de la parcelle

L'objectif de la démarche de terrain est d'obtenir un jeu de données XYZ (longitude, latitude, altitude) nécessaire au calcul de la convexité. Pour cela, nous définissons préalablement un maillage de piquets régulier (10x10m, précision métrique) sur chaque parcelle expérimentale qui servira de points de repère lors des mesures topographiques.

2.1.1.1 Géoréférencement avec le GPS

Le GPS est la solution la plus rapide pour obtenir le jeu de données désiré.

Le nombre et le type de mesures effectuées résultent d'un compromis entre le temps disponible et la précision requise pour l'étude.

Les contraintes temporelles nous imposent un choix de mesures sur le code et non sur la phase du signal (**Tableau 2**)

La précision métrique obtenue en code post traitement sur la composante altitudinale est insuffisante pour le futur calcul de convexité (précision centimétrique requise au minimum).

Les variations d'altitudes par rapport au point de référence GPS seront donc mesurées avec une instrumentation plus fine, à savoir un tachéomètre.

Les points GPS servent uniquement à recalibrer les mesures relatives tachéométriques dans la projection cartographique (WGS84, UTM20°N).

Les données acquises sur le code subissent ensuite un traitement différentiel grâce aux données de la station de réception fixe (base de référence ou *Community Base Station*) installée au CIRAD CA de Roujol, Petit-Bourg (**Annexe III**). Cette étape permet d'améliorer la précision en s'affranchissant de certaines erreurs liées à la dispersion du signal électromagnétique dans les hautes couches de l'atmosphère.

Les caractéristiques du positionnement par GPS sont reportés en (**Annexe IV**).

Matériel	Récepteur GPS Pathfinder Power (antenne comprise)	
Canaux	Monofréquence 12 canaux L1 Code & Phase	
	Code :	Phase :
	<i>Précision horizontale :</i>	<i>Précision horizontale :</i>
Précision post traitement	50 cm (RMS) + 1ppm x distance de la base au mobile	±20cm +5ppm avec 10 min d'observation ±10cm +5ppm avec 20 min d'observation ±3-4cm +5ppm avec 45 min d'observation ±1cm +5ppm avec 45 min d'observation avec option centimétrique
	<i>Précision verticale. :</i>	<i>Précision verticale :</i>
	1 m	1,5 x Précision horizontale
Logiciel de saisie		Trimble TerraSync Pro
Logiciel de traitement		Trimble PathFinder Office

Tableau 2 : Récapitulatif des caractéristiques de l'appareillage GPS utilisé
(Source : www.d3e.fr)

2.1.1.2 Mesures tachéométriques

Le tachéomètre combine un théodolite (appareil de base pour les mesures d'angles) et un dispositif de mesure de distance (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

Le dispositif de mesure électronique des longueurs est appelé distancemètre. L'émetteur produit un train d'ondes électromagnétiques et le récepteur analyse l'écho renvoyé par un réflecteur. L'onde émise est appelée onde porteuse, et fait l'objet d'une modulation. Le procédé de mesure consiste à comparer la phase de modulation de l'onde reçue à celle de l'onde émise après le trajet aller-retour. (Lexique Topographique de l'AFT).

Concrètement, la mesure est réalisée par une émission successive de plusieurs fréquences distinctes, permettant ainsi de lever l'ambiguïté sur le nombre de cycles entre l'émetteur et le réflecteur. Les réflecteurs les plus souvent utilisés sont des coins de cubes, ou prismes rhomboédriques.

Les mesures topographiques ont été réalisées à l'aide d'une station totale Trimble série 3300, dont la précision atteint $2\text{mm} \pm 2\text{ppm}$ pour une mesure réalisée dans des conditions standards (bonne météorologie, séquence d'acquisition assez courte ...), ce qui est le cas dans cette étude. Les caractéristiques de performances de l'appareillage utilisé sont reportés en Annexe V.



Figure 10 : Station totale tachéométrique

Source : <http://fr.wikipedia.org>

De plus, l'acquisition est rapide (2 secondes par point) ce qui permet de mesurer une parcelle de 7ha en une journée complète pour un maillage de 10m (soit environ 700 points) à 2 personnes.

Dans un premier temps, on introduit dans l'appareil positionné au dessus d'un point référencé au GPS, la hauteur du réflecteur et de la station ainsi que des paramètres externes tels que la température extérieure et la pression atmosphérique. En effet, les paramètres climatiques peuvent avoir une influence sur la propagation du faisceau laser dans l'atmosphère

On définit ensuite un axe de référence en prenant une 1^{ère} mesure. Les acquisitions suivantes se font en cheminant dans les sillons, et seront définies dans un repère circulaire (r,θ) par rapport à cet axe de référence. L'origine du repère se situe à l'emplacement de la station.

La morphologie des parcelles est telle, qu'il a été impossible de mesurer l'ensemble des points avec une position de station et un axe de référence. Il a donc fallu convertir les données dans un repère commun à l'aide de translation et de rotation. Le jeu de données final est ensuite converti dans la projection cartographique (WGS84, UTM 20°N) (**Figure 11**).

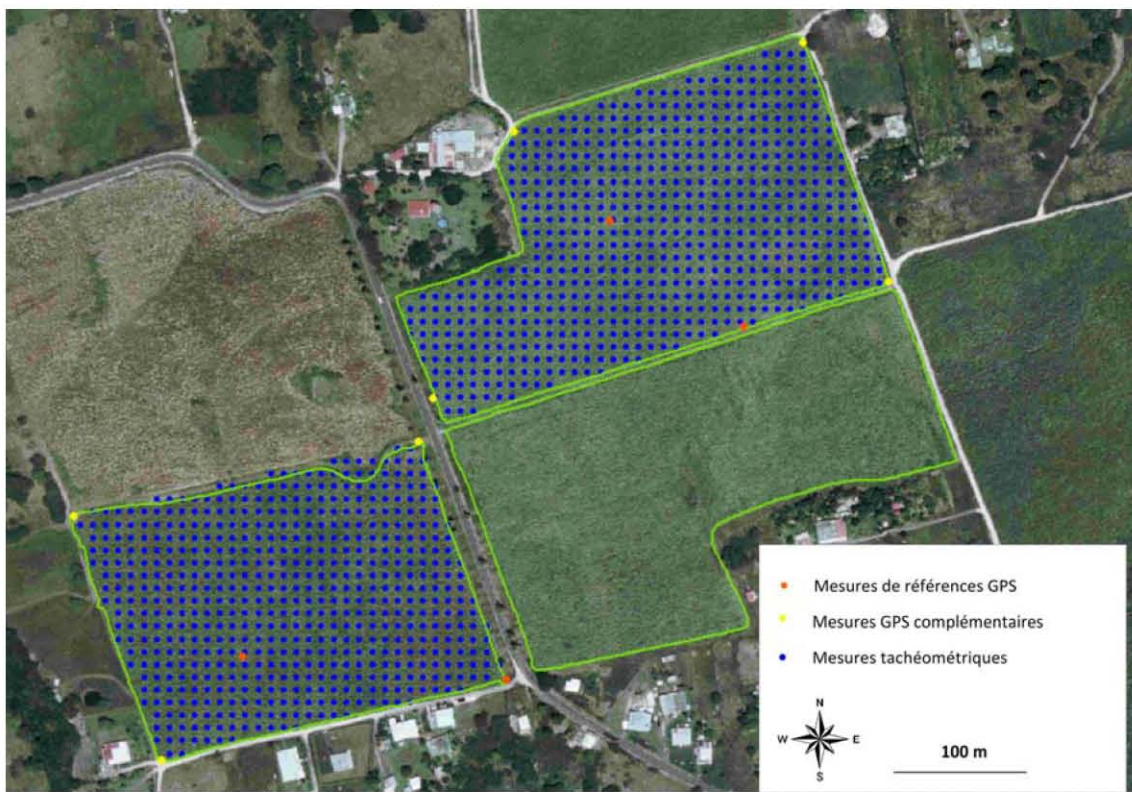


Figure 11 : Géoréférencement (WGS84, UTM20°N) des mesures tachéométriques après interpolation linéaire à 10m effectuées sur les parcelles Tour et Hippolyte1

Source orthophoto : Base de données OGSA⁶, AGRIGUA⁷

2.1.2 Ré-échantillonnage des mesures brutes

Une interpolation est réalisée sur les mesures brutes tachéométriques, en vue d'obtenir un maillage régulier et exact à 10x10m, qui permettra d'automatiser le calcul de convexité avec le logiciel MatLab.

L'interpolation linéaire par triangulation a été choisie pour ré-échantillonner les données. Lorsque z se rapproche d'un sommet (par exemple s_1), l'influence de la pondération

de ce sommet devient prépondérante et l'estimation se rapproche de la valeur observée $z(s_1)$ (Arnaud et Emery, 2000) (**Figure 12**).

Cette méthode est adaptée à notre jeu de données initial (précision métrique sur le maillage de piquets initial) qui est proche du maillage exact (10x10m) désiré.

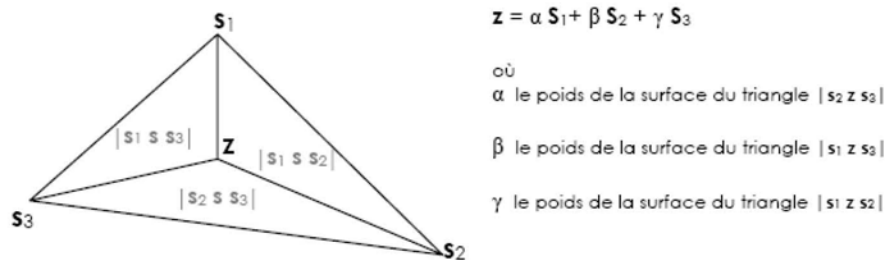


Figure 12 : Interpolation linéaire par triangulation au point z

Source : Arnaud, Emery, 2000

⁶ OGSA : Optimisation de la Gestion des Surfaces Agricoles

⁷ AGRIGUA : Association Guadeloupéenne de Recueil d'Informations Géographiques d'Utilité Agricole

2.1.3 Calcul de convexité

Les données topographiques interpolées linéairement à des valeurs entières (10m) se présentent sous la forme d'une grille référencée orientée N/S, E/O. Elle permet de calculer la convexité au point P considéré. La convexité moyenne est établie comme la moyenne des convexités N/S et E/O (Equation I).

<table style="margin: auto;"> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">N</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">P+1</td> <td style="text-align: center;">f</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">P'-1</td> <td style="text-align: center;">P</td> <td style="text-align: center;">P'+1</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">P-1</td> <td></td> </tr> </table>		N			P+1	f	P'-1	P	P'+1		P-1		$\text{Convexité « N/S » au point P} = \frac{\text{Alt P} - ((\text{Alt P}+1 + \text{Alt P}-1)/2)}{\text{Distance (P+1, P-1)}}$ $\text{Convexité « E/O » au point P'} = \frac{\text{Alt P}' - ((\text{Alt P}'+1 + \text{Alt P}'-1)/2)}{\text{Distance (P'+1, P'-1)}}$ $\text{Convexité moyenne au point P} = \frac{\text{Convexité N/S} + \text{Convexité E/O}}{2}$
	N												
	P+1	f											
P'-1	P	P'+1											
	P-1												

Equation I

Figure 13: Calcul de convexité au point P

Source : Le Lann, 1989

Ce calcul est réalisé en chaque point de la grille pour un écartement donné. Par exemple, un «écartement à 100m» signifiera que les distances (P-1 ; P+1) et (P'-1 ; P'+1) sont égales à 100m. Dans ce cas il faudra connaître les valeurs d'altitude à 50m du point P dans la direction Nord-Sud et Est-Ouest.

2.1.4 Choix de l'écartement du calcul de convexités

Le choix de l'écartement du calcul de convexité fait suite à l'analyse d'un variogramme empirique qui mesure la variance d'une variable en fonction de l'écartement entre deux points. La variance représente la déviation quadratique de la variable x par rapport à la moyenne. L'analyse variographique est omnidirectionnelle autrement le calcul est effectué dans toutes les directions de l'espace enquêté. Ce calcul est réalisé sur l'ensemble des points du jeu de données et permet de déterminer la distance limite d'influence de la valeur d'un point sur son voisin.

D'une manière mathématique, le semi variogramme s'exprime comme la semi variance $\gamma(h)$ en fonction de l'écartement entre deux points $(x_i - y_i)^2$:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} (x_i - y_i)^2 \quad (\text{Equation 1})$$

L'analyse d'un modèle de semi variogramme montre que la variance de deux objets rapprochés spatialement tend à être la même et qu'elle augmente lorsque ces deux objets s'éloignent (la courbe croît d'une valeur de $\gamma(h)$). En effet, il semble logique que deux objets rapprochés spatialement tendent à posséder les mêmes caractéristiques.

Puis la variance marque un palier à partir d'un certain écartement.

La portée est l'écartement correspondant à la valeur du palier et constitue la distance limite d'influence spatiale d'un point sur ces voisins.

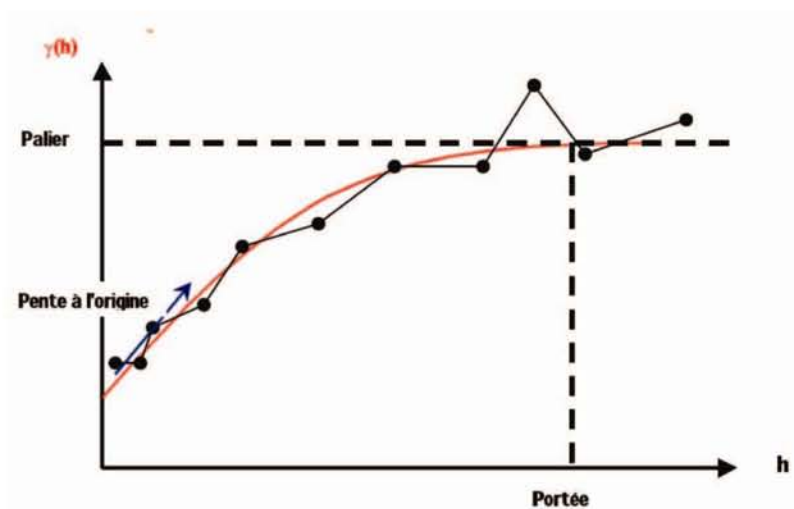


Figure 14 : Eléments d'un modèle de semi variogramme

Source : Drapeau, 2001

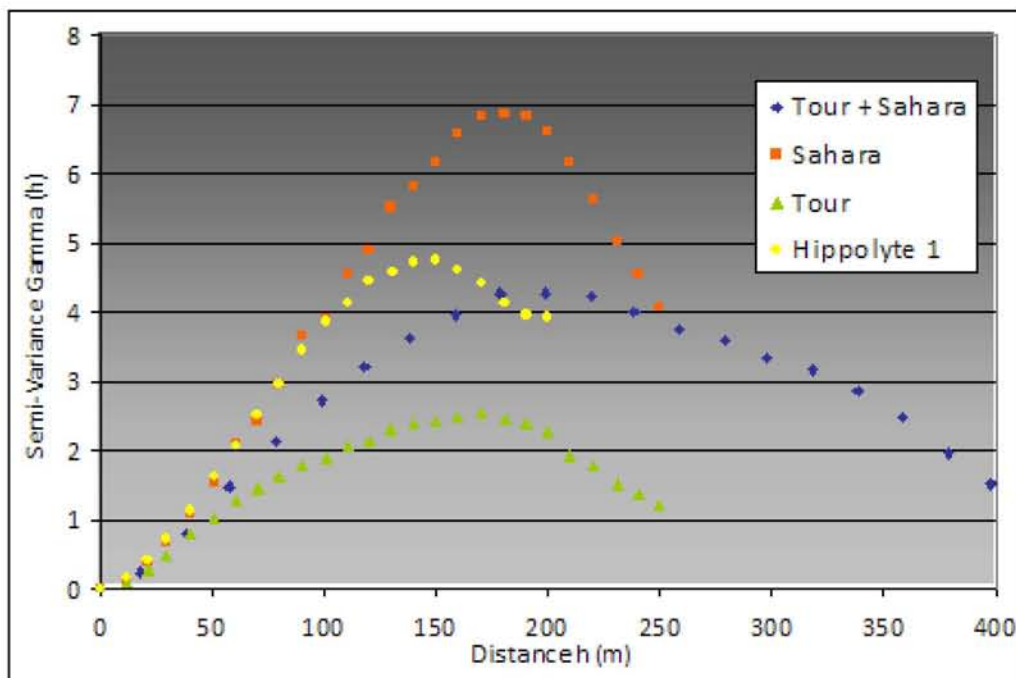


Figure 15 : Analyse variographique des parcelles expérimentales

L'analyse variographique des données altitudinales sur les trois parcelles

expérimentales nous indique que la distance limite d'influence d'un point sur son voisin est de 180m.

Afin de garder une certaine marge de sécurité vis-à-vis de cette valeur, nous avons choisi de calculer les convexités pour un écartement de 100m. Ceci est intéressant car cela nécessitera 25 fois de mesures pour retranscrire la topographie de la parcelle que pour cette étude expérimentale (écartement 20m).

Ces résultats confirment les travaux précédents (Douard, 2006).

Choix d'une méthode de profondeurs de référence adaptée

Deux méthodes de référence peuvent être envisagées pour mesurer la profondeur d'un vertisols :

- **la méthode la résistivité électrique** qui avait été adapté aux vertisols de Guadeloupe à partir de différents sondages (**Annexe VI**). A partir d'une mesure de résistance électrique, on peut déterminer empiriquement la profondeur du socle corallien sous jacent.

La conditions indispensable à l'utilisation d'une telle méthode est que le sol doit contenir un électrolyte (en général l'eau) qui permet la conduction du courant électrique à travers le sol. Pour le cas des vertisols, si le sol est sec l'air pénètre à l'intérieur des fentes de retrait, la couche argileuse devient alors infiniment résistante à laisser passer un courant électrique (milieu discontinu).

- **Le sondage à la tarière** est une méthode d'imagerie directe et destructive du sol. L'acquisition des mesures devient imprécise lorsque le sol est sec, en présence d'une forte pierrosité, ou pour de profondeurs supérieurs à 1.20m (gênant pour les vertisols dont la profondeur peut atteindre 5m). Dans ces conditions, il faut compter plusieurs minutes pour obtenir une mesure de profondeur fiable.

Dans le cadre de ce stage, la méthode de la résistivité électrique avait été choisie pour mesurer des profondeurs de sols qui auraient servies de référence à l'établissement du modèle expérimental. En effet, dans des conditions d'humidité de sol adaptées, la méthode électrique est plus efficace que la prospection tarière car elle permet un échantillonnage plus rapide et permet de mesurer les profondeurs de sols les plus importantes (insondables avec la tarière).

Les mesures résistives devaient avoir lieu à au début de la saison humide (fin mai début juin) afin que la porosité macro fissurale se soit remplie et que les valeurs de résistance soient représentatives d'une profondeur de sol.

Une analyse détaillée de la pluviométrie sur la zone d'étude à partir des données du réseau agro-météorologique de la Guadeloupe (RAINETTE) et des observations de terrain (fermeture des fentes de retrait) devaient permettrent de lancer l'acquisition des mesures.

D'une manière générale, l'année 2007 a connu une saison sèche particulièrement marquée dans le sud Grande Terre La station météorologique de Gardel (RAINETTE) située au cœur de l'exploitation montre un déficit pluviométrique conséquent par rapport aux moyennes mensuelles calculées sur la même zone entre 1989 et 2007 (**Figure 16**). Les pluviométries enregistrées sont à peu près équivalentes à celle de la sécheresse qui sévît en 2001. Courant mai, cette sécheresse s'observe sur le terrain par les nombreuses fentes de retrait et un sol complètement sec dans les premiers centimètres de sols.

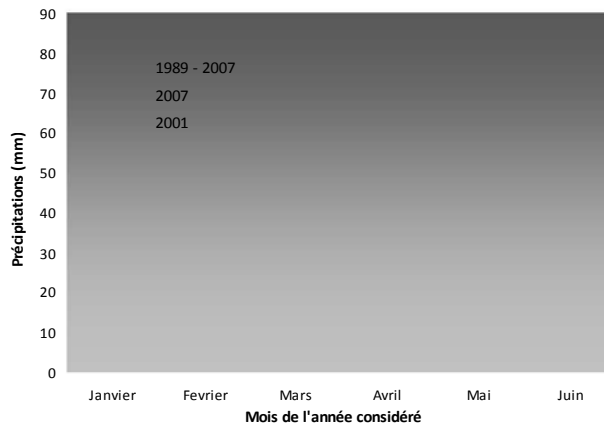


Figure 16 : Evolution mensuelle de la pluviométrie au cours des 6 premiers mois de l'année
Source : Réseau Rainette, 2007

La pluviométrie observée par la station agro météorologique Bois David qui se situe juste à côté des 3 parcelles expérimentales (Tour, Sahara, Hippolyte 1) montre de faibles apports en eau compte tenu de l'évaporation et des besoins hydriques de la canne. (**Figure 17**).

Des mesures ont été effectuées sur deux demi-journées suivantes les pics de pluviométrie du mois de Juin :

08/06/2007, 28.6mm
 11/06/2007, 8.2mm

L'étude de la validité des valeurs résistives acquise a été réalisée en comparant un échantillonnage de profondeurs issues de mesures résistivité et de sondages à la tarière.

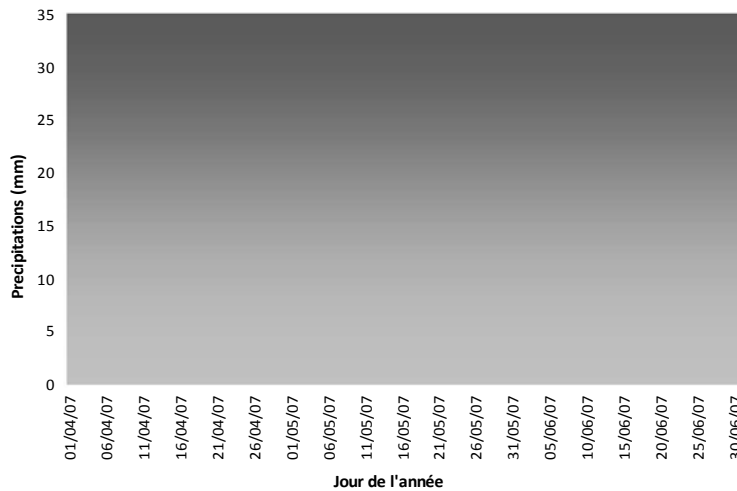


Figure 17 : Evolution quotidienne de la pluviométrie d'Avril à Juin 2007
Source : Réseau agro météorologique Rainette 2007

La comparaison entre les mesures résistives et les mesures tarières (**Figure 18**) montre une corrélation entre les deux méthodes pour l'année 2006 ($R^2=0.88$) qui n'existe pas pour l'année 2007 ($R^2=0.46$). La pente de la droite égale à 1 caractérise l'équivalence de la méthode électrique avec les mesures tarières.

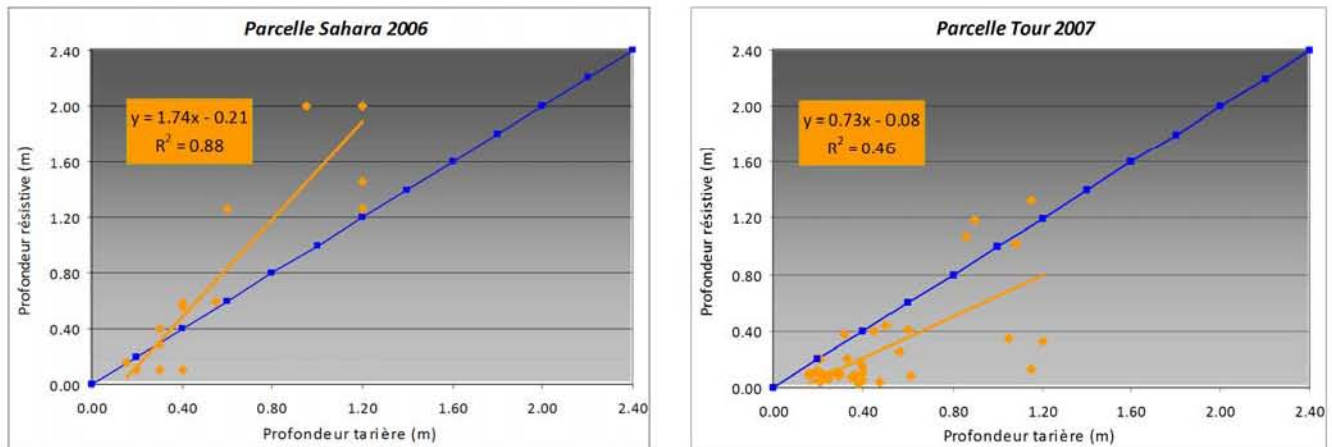


Figure 18 : Étude de la validité des valeurs résistives entre 2006 et 2007

La non validité des mesures résistives nous a contraint à choisir les sondages tarières comme profondeurs de référence. Les conditions climatiques difficiles (sol sec, plusieurs minutes de stationnement pour un sondage) et les contraintes opérationnelles ne permettent pas d'avoir un échantillonnage dense de profondeurs de référence.

C'est pourquoi, des sondages tarières ont été effectués sur les points de convexités calculés avec un écartement de 100m. On obtient ainsi une référence précise de la profondeur sur un point de convexité.

2.2 Cartographie existante des vertisols par le BRGM

Une cartographie délimitant les sols montmorillonitiques squelettiques peu profonds et les sols montmorillonitiques épais a été réalisée par le BRGM (Bureau Recherche Géologique et Minière) en concertation avec l'INRA (Institut national de Recherche Agronomique).

Elle se base sur une analyse géomorphologique de l'île basée sur le principe suivant : les portions de territoires à topographie convexe et/ou en forte pente portent des sols plus ou moins minces alors que les portions biconcaves et à faible pente portent des sols épais.

Les valeurs seuils retenues pour définir la répartition des sols épais sont les suivantes :

- pente inférieure ou égale à 10° ;
 - zone biconcaves : courbure dans le sens de l'écoulement inférieure ou égale à 182° et courbure dans le sens perpendiculaire à l'écoulement inférieure ou égale à 182° .
- Le reste du domaine montmorillonitique porte les sols squelettiques peu profonds.

2.3 Calcul d'un indice de végétation des parcelles de canne à sucre

Le but de cette démarche est de valider le modèle expérimental en comparant nos profondeurs de sols avec un indice de végétation issue d'une image satellite pour laquelle la plante est en période de stress hydrique. Durant cette période, la canne à sucre se développe mieux sur des sols profonds pour lesquels la réserve en eau est plus importante. Cet indice représentatif en outre du développement végétatif est donc un indicateur de la RU.

Un indice de végétation NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) calculé à partir de valeurs de réflectance du couvert végétal et tenant compte de corrections radiométriques sera comparé aux profondeurs de sols issues du modèle topographique expérimental.

Les données brutes disponibles sont des images SPOT 4 et 5, acquises par le CIRAD dans le cadre du projet SUCRETTE⁸ en 2002 et 2003 (Begue *and al.*, 2005). Les images d'une résolution spectrale de 10m, sont au nombre de 20 et permettent de déterminer le développement de la canne à certaines dates.

L'image sera choisie suite à l'examen du calendrier de récolte et en fonction du cycle radiométrique annuel de la canne à sucre.

2.3.1 Calcul de la réflectance

Les capteurs installés sur le satellite acquièrent des mesures de luminance émise par le sol au sommet de l'atmosphère. Elle est exprimée en $W.m^{-2}.sr^{-1}.nm^{-1}$ et représente la quantité d'énergie solaire réfléchie par la surface de la Terre. Elle est généralement codée sur 8 bits en « compte numérique ». Elle est calculée par

$$L = CN / a$$

(Equation II)

CN : compte numérique codé entre 0 et 255,
a est un coefficient d'étalonnage radiométrique

Le coefficient a est fourni avec les images, tenant compte de la sensibilité du capteur A_k , et du Gain utilisé à bord lors de l'acquisition G_m : $a = A_k \times G_m$.

La réflectance ρ représente le rapport de l'énergie réfléchie sur l'énergie incidente. Elle dépend de l'état de surface de la cible dans la longueur d'onde considérée.

Elle est calculée par :

$$\rho = L * \pi / E\lambda * \cos \theta_s$$

(Equation III)

$E\lambda$ est l'éclairement dans la longueur d'onde considérée
 θ_s est l'angle zénithal solaire.

⁸ SUCRETTE : SUIvi de la Canne à sucRE par TélédéTectioN satEllitaire

2.3.2 Corrections géométriques et radiométriques

Les images brutes délivrées par SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre) ont subies un pré traitement au niveau 2A autrement dit une correction géométrique basée sur un modèle de ré-échantillonnage des valeurs tenant compte des distorsions dues aux conditions de prise de vue ainsi que des transformations nécessaires pour transposer l'image dans la projection standard. Ce modèle est calculé sur la base des paramètres de prise de vue connus à priori (éphémérides du satellite, altitude, etc.) sans apport de mesures extérieures.

De plus, les images sont référencées dans l'ancien système St-Anne. Il faudra donc appliquer une translation pour recalculer l'image dans la projection cartographique standard (WGS84, UTM20°N).

Un modèle de corrections radiométriques tenant compte de la géométrie de l'éclairement et des coefficients d'étalonnage des capteurs fournis par SPOT sera également appliqué sur les valeurs de réflectance lors du calcul de l'indice de végétation. Les paramètres physiques et coefficients d'étalonnages absolus des images SPOT4 et 5 disponibles sont reportés dans le **Tableau 3**.

Date	Satellite (capteur)	Niveau	Incidence R=(-)	Soleil (élévation)	Azimuth	Coefficients étalonnage absolu (W.m-2.sr-1.µm-1)			
						XS1	XS2	XS3	XS4
12/07/2002	5 (2)	2a	-5.3	69.8	70.0	2.4325	2.4571	4.2000	15.0177
19/09/2002	4 (2)	2a	6.9	67.2	127.8	1.3545	1.7627	1.2735	8.1911
24/10/2002	5 (2)	2a	-6.8	52.1	143.3	1.3828	1.7846	2.4352	8.8875
06/12/2002	4 (1)	2a	5.9	47.2	155.9	1.4329	1.8185	1.2457	9.0435
21/01/2003	5 (2)	2a	-16.5	46.7	145.7	1.0410	1.3438	1.7671	6.8353
11/02/2003	5 (2)	2a	-23.5	50.1	138.5	1.0032	1.2995	1.8358	8.3357
29/03/2003	5 (2)	2a	-6.1	66.3	122.2	1.0032	1.2995	1.8358	8.3357
30/04/2003	5 (1)	2a	-23.5	68.9	91.7	1.0805	1.2653	1.8716	8.3337
04/05/2003	5 (1)	2a	22.1	74.7	90.1	1.0805	1.2653	1.8716	8.3337
25/05/2003	5 (1)	2a	14.6	73.4	71.5	1.0805	1.2653	1.8716	8.3337

Tableau 3 : Paramètres physiques et coefficients d'étalonnages absolus des images SPOT4 et 5 disponibles

Source : Pellegrino, 2004

2.3.3 Choix d'une image SPOT discriminante de la profondeur de sols

Nous choisissons une image en période de stress hydrique car ce sont les conditions qui prévalent sur la zone d'étude et qui montrent un contraste de développement végétatif maximal, représentatif de la profondeur de sol. L'image est aussi choisie en fonction du calendrier de coupe.

2.3.3.1 La radiométrie de la canne à sucre au cours du cycle annuel

Le profil temporel radiométrique de la canne à sucre est représentatif d'un cycle de croissance (cycle de récolte et cycle cultural) caractéristique.

Dans le cas d'une repousse après coupe, la réponse radiométrique du couvert végétal augmente très rapidement au cours des premiers mois. La valeur de l'indice reste ensuite élevée, et stabilisée jusqu'à la coupe. Sinon, elle décroît si la plante subit un stress hydrique (sénescence des feuilles). C'est le cas de la plupart des parcelles cannes de Grande Terre et Marie Galante qui subissent une saison sèche marquée, se traduisant par une baisse de valeur de NDVI en début de carême (Begué *and al.*, 2005). (**Figure 19**)

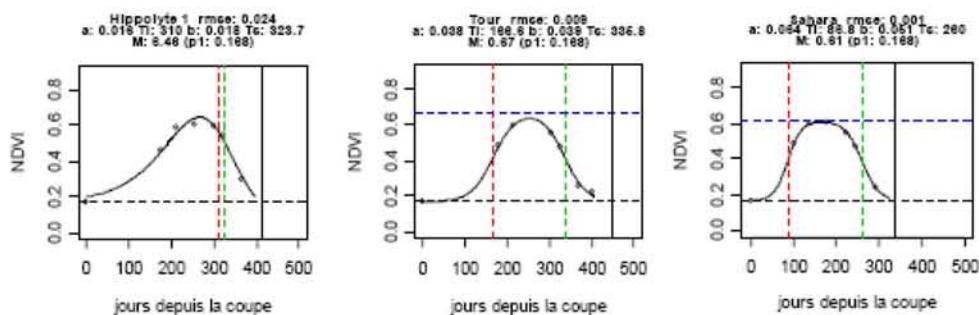


Figure 19 : Evolution du NDVI au cours du cycle 2002-2003 pour les parcelles en rejeton Tour, Hippolyte1, et Sahara de l'exploitation de Gardel

Source : Catsidonis, 2003

L'observation de la réponse radiométrique des parcelles expérimentales montre que la période de stress hydrique commence environ 250 jours après la coupe (pour un cycle

complet de 350 à 400 jours) marqué par une diminution des valeurs de NDVI.

2.3.3.2 Date de récolte des parcelles expérimentales

L'analyse de la réponse radiométrique de la canne à sucre au cours du cycle annuel indique qu'il convient de choisir une image acquise pendant les quelques mois précédents la coupe afin d'avoir une réflectance suffisamment forte du couvert végétal et une période de stress hydrique marqué pour le végétal. La première parcelle expérimentale coupée au cours du cycle 2002-2003 étant Hippolyte 1 (28/04/2003), il faudra utiliser une image précédent cette date.

PARCELLES	Surface	CYCLE:02/03	VARIETE	Date récolte
Hippolyte 1	5.70	4 ^{ème} récolte	B 80 689	28/04/03
Sahara	6.45	1 ^{ère} récolte	Co 64 15	30/04/03
Tour	6.35	2 ^{ème} récolte	Co 64 15	03/05/03

Tableau 4 : Dates de récolte des parcelles expérimentales au cours du cycle cultural 2002-2003

2.3.3.3 Période de stress hydrique pour la plante

Un bilan hydrique simplifié négatif c'est-à-dire pour lequel l'évapotranspiration potentielle (ETP) est supérieure aux précipitations (RR) est représentatif d'une période de stress hydrique pour le végétal. Il a été établi pour la station météorologique Gardel (INRA), pour lequel $RR+ETP < 0$ marque une période de stress hydrique pour le végétal de Février à Juin 2003 (**Figure 20**). L'image sera donc retenue à cette période.

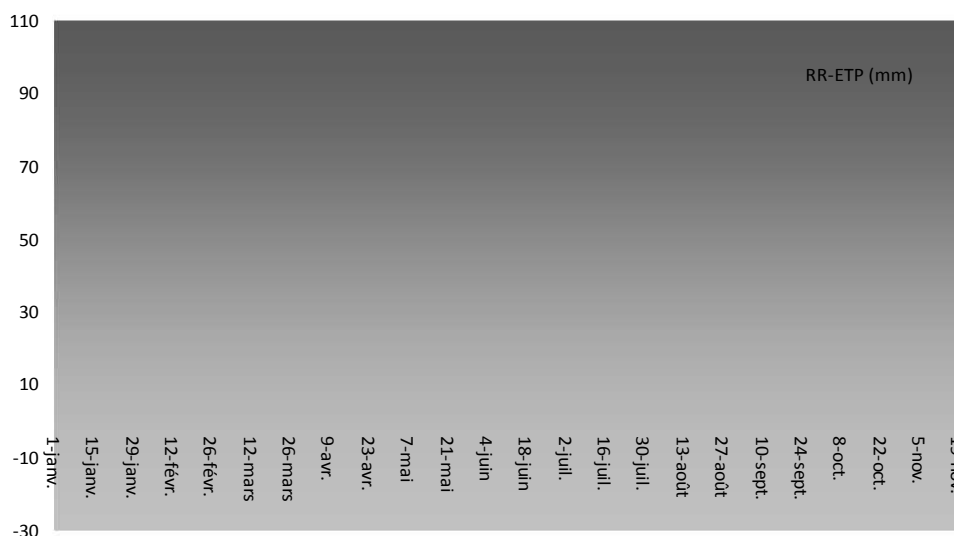


Figure 20 : Bilan hydrique simplifié de la zone d'étude

Nous avons ainsi choisi de travailler sur l'image du 21 Janvier 2003.

2.3.4 Calcul d'un indice de végétation NDVI

Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) reflète l'activité photosynthétique du couvert. Cet indice est couramment utilisé pour caractériser l'activité photosynthétique d'un couvert végétal et donc son développement végétatif. En effet, c'est dans le rayonnement Rouge (R) et Proche Infrarouge (PIR) que la réponse spectrale et les contrastes de développement de la canne les plus importants. Pour cela,

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

(Equation IV)

Pour la canne à sucre, un sol nu a une valeur de NDVI aux alentours de 0.12 et aux alentours de 0.9 pour un couvert végétal dense plutôt aux alentours de 0.9

Le NDVI est calculé à partir des valeurs de réflectance (issues des comptes numériques) via un modèle de conversion adapté qui prendra en compte la dérive satellitaire et l'élévation solaire à cette date. (Figure 21)

Par ailleurs, les bandes spectrales 1 et 3 des images SPOT étant inversées, il est nécessaire dans le modèle d'invertir ces deux bandes.

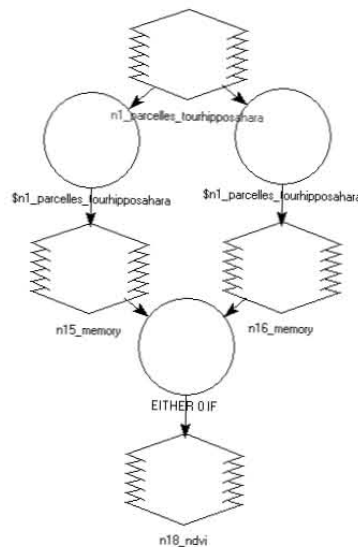


Figure 21 : Modèle de correction radiométrique et calcul d'un indice de végétation NDVI

La démarche de télédétection peut être résumée de cette manière :

Il s'agit de comparer des valeurs de NDVI à une date choisie avec des profondeurs de sols. Pour cela, on compare des représentations de NDVI en classes avec des classes de profondeurs. Le choix des limites de classes est faite sur les mesures des parcelles expérimentales Tour et Hippolyte 1.

Nous appliquons ensuite ces classes à l'échelle régionale du sud Grande Terre à partir du modèle expérimental appliqué au MNT 10x10m (précision altitudinale métrique) et de l'image SPOT du 21 Janvier 2003.

3 Résultats et Discussion

3.1 Modèle expérimental de calcul de la profondeur des vertisols

3.1.1 Calage de la relation linéaire

La relation entre convexités topographiques et profondeurs de sols est établie à partir d'un jeu de données des deux parcelles Tour et Hippolyte 1 afin d'avoir un nombre de points d'échantillonnage suffisant pour établir un modèle réaliste. Cette étape constitue le calage du modèle expérimental (recherche des coefficients de l'équation linéaire).

En observant le nuage de points, on constate que l'ajustement linéaire avec une seule courbe de régression n'a qu'un intérêt limité du fait de la grande disparité entre les profondeurs des zones convexes et concaves (pente nettement différente) et de l'incertitude qui concerne les zones planes.

L'ajustement linéaire en deux parties (zones concaves et convexes), semble donc le mieux adapté. La relation établie sur les sols courts rend bien compte de la réalité. (**Figure 22**).

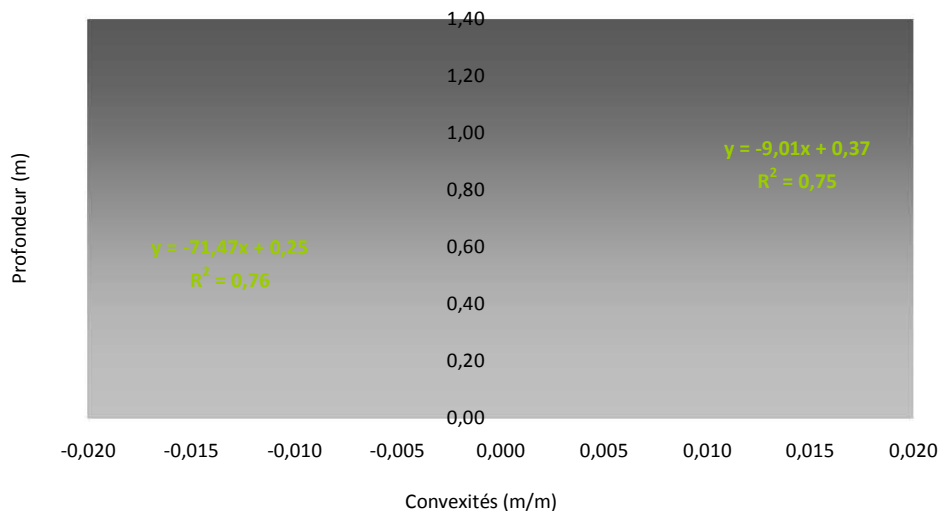


Figure 22 : Ajustement linéaire des données reliant convexités topographiques et profondeurs de sols pour les parcelles Tour et Hippolyte 1.

Au final, on obtient l'ajustement linéaire en deux parties suivant :

$$\text{Zones convexes} : y = -9,01x + 0,37, (R^2 = 0,75)$$

$$\text{Zones concaves} : y = -71,47x + 0,25, (R^2 = 0,76)$$

(Equation V)

D'une manière générale, on peut dire que les zones convexes portent sur des sols courts (profondeurs inférieures à 40cm). Les zones concaves (convexité négative) portent plutôt des sols moyennement épais à épais.

Les zones de convexité faibles présentent la plus forte dispersion des valeurs de profondeurs. Elles correspondent à des zones de transition, de plateaux ou de plaines qui ne sont pas calculées par le modèle.

On peut procéder par interpolation pour lever l'incertitude des profondeurs de sols pour lesquels la convexité de surface est nulle ceci n'est idéal du fait de la variabilité de profondeur du calcaire sous jacent.

3.1.2 Validation statistique de la relation linéaire

Le coefficient de détermination R^2 n'est pas une condition suffisante à la validité statistique de notre modèle. Un modèle comporte toujours un risque d'erreur pour lequel la relation trouvée ne sera pas significative. Afin de tester la validité statistique de notre modèle, nous appliquons le test de Fisher qui évalue le rapport entre la variance expliquée par le modèle de régression et la part de la variance qui reste inexpliquée. Si le coefficient de Fisher F est supérieur à la valeur critique, cela signifie la part d'erreur est inférieure à la part expliquée du modèle. Les résultats (**Tableau 5**) montrent que la part de la variable expliquée est significativement supérieure à la part de la variable non expliquée donc que notre test statistique est valable et que notre équation retenue est bien représentative de la réalité.

Parcelles Tour Hippolyte 1	F	Valeur critique de F
Zones	23.97	0.00120
Zones concaves	25.93	0.00094

Tableau 5 : Validation statistique de la loi avec le test de Fisher

3.1.3 Evaluation de la précision du modèle

Dans le but d'avoir une démarche scientifique cohérente, il convient d'évaluer la précision de notre modèle statistique en comparant les profondeurs de sols calculées (modèle expérimental) et observées (sondages tarières).

Nous choisissons l'erreur quadratique moyenne comme évaluation de la précision de notre modèle. Le RMSE (Roots Mean Square Error) est calculé comme la moyenne des écarts au carré entre les profondeurs de référence tarière et les profondeurs issues du modèle expérimental.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{\text{observé}} - x_{\text{calculé}})^2}$$

(Equation VI)

$x_{\text{observé}}$: profondeur de référence tarière (m)

$x_{\text{calculé}}$: profondeur issue du modèle (m)

n : nombre de points de convexité

On peut aussi calculer la moyenne des écarts relatifs définie comme la moyenne du pourcentage de dispersion entre les valeurs calculées par le modèle et les valeurs observées. Elle caractérise le pourcentage d'erreur entre le modèle et la réalité.

$$E_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{\text{observé}} - x_{\text{calculé}}}{x_{\text{calculé}}} \right) * 100$$

(Equation VII)

$x_{\text{observé}}$: profondeur de référence tarière (m)

$x_{\text{calculé}}$: profondeur issue du modèle (m)

n : nombre de points de convexité

Les résultats indiquent une dispersion moyenne du modèle expérimental avec les profondeurs de référence de 4cm ($\pm 10,90\%$ d'erreur entre le modèle et la réalité) pour les zones convexes et de 12cm pour les zones concaves ($\pm 18,38\%$ d'erreur). (**Tableau 6**). La précision du modèle est donc bonne compte tenu des objectifs de l'étude. L'imprécision sur les zones concaves s'explique par les limites des sondages tarières pour les sols épais.

Parcelles Tour Hippolyte 1	RMSE (m)	Moyenne des écarts relatifs (%)
Zones convexes	0.04	10.90%
Zones concaves	0.12	18.38%

Tableau 6 : Evaluation de la précision du modèle expérimental

La carte des altitudes (précision altitudinale millimétrique) a été dressée à partir des mesures topographiques réalisées avec le GPS et le tachéomètre est présentée **Figure 23**.

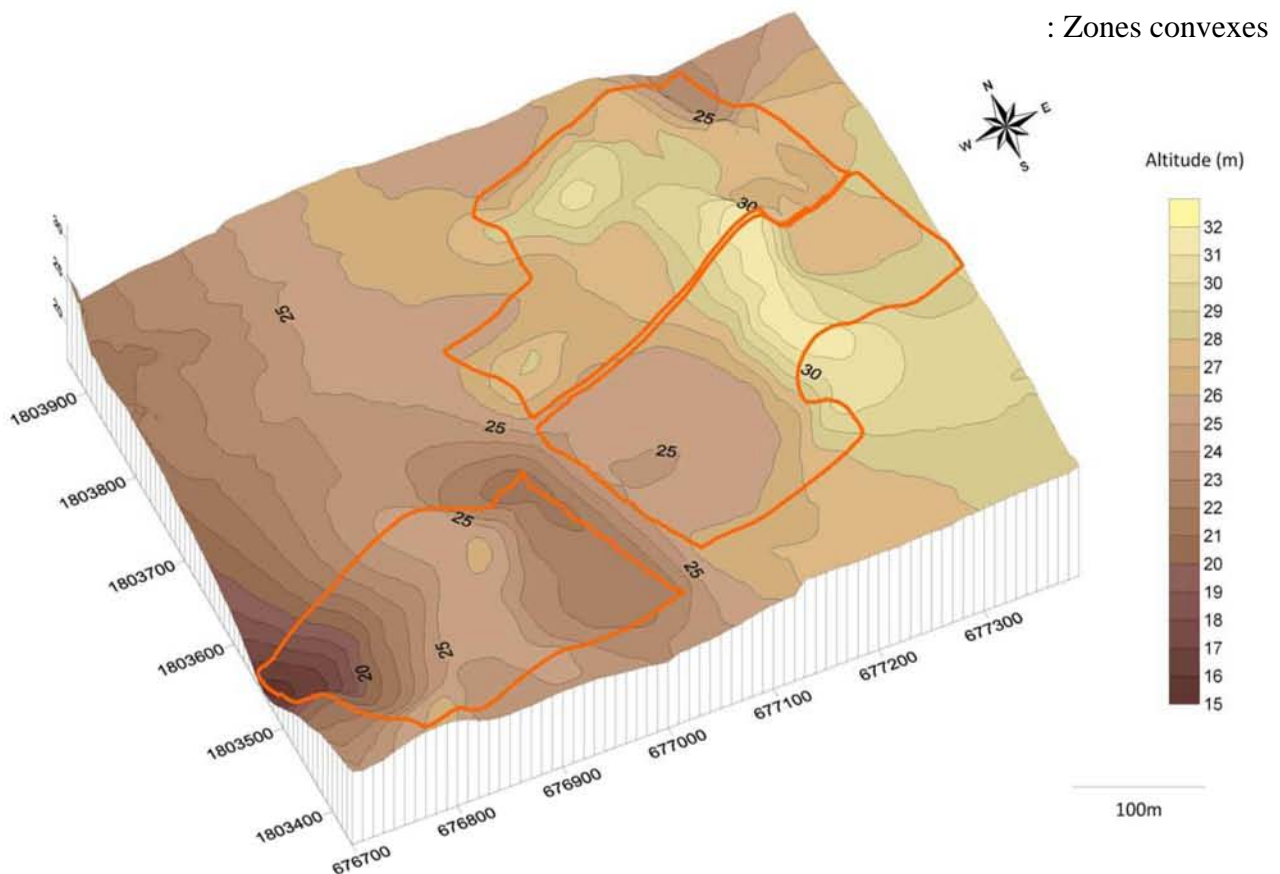


Figure 23 : Cartographie altitudinale 3D des parcelles expérimentales

On observe que les zones convexes se situent principalement au milieu des parcelles Tour, Sahara, Hippolyte 1. Ces zones de mornes sont matérialisées par des sols courts (profondeur issue du modèle inférieure à 40 cm).

Nous avons traduit cette carte en valeurs de convexités au pas de 100m puis en profondeur via notre modèle.

Le faible nombre de points d'échantillonnage (seulement 20 points de convexités comparés à de valeur de référence tarière) sur les deux parcelles expérimentales Tour et Hippolyte 1 qui ont servies à établir le modèle nous ont conduit à utiliser la méthode du Krigeage pour interpoler à 10m les valeurs de profondeurs issues de notre loi statistique qui est la méthode la plus adaptée à la variabilité spatiale des valeurs de profondeur (sa fonction de pondération est fixé suite à l'analyse du variogramme contrairement à une approche déterministe telle que l'interpolation linéaire).

Au final, on obtient une cartographie de la répartition des profondeurs de sols. Les résultats (Equation V) peuvent alors être divisé en classes que l'on peut ajuster selon nos besoins. Par exemple, une séparation en classes de 10cm fournit des informations précises sur les limites de distribution de la profondeur de sol. (

Figure 24)

Par ailleurs, si l'on considère un vertisols comme profond à partir de 70cm (Cabidoche et al, 2000), on peut également le diviser suivant ces deux classes. Mais, on observe que les parcelles expérimentales comportent essentiellement des sols considérés comme courts.

La séparation en deux classes de profondeur est alors plus discriminante pour une limite fixée à 0.4m.

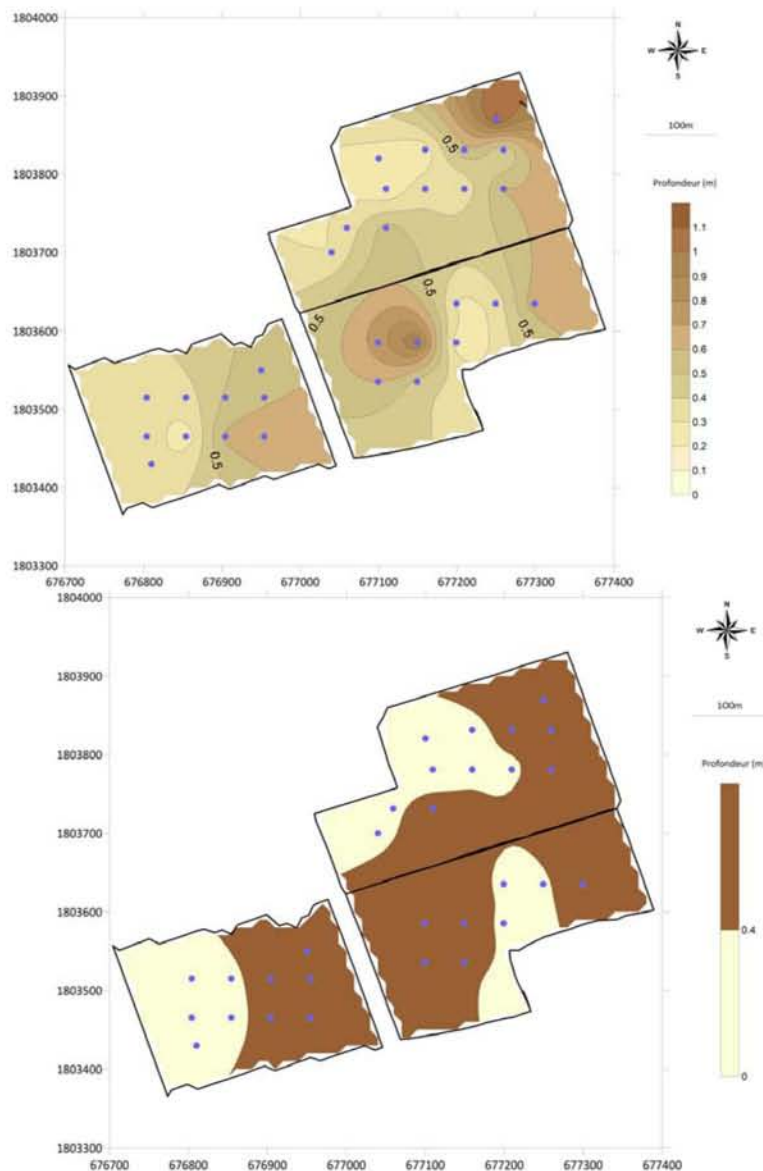


Figure 24 : Distribution des profondeurs en différentes classes

Les bordures sont soumises à la plus forte incertitude car les points de convexités sont souvent à plus de 50m du bord.

Les points bleus correspondent aux points de convexité calculés avec un écartement à 100m. Les jeux de données ont été traités séparément afin d'éviter une interpolation pour au calcul de convexité qui nécessite un jeu de données cohérent. Pour cette raison, il n'y a pas de points de convexités au milieu des parcelles Tour et Sahara.

3.2 Validation du modèle topographique expérimental

3.2.1 Validation du modèle expérimental à l'échelle de la parcelle

La validation du modèle expérimental s'effectue en évaluant la précision du modèle sur une autre parcelle que celles qui ont servies à le constituer. L'erreur mesurée doit être du même ordre de grandeur que celle calculée sur les parcelles ayant servies à la conception du modèle.

Zones convexes : $y = -9.01x + 0.37$			Zones concaves : $y = -71,47x + 0,25$		
Convexité (m/m)	RMS (m)	Ecarts relatifs (%)	Convexité (m/m)	RMS (m)	Ecarts relatifs (%)
0.003	0.026	32.07%	-0.011	0.035	15.52%
0.009	0.003	16.11%	-0.006	0.015	15.96%
0.015	0.001	15.54%	-0.003	0.161	46.70%
Moyenne	0.12	21.24%	Moyenne	0.33	26.06%

Tableau 7 : Validation de l'équation expérimentale sur la 3^{ème} parcelle Sahara

Les plus grands écarts sont dus à la contribution des points de convexités faibles (-0.03 et 0.03 m/m) qui sont associés à de fortes incertitudes.

3.2.2 Comparaison du modèle expérimental avec des cartographies existantes

- Le modèle expérimental obtenu à l'échelle de la parcelle est d'abord comparé à une extraction de la cartographie réalisée par le BRGM à partir de pentes et de concavités. (**Figure 25**). Les sols épais matérialisés en marron ont été déterminés comme des zones concaves ayant une pente ou inférieure ou égale à 10.

La comparaison du modèle expérimental avec la cartographie BRGM montre de nombreuses similarités sur la répartition des profondeurs de sols mais ceci est logique car les deux modèles ont été construits sur les mêmes bases topographiques. Le modèle BRGM inclut la notion de pentes en plus. On observe que la limite entre sols courts et sols profonds du modèle BRGM correspond relativement bien pour la profondeur 40cm de notre modèle expérimental.

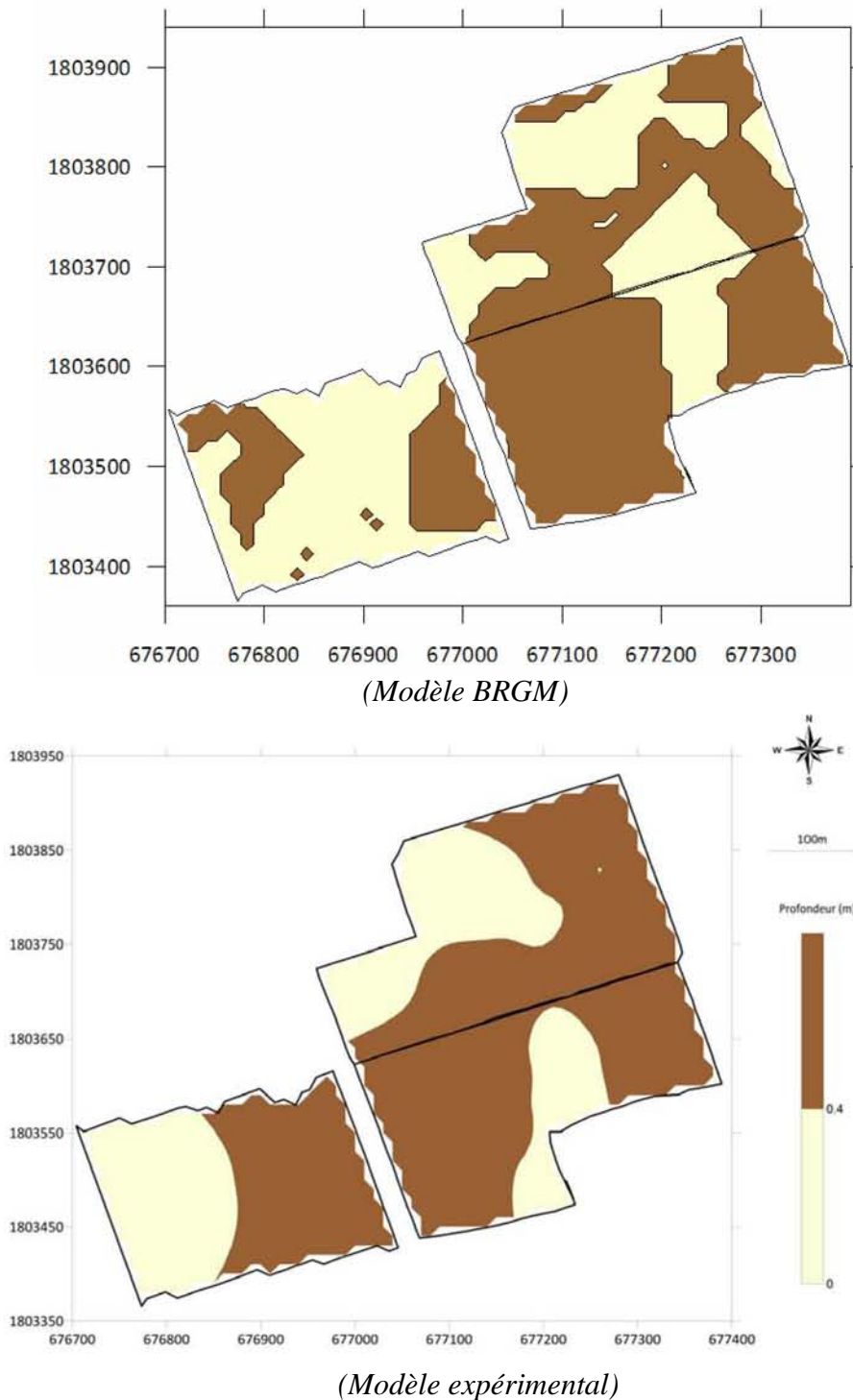


Figure 25: Comparaison du modèle expérimental avec une cartographie existante

- Le modèle expérimental est ensuite étendu sur le Sud Grande Terre à partir d'un MNT topographique à 10m (précision altitudinale : 1m) réalisé en 1999 par le bureau d'étude OPSIA spécialisé dans la topographie, la photogrammétrie, l'orthophotographie et la cartographie.

Les valeurs brutes d'altitude sont transformées en convexités pour un écartement à 100m. Ces dernières sont ensuite converties en profondeur via l'équation de notre modèle. Les zones de convexité faibles (entre -0.005 et 0.005 m/m) sont éliminées pour lever l'ambiguïté qui existe sur ces profondeurs de sols, puis interpolées avec la méthode du krigeage.

Le modèle expérimental étendu est ensuite comparé à la cartographie réalisée par le BRGM. (Figure 26).

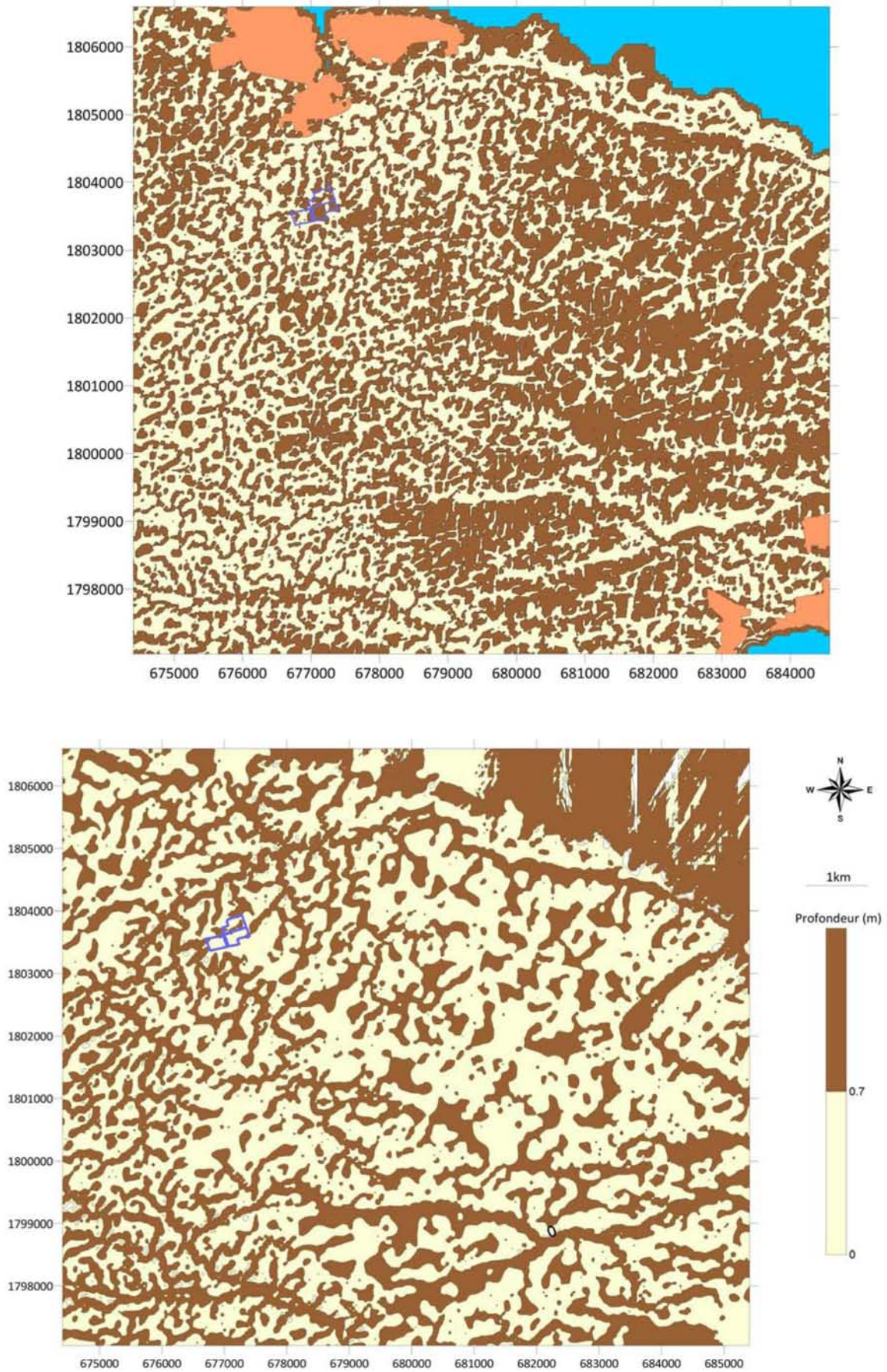


Figure 26 : Comparaison du modèle expérimental étendu avec une cartographie existante

Le modèle expérimental montre quelques similarités avec celui du BRGM sur des transitions entre sols courts et profonds au niveau des limites de grands ensembles. Cependant, des différences existent qui peuvent s'expliquer par la précision altitudinale métrique du MNT topographique utilisée qui est insuffisante pour avoir un calcul de convexité suffisamment représentatif d'une profondeur de sol.

On remarque que la distribution des profondeurs du modèle expérimental étendu est différente de celle établie par le modèle sur les parcelles expérimentales car le jeu de données altitudinales n'est pas le même.

3.2.3 Comparaison du modèle expérimental avec un indice de végétation

Il s'agit de valider notre modèle en le comparant l'image SPOT du 21 Janvier 2003, date à laquelle le développement de la canne est représentatif d'une profondeur de sol. Pour cela, nous avons défini le protocole suivant :

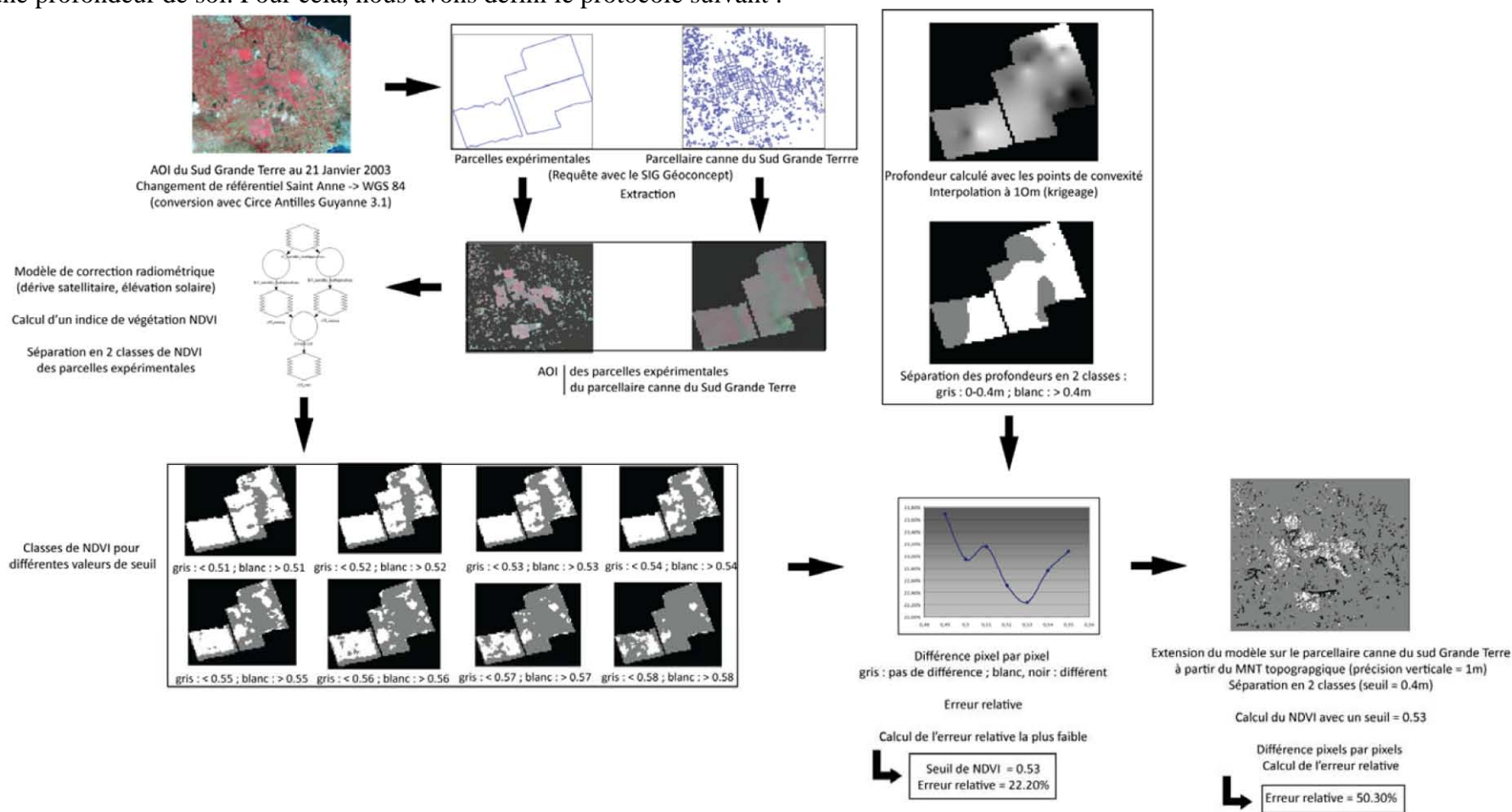


Figure 27 : Récapitulatif de la démarche télédétection pour valider le modèle expérimental

La répartition des profondeurs issues du modèle expérimental nous permet de fixer une valeur seuil discriminante de 40cm car celle-ci montre une répartition équitable entre sols courts et épais. Il s'agit ensuite d'ajuster deux classes de l'indice de végétation NDVI qui soient représentatives du seuil fixé.

Pour cela, une AOI (Area of Interest) est appliquée sur l'image satellite et sur la cartographie du modèle (importé préalablement dans le logiciel de télédétection) afin d'extraire les parcelles expérimentales avec les mêmes bornes cartographiques.

Un modèle conditionnel permet de convertir les valeurs de NDVI en deux classes et de séparer les deux classes discriminantes du modèle.

On obtient deux images pixellisées à 10m avec les valeurs qui expriment le choix conditionnel par une classification de 0 et de 1. Les différences pixels par pixels sont recueillies puis rapportés au nombre de pixels total de l'image. On obtient ainsi une erreur relative entre les deux classes de NDVI ajustées et les deux classes de profondeurs discriminantes du modèle.

$$Er = \frac{\sum \text{pixels d'erreurs}}{\sum \text{pixels}}$$

(Equation VIII)

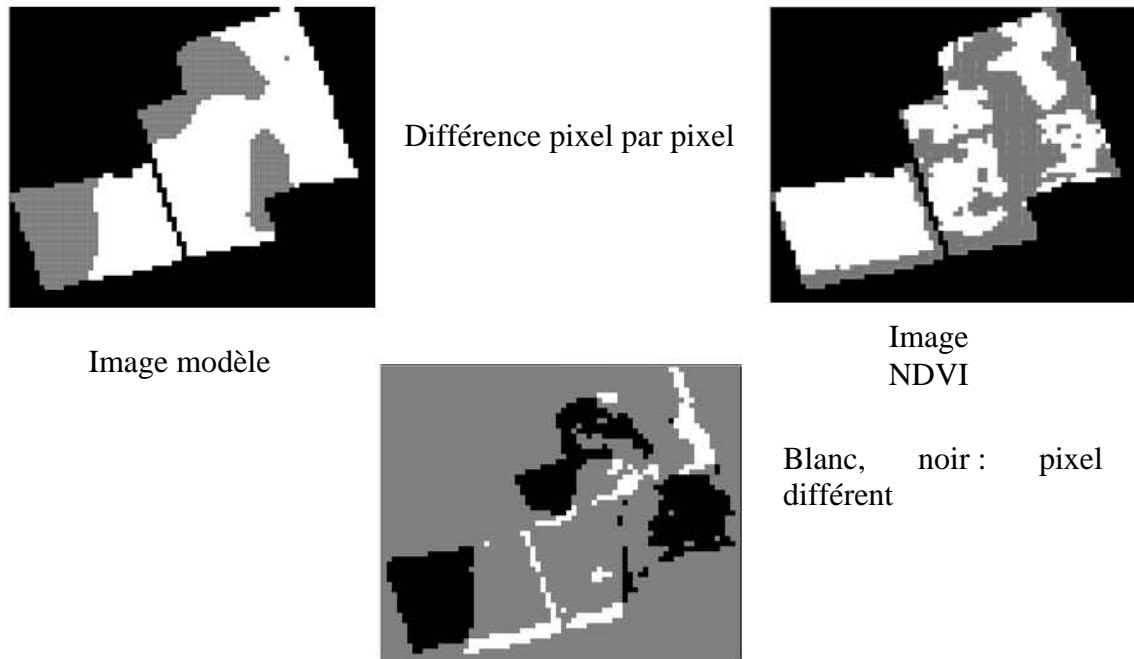


Figure 28 : Méthode d'ajustement entre le modèle expérimental et l'indice NDVI

Nous faisons varier le seuil de NDVI afin d'obtenir l'erreur la plus faible et calculons l'erreur relative associée.

La distribution des valeurs de NDVI nous indique visuellement que l'ajustement recherché se situe entre les seuils 0.5 et 0.6.

La valeur seuil retenue pour fixer les classes de NDVI est de 0.53 car c'est celle qui fournit l'erreur la plus faible. L'erreur relative entre ces deux classes de NDVI et les classes de profondeurs du modèle expérimental est de 22.20% (**Figure 29**)

Par conséquent, un indice NDVI supérieur à 0.53 caractérise une profondeur supérieure à 40 cm ce qui confirme l'hypothèse de départ selon laquelle le développement végétatif est supérieur sur les sols considérés comme profonds en période de stress hydrique.

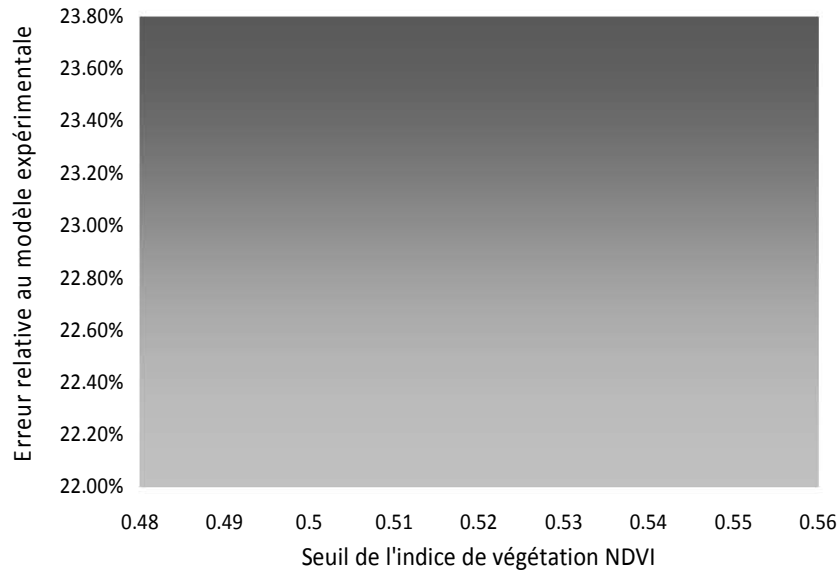


Figure 29 : Erreur du seuil d'ajustement des deux classes de NDVI pour deux classes de profondeurs du modèle expérimental à l'échelle de la parcelle

Cette erreur pourrait diminuer avec l'application d'une zone tampon (ou buffer) de 15m pour limiter les effets de bordures. En effet, si un pixel comporte du sol nu et de la végétation la valeur de NDVI n'est pas représentative du développement végétatif.

Une corrélation pixel par pixel est ensuite réalisé à partir de ce seuil sur l'ensemble des parcelles de canne du Sud Grande Terre (**Tableau 8**). Cette étape est réalisée à partir de notre modèle expérimental étendu avec le MNT topographique.

Nombre total de pixels	216541
Nombre de pixels différents	108918
Erreur relative	50,30%

Tableau 8 : Comparaison des deux classes de NDVI et des deux classes du modèle expérimental à l'échelle des parcelles de canne du sud Grande Terre

La forte erreur relative obtenue de 50,3% s'explique par la combinaison de différents facteurs :

- l'imprécision du MNT topographique à partir duquel le modèle expérimental a été étendu.
- des effets de bord cumulés. En effet, aucune zone tampon n'a été appliquée sur la zone et les valeurs de NDVI peuvent s'en retrouver faussées.
- enfin, le développement végétal des parcelles de canne à l'échelle régionale pour une date considéré varie grandement de sorte que l'ajustement fixé sur les parcelles expérimentales n'est pas vraiment valide à cette échelle.

4 Conclusion et perspectives

Cette étude de 5 mois avait pour but d'établir une relation entre la convexité topographique et la profondeur des vertisols de Guadeloupe. Les données de profondeurs serviront à alimenter le module de bilan hydrique du modèle croissance de la canne à sucre Mosicas par le biais de la Réserve Utile qui est encore à l'heure actuelle déterminée de manière empirique.

Les calculs de convexités réalisées sur les parcelles expérimentales de l'exploitation de Gardel SA Tour et Hippolyte 1, ainsi que la parcelles Sahara (Douard, 2006) et comparés à une profondeur calculée avec une méthode de référence permettent de tirer plusieurs enseignements :

- L'hypothèse de départ selon laquelle le relief de surface est corrélé à la profondeur des vertisols est confirmée.
- L'utilisation d'un variogramme adapté aux valeurs altitudinales permet de retranscrire la topographie des vertisols avec peu de données. Un écartement à 100m semble être un écartement adéquat pour une utilisation à grande échelle.
- L'ajustement de la relation *profondeur* = *f(convexité)* est optimisé lorsque qu'on sépare les zones convexes des zones concaves.
- La relation sur les zones convexes a un bon coefficient de corrélation ($R^2 = 0.75$) qui pourrait être amélioré avec des mesures complémentaires sur des zones convexes. En effet, du fait de l'inopérabilité de la méthode résistive, seules quelques profondeurs de référence ont été mesurées sur les points de convexités. Cette relation définit les convexités topographiques positives comme portant des sols considérés comme courts c'est-à-dire avec des profondeurs inférieures à 40cm.
- La relation sur les zones concaves et faibles convexités est plus délicate à ajuster même si le coefficient de corrélation est bon ($R^2=0.76$). Les écarts sont plus grands que pour les zones convexes car l'utilisation des sondages à la tarière devient imprécise pour les profondeurs de sols supérieures au mètre.

Afin d'affiner les résultats du modèle topographique expérimental, il serait donc intéressant d'acquérir les mesures résistives sur les parcelles Tour et Hippolyte 1 qui ont servies à établir notre modèle et de les comparer aux valeurs de convexités calculées avec un écartement plus petit (afin d'avoir plus de points d'échantillonnage). Ceci permettrait d'affiner l'ajustement du modèle en particulier pour les zones plus profondes (> 1.20m) qui ne sont pas prises en compte par les sondages tarières.

- Le modèle topographique expérimental a été validé de trois manières. Tout d'abord, à l'échelle de la 3^{ème} parcelle expérimentale, en comparant l'erreur intrinsèque du modèle (entre profondeur calculée et observée) avec celle établie sur la parcelle de validation. L'erreur obtenue sur la parcelle de validation, de 21.24 % pour les zones convexes et de 26.06% pour les zones concaves et du même ordre de grandeur que celle qui est intrinsèque au modèle.

Le modèle est également validé par comparaison avec une cartographie BRGM existante qui a permis de fixer un seuil de profondeur de sols discriminant à 40cm.

Enfin, le modèle expérimental est validé par la démarche télédétection. La limite entre sols courts et épais a permis d'ajuster deux classes d'un indice de végétation représentatives d'un développement végétatif supérieur sur les sols profonds en période de stress hydrique.

- Cette étude pourra servir de base de réflexion au projet de cartographie numérique des sols à argiles gonflantes en milieu carbonaté tropical que mèneront conjointement le BRGM, l'INRA et le CIRAD à partir de 2008.

Liste des figures

Figure 1 : Géographie et géodynamique de l'arc Antillais	5 -
Figure 2 : Carte pédologique de la Guadeloupe continentale	5 -
Figure 3 : Exemple de répartition des précipitations annuelles moyennes (en mm) entre 1986 et 2000 en Guadeloupe.....	6 -
Figure 4 : Image satellite SPOT5 de l'exploitation de Gardel SA en mai 2003	7 -
Figure 5 : Répartition de la sole cannière de Guadeloupe.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 6 : Canne à sucre, <i>Saccharum officinarum L</i>	9 -
Figure 7 : Les cycles annuels de repousse de la canne à sucre	10 -
Figure 8 : Structure schématisée d'une particule de montmorillonite.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure 9 : Profil synthétique sur vertisols	11 -
Figure 10 : Station totale tachéométrique	Erreur ! Signet non défini.
Figure 11 : Géoréférencement (WGS84, UTM20°N) des mesures tachéométriques après interpolation linéaire à 10m effectuées sur les parcelles Tour et Hippolyte1	16 -
Figure 12 : Interpolation linéaire par triangulation au point z	17 -
Figure 13: Calcul de convexité au point P	17 -
Figure 14 : Eléments d'un modèle de semi variogramme.....	18 -
Figure 15 : Analyse variographique des parcelles expérimentales	18 -
Figure 16 : Evolution mensuelle de la pluviométrie au cours des 6 premiers mois de l'année ..	20 -
Figure 17 : Evolution quotidienne de la pluviométrie d'Avril à Juin 2007	20 -
Figure 18 : Etude de la validité des valeur résistives entre 2006 et 2007	21 -
Figure 19 : Evolution du NDVI au cours du cycle 2002-2003 pour les parcelles en rejeton Tour, Hippolyte1, et Sahara de l'exploitation de Gardel	23 -
Figure 20 : Bilan hydrique simplifié de la zone d'étude	24 -
Figure 21 : Modèle de correction radiométrique et calcul d'un indice de végétation NDVI-	25 -
Figure 22 : Ajustement linéaire des données reliant convexités topographiques et profondeurs de sols pour les parcelles Tour et Hippolyte 1.	26 -
Figure 23 : Cartographie altitudinale 3D des parcelles expérimentales.....	28 -
Figure 24 : Distribution des profondeurs en différentes classes	30 -
Figure25: Comparaison du modèle expérimental avec une cartographie existante.....	31 -
Figure 26 : Comparaison du modèle expérimental étendu avec une cartographie existante-	32

-

Figure 27 : Récapitulatif de la démarche télédétection pour valider le modèle expérimental- 34

-

Figure 28 : Méthode d'ajustement entre le modèle expérimental et l'indice NDVI..... - 36 -

Figure 29 : Erreur du seuil d'ajustement des deux classes de NDVI pour deux classes de profondeurs du modèle expérimental à l'échelle de la parcelle - 37 -

Liste des tableaux

Tableau 1 : Capacité de réserve en eau des vertisols de Guadeloupe - 12 -

Tableau 2 : Récapitulatif des caractéristiques de l'appareillage GPS utilisé - 15 -

Tableau 3 : Paramètres physiques et coefficients d'étalonnages absolus des images SPOT4 et 5 disponibles..... - 23 -

Tableau 4 : Dates de récolte des parcelles expérimentales au cours du cycle cultural 2002-2003..... - 24 -

Tableau 5 : Validation statistique de la loi avec le test de Fisher - 27 -

Tableau 6 : Evaluation de la précision du modèle expérimental..... - 28 -

Tableau 7 : Validation de l'équation expérimentale sur la 3^{ème} parcelle Sahara..... - 30 -

Tableau 8 : Comparaison des deux classes de NDVI et des deux classes du modèle expérimental à l'échelle des parcelles de canne du sud Grande Terre..... - 37 -

Liste des équations

(Equation I) : Calcul de la convexité..... **Erreur ! Signet non défini.**

(Equation II) : Semi variogramme - 18 -

(Equation III) : Luminance..... - 22 -

(Equation IV) : Réflectance..... - 22 -

(Equation V) : Indice NDVI..... - 25 -

(Equation VI) : Modèle expérimental retenu - 26 -

(Equation VII) : RMSE - 27 -

(Equation VIII) : Erreur relative du modèle expérimental - 27 -

(Equation IX) : Erreur entre le modèle expérimental et le NDVI..... - 36 -

Liste des annexes

Annexe I : Répartition des agents CIRAD dans le monde - 45 -

Annexe II : Les stades végétatifs de la canne à sucre au cours du cycle annuel..... - 46 -

Annexe III : Station GPS permanente de Roujol installée au CIRAD CA - 47 -
Annexe IV : LE GPS: Global Positioning System..... - 48 -
Annexe V : Caractéristiques du la station totale Trimble 3300 DR..... - 53 -
Annexe VI : Cartographie de la profondeur d'un vertisol à partir de la méthode de la
résistivité électrique..... - 54 -

Bibliographie

Bibliographie :

- **Evaluation de méthodes d'estimation de l'épaisseur d'un vertisol en Guadeloupe**
P.Douard, stage de Master 2 professionnel 2006, 45p
- **Etude de la relation entre le relief de la surface et la profondeur du sol. Application aux sols à argiles gonflantes (vertisols) en zone tropicale à saison sèche marquée (Grande Terre, Guadeloupe)**
L. Le Lann, stage de fin d'études, 1989, 25p
- **Validation d'un modèle de croissance de la canne à sucre et application à l'optimisation d'un calendrier d'irrigation**
JM.Rémond, stage de DEA 2002, 43p
- **Cartographie et évaluation des surfaces cultivées en canne à sucre (1995 à 1999)**
G. Laine, rapport final CIRAD 2001, 135p
- **Compte rendu final du projet de recherche SUCRETTE**
A. Begue, Compte rendu de fin de recherche CIRAD-SPOT, Janvier 2005, 99p
- **Utilisation de données de terrain pour estimer les paramètres du rendement lors de la croissance et au moment de la récolte de la canne à sucre en Guadeloupe, à la Réunion et à Maurice**
S. Catsidonis, VCAT 2003/2004
- **Caractérisation de la production cannière par télédétection : Cas de la plantation de Gardel, Guadeloupe**
S. Catsidonis, stage de DESS 2002/2003, 59p
- **Utilisation de données de télédétection pour l'estimation en tige et en sucre chez la canne à sucre en Guadeloupe et à la Réunion**
A. Pellegrino, rapport d'étape post doctorat 2003/2004, 79p
- **Acquisition de données de terrain et traitement d'image SPOT sur la Guadeloupe – Projet SUCRETTE**
M. Guitton, année d'alternance ENSAM 2002-2003, 40p
- **Theresa I. Matric water content measurements through thickness variations in vertisols**
Y-M. Cabidoche, H. Ozier-Lafontaine, Agricultural water management 28 (1995), p133-147
- **Theresa II. Thickness variations of vertisols for indicating water status in soil and plants**
Y-M. Cabidoche, H. Ozier-Lafontaine, Agricultural water management 28 (1995), p149-161

- **A casting method for the three-dimensional analysis of the intraprism structural pores in vertisols**
Y-M Cabidoche, P.Guillaume, European Journal of Soil Sciences 49 (June 1998), p187-196
- **Distribution des sols à argyles gonflantes sur calcaires récifaux (zone caraïbe). Utilisation des mesures de résistivité électrique**
Y-M. Cabidoche, Sol et eau, actes du séminaire de la Havanne, 8-20 Avril 1985, 32p
- **Applications de la géophysique aux recherches d'eau**
C.Meyer de Stadelhofen Ed. Tec&Doc, 1993, p1-47
- **Numerical modelling of water infiltration into the three components of porosity of a vertisol from Guadeloupe**
S.Ruy, L. DiPietro, Y-M Cabidoche, Journal of Hydrology 221 (1999), 19p
- **Field shrinkage curves of a swelling clay soil : analysis of multiple structural swelling and shrinkage phases in the prisms of a vertisol**
Y-M. Cabidoche, S.Ruy, Aust.J.Soil Res. 39 (2001), 143-160p
- **Evapotranspiration model for developing crops**
S.S. Jagtap, J.W. Jones, Florida Agricultural experiment Station Journal n° 9511 (1989),1342-1350p
- **Détermination biologique du système poral des vertisols cultivés (Petites Antilles) Conséquences sur la disponibilité de l'eau des sols pour les plantes**
Y-M Cabidoche, P.Guillaume, C.Hartmann, S.Ruy, E.Blanchart, A.Albrecht, M.Mahieu, W.Achouak, T.Heulin, G.Villemin, F.Watteau, G.Bellier, 2000
- **Gestion de l'eau dans les espaces agraires caraïbes : Résumé des communications de la rencontre Caraïbes, recherche agronomique et développement rural du 2 au 6 Décembre 1996**
- **Gestion raisonnée de l'eau d'irrigation en canne à sucre sur le sud Grande Terre : Cas de Gardel**
Y. Brunet, C. Mathieu, Les journées de l'eau, 1998
- **Stratégies de gestion des irrigations sur vertisols en Guadeloupe**
P.Guillaume, Y-M Cabidoche
- **Bulletin agronomique Antilles-Guyane INRA 1986 : L'eau, facteur limitant des rendements en canne à sucre : cas du domaine de Gardel (Guadeloupe)**
S. Pellerin

Webibliographie :

- **Méthodes d'interpolations :**

Statistiques et interpolations dans les SIG
L.Drapeau, centre IRD Montpellier, Laboratoire HEA
<http://www.faocopemed.org/vldocs/0000028/publi10.pdf>

Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale
Y.Gratton, Institut National de la Recherche Scientifique Quebec
http://www.iag.asso.fr/pdf/krigeage_juillet2002.pdf

Cours d'introduction aux Systèmes d'Informations Géographiques
Cours n°12 : L'interpolation spatiale
Université de Montréal, 2005
<http://www.geog.umontreal.ca/donnees/archive/geo2512/>

- **Conversion de données géographiques**

Système de référence géodésique des DOM-TOM
<http://www.ign.fr/telechargement/MPro/geodesie/CIRCE/systemeDOM.pdf>

Logiciel CIRCE
<http://www.ign.fr/telechargement/MPro/geodesie/CIRCE/circe2000.pdf>
<http://www.ign.fr/telechargement/MPro/geodesie/CIRCE/plaquetteCIRCE.pdf>

Grille de conversion altimétrique
http://www.ign.fr/telechargement/MPro/geodesie/CIRCE/rap_util_gg.pdf

- **Données météorologiques**

Réseau agro-météorologique de Guadeloupe
<http://rainette.cirad.fr/>






- **Divers**

Technologies et Systèmes d'Information Géographique pour l'Agriculture via le Net
<http://www.tsigane.net/index.php>

Système de suivi de la canne à sucre par télédétection : projet SUCRETTE
http://www.spotimage.fr/html/_55_138_791_.php

Base de données pour l'Optimisation de la Gestion des Surfaces Agricole (OGSA) :
<http://hal.inria.fr/docs/00/04/35/54/PDF/11.pdf>

Annexe II : Les stades végétatifs de la canne à sucre au cours du cycle annuel

Stades	Description en conditions de milieu favorables	Principaux facteurs limitants	Délais	Contribution au rendement (chiffres moyens)
 Levée	<p>Germination des yeux (grâce aux réserves de la bouture et à l'eau du sol). Racines de bouture (issues des primordia de la zone radicaire de la bouture) pour nourrir les tiges primaires puis apparition de racines de tiges.</p>	<p>Sécheresse ou asphyxie des racines. Poches d'air et contact sol-plant. Recouvrement (≈ 15 cm de terre ; très bien si <10 cm de terre). Plantation trop tardive. Travaux culturaux (mottes).</p>	<p>1,5 à 2 mois après plantation ≈ 3 semaines après coupe</p>	<p>Nombre de tiges par souches</p>
 Tallage	<p>Développement de tiges secondaires à partir de tiges primaires, puis de tiges tertiaires à partir des bourgeons de ces tiges secondaires, etc. Développement de racines à la base de chaque bourgeon. <i>Phénomène caractéristique des Poaceae.</i></p>	<p>Préparation du sol (problèmes d'enracinement). Recouvrement trop important. Sécheresse.</p>	<p>≈ 3 à 4 semaines après levée, durant 3 à 4 mois</p>	<p>Nombre de tiges par souches (65 000 tiges/ha)</p>
 Croissance	<p>Allongement de la canne : naissance des nœuds et entre-nœuds à partir du bourgeon végétatif terminal. Allongement des feuilles : fouet foliaire (feuilles enroulées au centre de la canne), feuilles vertes, feuilles sèches (épaillage selon la variété). Accroissement en matière sèche. <i>Phase d'importants besoins en chaleur et en humidité.</i></p>	<p>Stress hydrique ou excès d'eau causant l'asphyxie. Alimentation minérale (azote).</p>	<p>\approx du 3^{ème} au 9^{ème} mois</p>	<p>Longueur des tiges (2 à 3 m) Diamètre des tiges (2 à 4 cm) Poids des tiges (600 à 1000 g/m de canne)</p>
 Floraison	<p>Transformation du bourgeon végétatif terminal en bourgeon floral. Phénomène non systématique, déclenché à partir d'un certain âge et sous certaines conditions (durée du jour, hydrométrie, variété).</p>		<p>≈ 1 mois avant maturation, panicule formée en 2 mois</p>	<p>non</p>
 Maturation	<p>Accumulation de saccharose dans la tige. Sous l'influence d'un froid relatif, d'une augmentation de l'écart de températures entre la nuit et le jour et d'un manque d'eau (conditions du Carême en Guadeloupe) et d'azote.</p>	<p>Pluies. Risques de reprise en végétation de la canne.</p>	<p>A partir du 9^{ème} ou 10^{ème} mois</p>	<p>Taux de sucres par tige (15% du poids total)</p>

Source : Manuel Technique de la canne à sucre, 2005

Annexe III : Station GPS permanente de Roujol installée au CIRAD CA

PETIT-BOURG XV

Département : GUADELOUPE (97)
Commune(s) : PETIT-BOURG

Numéro : **9711815**

Feuille : 4605G

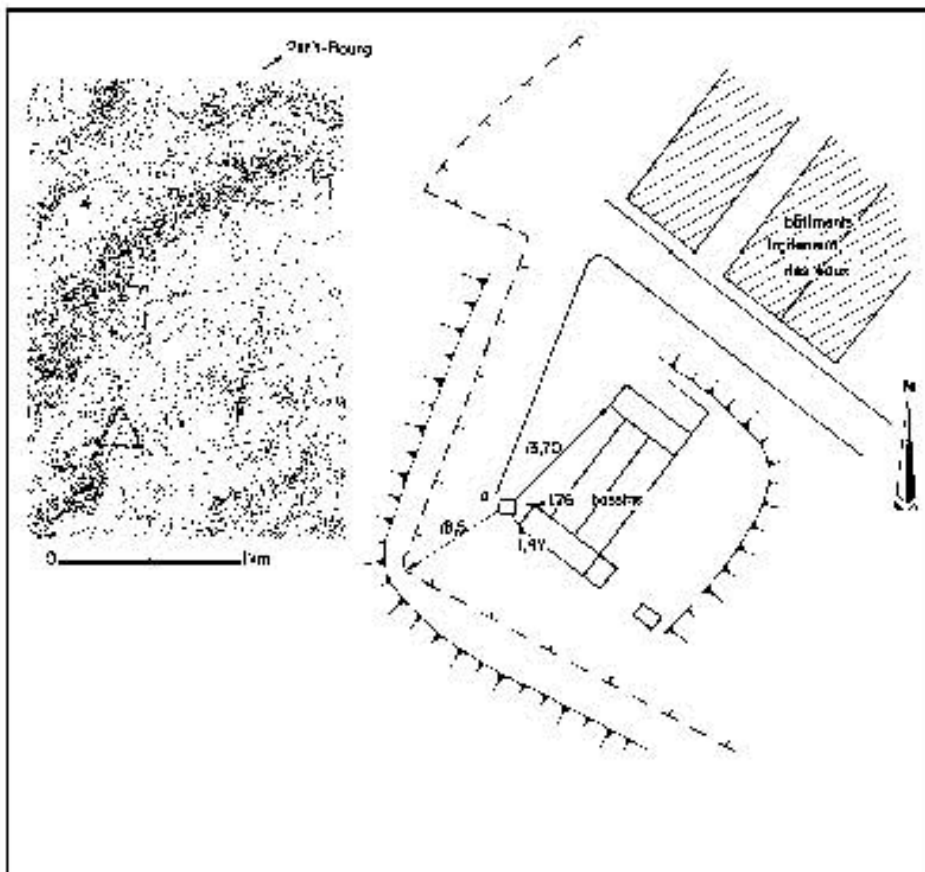
) Repere souterrain 1991

a) Borne IGN 1991

	Système WGS 84			Système STE ANNE Projection UTM Nord Fuseau 20		Système IGN 1988	
	longitude	latitude	hauteur (m)	X(m)	Y(m)	Altitude (m)	
a	61°37'26,8956"W	16°10'01,6393"N	60,119	647517,41	1788216,93	100,10	D
	61°37'26,8956"W	16°10'01,6393"N	60,700	647517,41	1788216,93	100,10	D

T: coordonnées obtenues par transformation

C: précision centimétrique D: précision décimétrique M: précision métrique



Annexe IV : LE GPS: Global Positioning System

Le Global Positioning System (GPS) est un moyen de positionnement dont la conception date des années 1970. Mais il ne fut réellement opérationnel (industrialisation des récepteurs, nombre de satellites en service...) que vers 1991, d'importants retards de lancement ayant été causés par les aléas du programme de la navette spatiale américaine.

1. Principes généraux

- Un **ensemble de près de trente satellites** (Navstar, lancés par le ministère américain de la défense) orbite vers 20000 km d'altitude. Ceux-ci émettent en permanence des **signaux radioélectriques de très faible puissance**, à des fréquences de l'ordre de 1,2 GHz (appelée **L2**) et 1,6 GHz (appelée **L1**) **modulés par des signaux numériques** pour lesquels chaque bit d'information est émis à une date connue avec une extrême précision.

Ces bits décrivent par ailleurs la position du satellite concerné, avec un débit élevé (10 MHz), ce qui conduit à une émission à spectre très large et donc à une grande insensibilité aux émissions parasites.

- Au **sol**, un **récepteur** observe avec précision la date de réception de ces mêmes bits, et les décode.

Les satellites sont tous calés sur la même échelle de temps. Par contre, le récepteur ne dispose pas, au départ, d'une heure précise. Il y a donc quatre paramètres inconnus par le récepteur : les 3 coordonnées de son antenne, ainsi que son décalage temporel avec l'échelle de temps des satellites. Il faut donc observer simultanément au moins quatre satellites dont on connaît la position, pour calculer la position du récepteur.

Ce type de fonctionnement, compte tenu des différentes limites physiques du système, peut donner en temps réel une précision d'une dizaine de mètres en absolu.

Cela suffit à satisfaire les exigences des applications militaires, mais pas celles de la topographie.

Pour cette dernière, il a fallu mettre au point une application dérivée en utilisant le système en mode différentiel : si deux récepteurs (ou plus) reçoivent les mêmes satellites au même moment et s'ils sont capables de faire les mesures de manière continue (par un asservissement sur la phase même du signal émis) pendant de longues durées (de quelques minutes pour une distance de quelques kilomètres à une heure pour de longues distances), le vecteur orienté joignant les deux antennes peut être calculé avec une précision de l'ordre du centimètre.

2. Sources d'erreurs résiduelles

- *Connaissance de la position des satellites*, dont les paramètres d'orbites font partie des informations émises par les satellites eux-mêmes.

Cette position n'est précise qu'à quelques mètres, mais l'observation différentielle élimine la plus grosse partie de cette erreur. Lorsqu'on recherche la précision maximale, on est amené à employer des orbites recalculées avec une très grande précision, depuis 1992, par un service international composé d'un groupe de laboratoires scientifiques volontaires (IGS, pour International GPS Service) qui fournit gracieusement ces informations avec un différé d'une dizaine de jours.

- *Connaissance de l'indice de réfraction* des derniers kilomètres de l'atmosphère (troposphère).

Cette erreur est difficile à modéliser. La teneur en vapeur d'eau des basses couches de l'atmosphère, très imprévisible, est un facteur prépondérant d'incertitude.

Mais ce risque d'erreur s'élimine en partie lorsque les deux récepteurs sont à la même altitude et dans des conditions climatiques proches, l'observation différentielle soustrait l'un de l'autre deux facteurs, mal connus, mais presque égaux.

Ce n'est plus le cas si les altitudes des antennes sont très différentes (montagne).

On note donc sans surprise que la détermination de la coordonnée verticale (altitude ellipsoïdique) est toujours moins bonne que celle des coordonnées planimétriques (d'un facteur significatif, d'à peu près 2 dans les meilleurs cas, jusqu'à 5 et plus dans des configurations de réception médiocres).

- *Connaissance du contenu électronique* de l'ionosphère (couche très haute de l'atmosphère).

Pour les ondes radio, l'ionosphère est une couche très perturbatrice. Le signal qui s'y propage est ralenti en fonction de la teneur locale en charges libres (qui varie parfois très rapidement avec le flux de particules venant du Soleil et de l'espace) et de la fréquence du signal. Lorsqu'on recherche la précision maximale, en recevant les deux fréquences émises et en comparant les temps de propagation sur ces deux canaux, on sait éliminer l'essentiel de cet effet. Mais ceci exige des récepteurs dits « bifréquence », bien plus onéreux que les appareils « monofréquence » devenus très courants.

- *Réflexions parasites des ondes* avant de parvenir à l'antenne.

Ces « multitrajets » se produisent à proximité de surfaces très réfléchissantes (surfaces planes à 10 cm près, et conductrices).

Ils représentent un allongement de la distance antenne/satellite impossible à connaître et, donc, des erreurs de mesure parfois très gênantes, que bien des logiciels de traitement ne permettent pas de détecter facilement.

On remarque donc que le matériel employé, la nature des opérations de mesure ainsi que le type de calcul effectué sont essentiels pour la précision des résultats. Aujourd'hui, on mesure sans trop de difficultés des réseaux de quelques kilomètres à un centimètre près avec des appareils monofréquence et des logiciels fournis par les fabricants de matériel. Mais en mettant en œuvre les méthodes les plus raffinées (recalcul d'orbite, mesures bifréquences, observations longues, etc...), des chercheurs savent mesurer des distances de plusieurs centaines de kilomètres, voire plusieurs milliers, avec une erreur sub-centimétrique.

Il faut ajouter une information générale importante : les informations émises par les satellites sont volontairement « bruitées » (*N.D.L.R. ce brouillage est désactivé en temps de paix*) et leur qualité est dégradée par un code réservé aux militaires américains, ce qui conduit à des qualités de localisation avec un récepteur unique de l'ordre de 50 à 100 m. La conséquence de ces brouillages (appelés AS et SA) est simplement d'exiger, en mode différentiel précis, plus de temps de mesure pour une même qualité de résultat.

3. Différents types de récepteurs et de modes de réception

Il y a sur le marché une grande variété de récepteurs GPS.

Les plus nombreux, les récepteurs destinés à un usage isolé, ne travaillent que sur la fréquence L1 et ne mesurent pas la phase du signal reçu. Ces récepteurs sont destinés à la navigation automobile (guidage intelligent en complément d'une base de données cartographique), à la navigation de plaisance, à la randonnée.

Ces récepteurs sont fabriqués à partir d'éléments électroniques qui ne coûtent que quelques dizaines d'euro, habillés sous un format très compact. Précision : 100 m en planimétrie, 200 m en altimétrie.

Ces appareils peuvent être associés par paire, avec, par exemple, une liaison radio entre eux. Dans ces conditions, le matériel est plus onéreux (prix de la liaison radio et d'un petit calculateur temps réel).

La précision, dans la zone où la liaison radio fonctionne, est alors métrique (de 0,5 à 3 m selon les matériels).

Il existe, pour des besoins de précision plus élevés, des récepteurs ne travaillant encore que sur L1 (appelés donc « monofréquences »), mais qui mesurent la phase de la porteuse en plus des codes qui la modulent. Ces appareils n'ont d'intérêt que lorsqu'ils travaillent en mode différentiel, soit en enregistrant de part et d'autre les signaux reçus sur des mémoires de masse, soit en mode temps réel avec une liaison radio. La précision sur le vecteur orienté

joignant les antennes peut alors atteindre couramment le centimètre. Les coûts, pour une paire de récepteurs, sont très variables (mémoires de masse, liaison radio...).

Ce sont des matériels professionnels, typiquement destinés aux géomètres. Comme ils ne travaillent que sur L1, ils ne peuvent s'affranchir des effets ionosphériques.

Aussi leur précision se dégrade pour des distances dépassant 10 km : le modèle d'erreur sera en planimétrie, par exemple, de 1 cm combiné avec 2×10^{-6} de la distance mesurée. En mode différentiel temps réel (avec liaison radio), ces équipements permettent les levés centimétriques en temps réel, qui concurrencent directement les méthodes topographiques traditionnelles, sans jamais poser de problèmes d'orientation.

Enfin, il existe des récepteurs mesurant les codes et la phase sur L1 et L2 (ils sont appelés alors « bifréquences »), avec des capacités de suivi de tous les satellites visibles, et des mémoires de masse permettant des enregistrements sur plusieurs heures. Ils permettent la mesure de grandes bases sans dégradation due à l'ionosphère, mais, de plus, les temps de mesures sont bien plus courts qu'avec des appareils monofréquences (deux fois plus de données). Ces appareils, destinés à un marché beaucoup plus limité, sont nettement plus onéreux que les précédents.

4. Contraintes opérationnelles pour les usagers

La contrainte principale est d'ordre expérimental : l'antenne doit être en position de recevoir au moins quatre satellites. La plupart des récepteurs reçoivent assez mal sous les feuillages, en ville les immeubles peuvent limiter considérablement la zone visible du ciel. Donc, il existe de nombreux environnements où l'on peut être dans l'incapacité de mesurer : le matériel employé n'y est en général pour rien.

Un autre point important est relatif aux calculs effectués : que ce soit en point isolé ou sous forme de vecteur orienté allant d'une antenne de récepteur à une autre, les résultats sont purement géométriques, et n'ont d'utilité que si l'on connaît le système de référence employé.

Ils sont disponibles sur un ellipsoïde international (WGS 84), et ne pourront être fournis dans un autre système que si les paramètres de transformation sont connus du logiciel : ceci peut poser de graves problèmes dans certains pays, en particulier si le système de référence national n'est pas basé sur des mesures spatiales homogènes en précision (par exemple après ré-observation par GPS).

Par ailleurs, les mesures GPS sont géométriques, c'est à dire qu'aucun lien n'est effectué avec le champ de pesanteur terrestre.

Or, les systèmes d'altitudes nationaux sont tous référencés sur le champ de pesanteur terrestre : la surface d'altitude nulle étant très voisine d'une surface équipotentielle du champ de pesanteur, le géoïde. Cela revient à dire que les mesures GPS ne peuvent concourir à des déterminations d'altitudes que si le géoïde est connu avec une grande précision, ce qui n'est le cas que dans quelques pays.

Il faut donc faire extrêmement attention à la coordonnée d'altitude délivrée par le GPS : il ne s'agit jamais d'une altitude (sauf correction de géoïde incluse dans le post-traitement si de telles données sont disponibles, ce qui peut être le cas en France compte tenu de la disponibilité de la grille de correction RAF 98), mais une grandeur géométrique qui en est proche.

5. Évolution de la qualité d'un référentiel national

Pendant des siècles et jusqu'aux années 1990, les réseaux géodésiques nationaux étaient obtenus par triangulation, avec des mises à l'échelle assez difficiles puisque les mesures de distances n'ont pu être effectuées facilement sur grandes distances que depuis les années 70.

L'histoire de la conception globale d'un réseau impliquait, par suite des imperfections des procédés employés, des modèles d'erreurs très complexes.

Typiquement, les coordonnées diffusées en France pour la NTF s'écartaient des valeurs exactes (que l'on aurait obtenues si tout avait été parfait) de grandeurs d'autant plus élevées

que l'on s'éloignait de Paris, pouvant par exemple atteindre 10 mètres vers Nice. Le référentiel faisant foi n'était donc pas le référentiel théorique, mais celui réellement disponible au travers de ses bornes et de leurs coordonnées (fausses) publiées. D'où des difficultés sans fin lorsque les bornes étaient détruites et reconstruites : rien ne permettant de garantir que la re-détermination aurait les mêmes erreurs que la détermination ancienne. On a coutume de présenter les modèles d'erreurs de la NTF sous la forme « 1 cm/km », erreur purement relative, sans trop évoquer l'erreur absolue (pouvant donc atteindre plusieurs mètres) des coordonnées publiées.

Ceci avec une excellente excuse : personne ne s'intéresse à des coordonnées absolues fausses de 10 m à Nice, mais tous sont concernés par l'erreur relative entre deux points proches. Hors, celle-ci était inférieure à 5 cm entre deux points éloignés de 5 km. Le problème d'erreurs absolues se pose surtout lorsqu'on passe d'un système à un autre, pour passer, par exemple, de la NTF au référentiel italien dans notre cas : personne ne devra alors s'étonner que le simple changement de coordonnées puisse être entaché d'erreurs atteignant le mètre...

Le modèle d'erreurs, avec la géodésie moderne utilisant le GPS précis appuyé sur la référence mondiale, est complètement différent. On peut alors parler d'erreur absolue, par exemple de 2 cm pour le RBF (réseau de base français, observé par GPS vers 1995), et guère plus (moins de 5 cm en général) pour la NTF (triangulation française terminée vers 1980) recalculée en s'appuyant sur le RBF et le densifiant, en quelque sorte.

6. Les « GPS » russes et européens

Il existe un système russe équivalent du GPS, le GLONASS, lui aussi en phase opérationnelle à titre militaire. De nombreuses démarches internationales visent à obtenir, en y ajoutant quelques autres contributions (Européenne, Japonaise) sous forme de satellites géostationnaires (pour l'Europe il s'agit d'EGNOS), un système pleinement opérationnel pour les applications civiles comme la navigation aérienne et navale. Le GPS ne peut en effet pas servir à ce but tout seul, puisqu'il reste sous le commandement direct du Ministère de la Défense américain qui peut à tout instant le désactiver sans préavis.

Dans cette logique, l'Agence Spatiale Européenne a également engagé le projet Galileo, qui pourrait vers 2008 constituer une alternative de grande qualité au GPS.

7. Les stations permanentes

Pour les professionnels de l'information géographique, le GPS ne présente une utilité qu'avec une précision allant du centimètre au mètre. Cela implique, comme nous l'avons vu, un fonctionnement en mode différentiel : un appareil est sur un point de coordonnées connues, l'autre sur le point à déterminer.

Soulignons encore les différences entre variantes existantes :

- en matière de matériel : la précision de la « détection à bon marché », destinée aux besoins du grand public, reste limitée aux alentours de un mètre, car l'on ne mesure pas la phase du signal émis par les satellites mais uniquement sa modulation (« mesure de codes »). Pour arriver à une précision de l'ordre du centimètre, on mesure la phase sur une ou deux fréquences, et le prix du matériel s'en ressent considérablement.

- en matière de transfert de données : le calcul exige de connaître les mesures obtenues sur les deux stations. Si le transfert de données est effectué en temps réel par liaison radio, alors on peut également obtenir des coordonnées en temps réel. Mais il est possible de se satisfaire de traiter les deux lots de données en temps différé - par exemple lors du retour au bureau. Cela évite le souci d'établir, puis d'entretenir, une liaison radio, mais enlève toute certitude que les données mesurées soient bonnes. La certitude est pourtant un « sous-produit » normal et fort apprécié d'un calcul de coordonnées en temps réel.

- en matière de type de traitement des données possible : sur des bases courtes (typiquement moins de 15 km), il est possible de mesurer et calculer en mode « statique rapide », avec des temps d'observation réduits à quelques minutes. Mais lorsque la station de

référence est plus éloignée, (voire beaucoup plus : on sait calculer des bases de plus de 5000 km), le temps de mesure devient plus long et se compte en heures, voire en journées. Il y a donc actuellement un saut quantitatif dans la valeur économique du GPS : sur bases courtes le « GPS temps réel » serait souvent un bon concurrent du tachéomètre s'il fallait n'amortir qu'un appareil seulement au lieu de deux.

8. En guise de conclusion

Pour de multiples raisons, le « tout-GPS » et la fin du tachéomètre ne sont pas pour demain : D'abord parce que le lever par tachéomètre est, comme son nom l'indique, extrêmement rapide et fonctionne en toutes circonstances, de façon complètement autonome, que le ciel soit ou non visible. Ensuite, parce que tous les points à lever ne sont pas « stationnables » : on peut y mettre un réflecteur au besoin, mais certainement pas toujours une antenne GPS ! Et comme par ailleurs les levés tachéométriques nécessitent une orientation, on ne se passera pas de sitôt des réseaux locaux matérialisés qui nous sont familiers.

En matière de levés GPS de précision métrique, il y a quelques enjeux nouveaux créés par la généralisation de l'emploi de SIG pour des applications très variées.

Pour leur mise à jour, la précision du mètre est parfois suffisante. Il est alors dommage d'utiliser des méthodes de précision beaucoup trop élevée, dont le coût de revient est inutilement important.

Par exemple, si nous dotons un technicien d'un récepteur GPS recevant sur abonnement des corrections lui permettant d'atteindre le mètre en temps réel (matériel qui sous peu sera très bon marché), si nous lui mettons en main un télémètre laser portable permettant la mesure de distances sans réflecteur, équipé d'un inclinomètre et d'un compas magnétique, il est clair qu'il aura ainsi la possibilité de donner les coordonnées de tous les points entrant dans son champ de vision, sans avoir, par exemple, à pénétrer dans les propriétés closes.

Il est donc important de faire bénéficier la mise à jour des bases de données géographiques de ces méthodes, probablement bien moins onéreuses que toute autre. Les sociétés offrant sur abonnement un service de corrections GPS en temps réel sont donc appelées à se multiplier dans les prochaines années, compte tenu du nombre considérable de clients potentiels !

Bibliographie : S. Botton, F. Duquenne, Y. Egels, M. Even, P. Willis, GPS, localisation et navigation, Hermès, 1996, ouvrage de base, publié sous l'égide du Conseil National de l'Information Géographique, Dossier « Les stations GPS permanentes » (revue Géomètre, Mars 2000), dont cette fiche reprend quelques éléments.

Source : fiche élaborée par Michel Kasser, Institut géographique national avril 2000

Annexe V : Caractéristiques de la station totale Trimble 3300 DR

Station Totale 3300 de Trimble

CARACTERISTIQUES DE PERFORMANCE

Mesure d'angles		Durée d'une mesure	
Précision (écart type selon la norme DIN 18723)		Mode avec prisme	
3303	3" (0,9 mgr)	Mesure standard	2 s
3305/3306*	5" (1,5 mgr)	Mesure en continu	1,2 s
Lecture angulaire (incrément minimal)		Mode Direct Reflex	
3303	0,1" (0,2 mgr)	Mesure standard	3 s jusqu'à 30 m + 1 s / 10 m
3305/3306	0,1" (0,5 mgr)	Mesure en continu	1,6 s
Compensateur automatique		Portée (en conditions standard**)	
Compensation sur l'axe principal		Mesure avec prisme	
±5" (±90 mgr)		1 prisme	
		1 prisme, mode longue portée	
		3 prismes	
		3 prismes, mode longue portée	
		1000-5000 m	
		5000 m	
		1000-7500 m	
		Portée en cas d'utilisation de bande réfléchissante	
		Feuille réfléchissante, 20 mm normale	
		Feuille réfléchissante, 20 mm haute performance	
		Feuille réfléchissante, 60 mm normale	
		Feuille réfléchissante, 60 mm haute performance	
		100 m	
		200 m	
		250 m	
		800 m	
		Portée de mesure en mode Direct Reflex (usuellement)	
		Carte Kodak Gifs (coefficient de réflexion de 18%)	
		Carte Kodak Gifs (coefficient de réflexion de 90%)	
		70 m	
		100 m	
Mesure de distances			
Précision			
Prisme			
Mesure standard	±(2 mm + 2 ppm)		
Mesure en continu	±(5 mm + 2 ppm)		
Bande réfléchissante			
Mesure standard	±(3 mm + 2 ppm)		
Mesure en continu	±(5 mm + 2 ppm)		
Mode Direct Reflex			
Mesure standard	±(3 mm + 2 ppm)		
Mesure en continu	±(10 mm + 2 ppm)		
Distance de mesure minimale			
(sur un prisme)	1,5 m [non permis en mode longue portée]		
(sur une feuille réfléchissante)	2,5 m		

* Modèle 3306 sans mémoire interne.

** Conditions standard : obscur de brume, temps couvert ou ensoleillement modéré, très légère réflexion. La portée et la précision dépendent des conditions atmosphériques et du niveau de rayonnement ambiant.

CARACTERISTIQUES GENERALES

Source lumineuse	Diode laser, 660nm, classe 1 pour mesure de distance avec réflecteur et classe 2 en mode Direct Reflex	Ecran d'affichage	Réglage automatique du contraste, éclairage de l'affichage de 4 lignes de 21 caractères chacune, possibilités graphiques (128 x 32 pixels)
Divergence du faisceau	0,4 mrad	Clavier	7 touches, touches de fonctions variables
Correction atmosphérique	Paramétrage manuel de la pression et de la température	Température de fonctionnement	De -20 °C à +50 °C
Calage		Étanchéité	IP54
Niveau circulaire de l'orbite	Niveau circulaire / cylindrique 10"/2 mm / 30"/2 mm	Alimentation électrique	Batterie interne
Vis de calage et mouvements fin	Coaxiaux		Bloc batteries NiMH rechargeables 6 V, 1,4 Ah; temps de chargement avec un chargeur seul approx: 2,5 heures. Autonomie : env. 1000 mesures d'angles et de distances
Contrage		Poids	
Système de contrage	Trimble universel ou DIN	Instrument avec batterie / coffret	3,5 kg / 2,5 kg
Plomb optique		Dimensions	
Grossissement	2x	Instrument	173 x 268 x 193 mm
Distance minimale de mise au point	0,5 m	Hauteur de l'axe des tourillons, Trimble universel / DIN	196 mm / 175 mm
Lunette			
Grossissement	2,6x		
Ouverture	40 mm		
Champ visuel à 100 m	2,9 m		
Distance minimale de mise au point	1,5 m		
Eclairage du réticule	Oui		

Qualité certifiée conforme aux normes DIN ISO 9001/EN 29001.

LASER de CLASSE I et II
Conforme à 21 CFR 1040.10



LOGICIELS ET ENREGISTREMENT

Logiciels		Options et capacité de la mémoire*	Enregistrement: mémoire interne de données. Capacité de stockage: 1900 lignes de données
Logiciel Topographique	Logiciel COGO	Import / Export de données	Enregistrement externe et transfert de données via interface RS-232 C / V24 ormais d'enregistrement de données sélectionnables: For M5, Rec 500, R4 et R5
Station Connue	Station Libre		
Calcul de surface	Distances entre points		
Station Altimétrique			
Levers	Logiciel d'implantation		
Eccentremets	Implantation		
Hauteur d'objet	Axe de référence		
Plan vertical			
Distance Point-Droite			

* Modèle 3306 sans mémoire interne.

INFORMATIONS COMMERCIALES

Veuillez contacter le distributeur agréé Trimble ou l'agence Trimble la plus proche pour toute information complémentaire.

Vous pouvez également consulter notre site Internet à l'adresse <http://www.trimble.com>

Les caractéristiques et les descriptions sont susceptibles d'être modifiées sans préavis.



AMERIQUE DU NORD
Trimble Geomatics and Engineering Division
5475 Kellenburger Road,
Dayton, Ohio 45424-1099,
ETATS-UNIS
800-538-7800 (N° vert)
Tél: +1-937-233-8621
Fax: +1-937-233-9441
www.trimble.com

EUROPE
Trimble GmbH
Am Prime Park 11,
65479 Raunheim,
ALLEMAGNE
Tél: +49-6142-2100-0
Fax: +49-6142-2100-550

ASIE-PACIFIQUE
Trimble Navigation
Singapore Pty Limited
80 Marina Parade Road,
#22-06, Parkway Parade,
Singapore 449269
SINGAPOUR
Tél: +65-6348-2212
Fax: +65-6348-2232

GEOPOPI
Parc d'activité de Limonest
1, Rue des Vergers
69760 Limonest
Tél. 04.72.52.31.00
Fax 04.72.52.31.02
N° SIREN 423 920 883 RCS LYON
VOTRE AGENCE OU REPRÉSENTANT LOCAL TRIMBLE

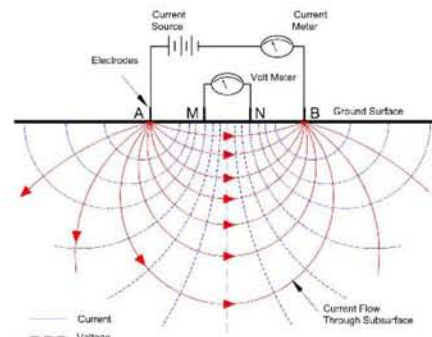
Annexe VI : Cartographie de la profondeur d'un vertisol à partir de la méthode de la résistivité électrique

Elle consiste à l'élaboration d'une cartographie de référence de la profondeur du sol qui pourra ensuite être comparée à notre cartographie expérimentale réalisée avec le tachéomètre.

La méthode de résistivité électrique permet de définir la distribution des matériaux constitutifs des sols grâce à leur contraste de résistivité : 3 Ωm pour l'argile gonflante contre 15 Ωm pour le calcaire sous jacent (Cabidoche, 1985).

Elle a été adaptée pour les vertisols de Guadeloupe (Cabidoche, 1985), à partir de diverses techniques utilisées en géophysique (Hesse, 1966 ; Astier, 1971) et permet de déterminer directement une profondeur de sol à partir d'une mesure de résistance exprimée en Ohm.

Une partie de la cartographie résistive a déjà été réalisé dans le sud Grande Terre sur plusieurs parcelles de l'exploitation de Gardel (Catsidonis, VCAT 2003-2004), en particulier la parcelle Sahara sujette à cette étude.



Résistivimètre Megger et principe du dispositif Wenner

Le principe de la méthode est le suivant. On injecte un courant d'intensité donné, dans le sol et on mesure la différence de potentiel entre deux électrodes complémentaires.

C'est essentiellement la quantité et la qualité de l'eau dans le sous sol qui conditionne la conductibilité électrique (inverse de la résistivité électrique) mais aussi la nature du matériau. Cette méthode sera donc opérationnelle pour des conditions d'humidité du sol importante.

Il existe de nombreuses géométries de dispositif. Nous utiliserons un dispositif quadripolaire (deux électrodes de courant A et B et deux électrodes de potentiel M et N) de type Wenner, l'un des plus couramment utilisé en imagerie géophysique.

Dans ce dispositif, la mesure de résistivité r d'une couche du sol est obtenue en implantant 4 électrodes alignées A, M, N et B, et en faisant passer un courant via les électrodes extrêmes A et B ; M et N sont les électrodes de mesure de potentiel, symétriques par rapport à O milieu de [AB] et qui interceptent les lignes de courant entre A et B considérées comme étant les surfaces équipotentielles à des plans parallèles.

Pour l'écartement, $AM=MN=NB=a$,

$$\rho = 2\pi.a.R$$

Dans le cas de la superposition de deux couches horizontales de résistivités différentes ρ_1 (couche d'épaisseur e) et ρ_2 (d'épaisseur infinie), on mesure une résistivité globale $\rho(a)$ qui tend vers ρ_1 quand a tend vers 0 et ρ_2 quand a tend vers l'infini. La valeur de $a=2$ m se révèle alors discriminante.

Une relation empirique a été déterminée sur les vertisols de Guadeloupe à partir de différents sondages électriques. Pour un milieu supposé continu et homogène, la valeur d'écartement $a=2m$ (Cabidoche 1985) s'est alors révélée discriminante et détermine une relation entre résistance du sol (en Ohm) et profondeur (en mètres):

$$z = 2 - 0,74 \ln(\rho - 3)$$

Une cartographie à grande échelle avec la méthode de la résistivité électrique reste toutefois délicate en raison de la lourdeur du dispositif et des conditions climatiques humides.

L'acquisition s'effectue à deux personnes et requiert un temps de stationnement important sur chaque point de mesure (1 à 2 minutes). Il faut donc une journée de travail à deux personnes pour échantillonner une parcelle de 7ha avec un maillage de 20m (travail réalisé sur la parcelle Tours).



Cartographie numérique des sols à argile gonflante en milieu carbonaté tropical – Validation d'une méthode - Exemple de la Guadeloupe Projet de partenariat INRA-BRGM

1. Objectif

L'objectif du présent projet est de valider une méthode de cartographie précise, simple et rapide des sols à argiles gonflantes développés sur substratum carbonaté dans un contexte tropical humide.

Du fait de leur grande variabilité spatiale de leur profondeur et de leur pierrosité, ces sols ne peuvent pas être correctement cartographiés à l'aide des méthodes classiques (cartographie de terrain). Or, c'est précisément cette variabilité spatiale qu'il est important de cartographier car elle conditionne l'alimentation en eau, le rendement des cultures, les circulations superficielles temporaires de l'eau et la vulnérabilité des eaux souterraines.

2. Contexte du projet

Dans le cadre de la cartographie de la vulnérabilité intrinsèques des principales nappes d'eau souterraines de Guadeloupe (Grande-Terre et Marie-Galante), réalisée par le BRGM et la DIREN avec la collaboration de l'INRA, une méthode de cartographie des sols smectitiques (à argiles gonflantes) a été utilisée et ses résultats validés à l'aide d'indicateurs indirects (présence de mares corrélée avec le zonage des sols argileux épais) et sur la base de la connaissance du terrain de Y.M. Cabidoche (pédologue, Directeur de Recherches, Unité Agropédoclimatique de la zone Caraïbes). Cette méthode consiste en une description géomorphologique du territoire basée sur le traitement du Modèle Numérique de Terrain à l'aide de l'outil SIG (ArcView). Elle est basée sur la genèse de ces sols argileux gonflants, hérités de l'altération, en zone tropicale à saison sèche marquée, de projections volcaniques venues recouvrir le substratum de calcaire récifal : ces projections auront eu tendance, par hypothèse, à être transférées précocement des zones convexes vers les zones concaves du relief du calcaire préexistant.

Sur cette hypothèse, deux grands ensembles géomorphologiques sont retenus :

- topographie convexe et/ou à forte pente : correspond à des zones de sols minces à squelettiques ;
- topographie biconcave (concave dans le sens de la pente et perpendiculairement à la pente) et à faible pente : correspond à des zones de sols épais.

Cette méthode a été développée pour palier les lacunes de la cartographie classique basée sur la corrélation de coupes pédologiques acquises par sondages à la tarière. Celle-ci est en effet rendue difficile pour deux raisons :

- les épaisseurs de sols smectitiques se caractérisent par une grande variabilité spatiale (distance entre les pôles « sol court » et « sol épais » de la séquence pédologique variant de 10 à 200 m) qui ne peut pas être représentée à partir de sondages à la tarière ;
- les sols peu épais contiennent une pierrosité plus ou moins importante qui rend incertain l'accès à l'interface avec le substratum calcaire à partir des sondages à la tarière.

La précision des MNT actuellement disponible (pas de 10 mètres) autorise de les utiliser pour rendre compte de la variabilité spatiale des épaisseurs de sols smectitiques.

Le BRGM et l'INRA proposent de procéder à une validation de la méthode de « cartographie numérique » par comparaison avec des observations fines de terrain réalisées sur quelques portions du territoire.

Des alternatives à la cartographie traditionnelle ont déjà été recherchées. Notamment, les travaux de Y.M. Cabidoche (1985) ont montré qu'il était possible d'utiliser une méthode de prospection électrique pour obtenir une cartographie réaliste de la position de l'interface sol/substratum : les smectites calciques, continues en période humide, ont une résistivité de 3 à 4 Ohm, tandis que le calcaire sous jacent a une résistivité de plus de 10 Ohm. Il est proposé de mettre en œuvre une méthode similaire permettant la validation de la carte « numérique ».

3. Programme technique

3.1. Sélection de parcelles tests

Quatre parcelles de Grande-Terre ont déjà fait l'objet d'une cartographie « géophysique » (cf. travaux cités en bibliographie). Il est proposé d'en retenir deux comme parcelles test : une dans le nord Grande-Terre et une à l'Est. Leur taille sera toutefois limitée à 250 x 250m.

Les secteurs ayant déjà fait l'objet d'une cartographie « géophysique » sont présentés en Figure 1.

Une visite de chacune des parcelles, sera réalisée conjointement entre BRGM et INRA, afin de sélectionner celles présentant un minimum de contrainte à la mise en œuvre de la méthode géophysique.

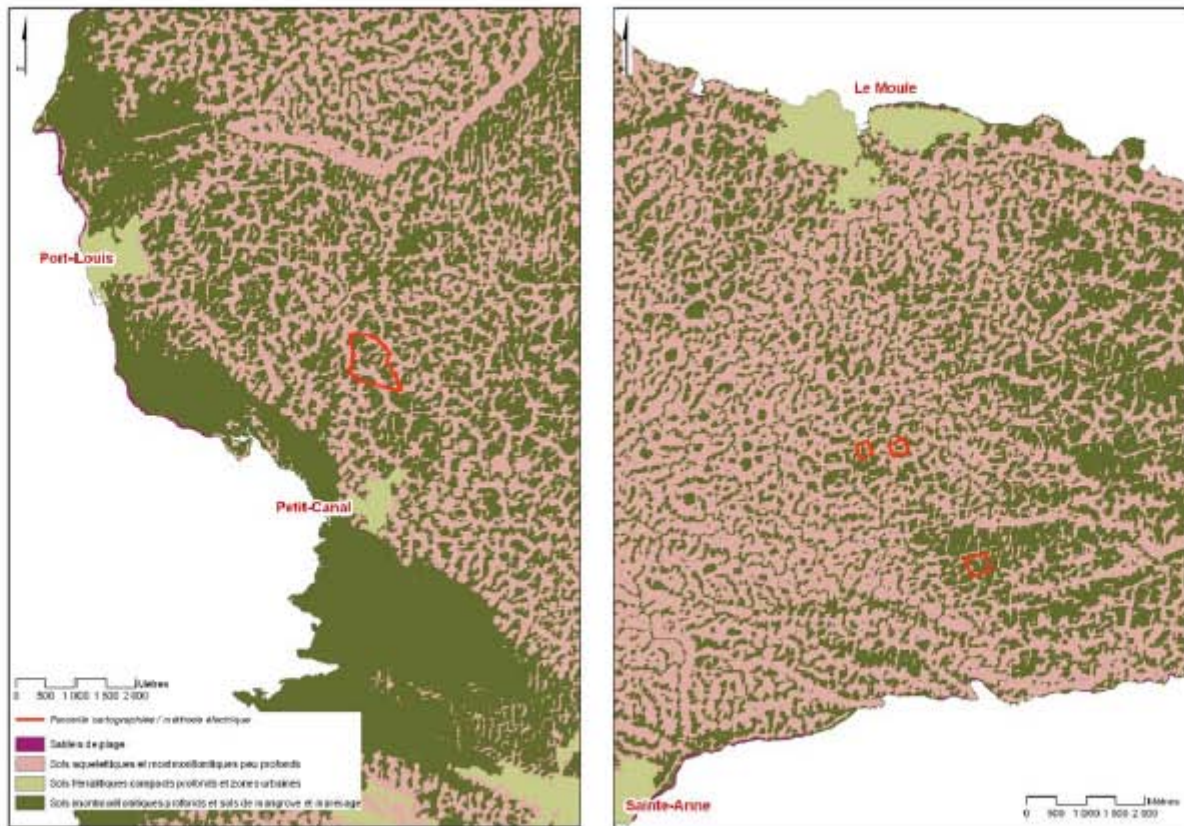


Figure 1 : Carte des sols (basée sur le traitement du MNT dans les secteurs à sols smectitiques) et cartes de résistivité existantes

3.2. Validation du MNT

La représentativité de la carte des sols smectitiques obtenue à partir de l'analyse dépend de deux facteurs : la qualité du MNT et le choix de traitement numérique de celui-ci. Par ailleurs, l'interprétation des données électriques nécessite des corrections en relation avec la topographie du secteur d'étude.

Aussi, un relevé topographique fin des parcelles test sera réalisé par l'INRA.

3.3. Cartographie géophysique des épaisseurs de sols smectitiques

Dans la pratique, la mise en œuvre de la méthode électrique en courant continu (utilisée lors des cartographies antérieures) est lourde à mettre en œuvre (main d'œuvre). L'utilisation de la méthode EM (électromagnétisme) est donc préconisée, avec un appareillage Ohmapper (équivalent d'un dispositif dipôle-dipôle). Par rapport à la méthode en courant continu, la mise en œuvre de l'Ohmapper est plus rapide et plus légère (1 seule personne). Le principe de mesure est identique à celui du trainé à écartements différents : mesure de la conductivité apparente (et donc résistivité apparente) avec plusieurs dimensions de dispositifs.

Des dispositifs $D = 2.5, 5$ et 10m avec mesures des rangs $n=1$ à 3 devraient permettre d'atteindre une profondeur d'investigation de 5m tout en conservant une résolution suffisante pour les mesures les plus superficielles. La dimension optimale des dispositifs et le nombre de rang à mesurer pour chaque dispositif seront préalablement estimés par mesures sur un profil complet.

Les mesures seront interprétées avec les logiciels d'inversion de mesures électriques et présentées sous forme de coupe de résistivité verticale (2D) le long des profils, de cartes (X,Y) et de diagrammes 3D de résistivité, de profondeur et d'épaisseur.

La campagne de prospection géophysique aura lieu en période humide de façon à ce que les fentes de retrait des sols smectitiques soient minimales.

Le BRGM est membre fondateur de l'AGAP (Association pour la Qualité en Géophysique Appliquée) et s'engage pour ses prestations à respecter le "Code de bonne pratique" de Géophysique Appliquée.

Une comparaison de différentes méthodes d'investigation géophysique, dont la méthode Ohmmapper est fournie en annexe.

3.4. Géostatistiques

Trois étapes seront nécessaires à l'analyse de la qualité de la carte de répartition des sols smectitiques réalisée à partir de l'analyse du MNT10 :

- Comparaison du MNT 10 et du levé topo des parcelles- test ;
- Comparaison des cartes « géophysiques » existantes et des cartes réalisées dans le cadre du projet ;
- Comparaison de la carte de répartition des épaisseurs de sols smectitiques obtenue à partir de l'analyse du MNT aux cartes « géophysiques » obtenues dans le cadre du projet.

Ces comparaisons seront effectuées à l'aide du logiciel de géostatistiques GDM.

3.5. Proposition d'améliorations de la méthode de cartographie « numérique »

Selon le degré de qualité attribué à la carte « numérique », des orientations seront proposées pour améliorer la méthode de cartographie (calage des paramètres de cartographie numérique).

4. Délivrables

Un rapport de synthèse des investigations réalisées et des résultats obtenus sera délivré aux partenaires du projet en 2 exemplaires papier et un exemplaire numérique (format Acrobat).

5. Programme financier

Prestation BRGM	Prix de vente TTC	Prix de vente HT
Sélection de parcelles test	2170,00	2 000
Cartographie géophysique		
Amenée repli matériel	7101,33	6 545
Saisie des mesures 3	32625,95	30 070
Interprétation	4296,60	3 960
Géostatistiques	10850,00	10 000
Amélioration de la méthode de carto numérique	5425,00	5 000
Édition du rapport de synthèse	4340,00	4 000
Total	66808,88	61575

Prestation INRA	Prix de vente TTC	Prix de vente HT
Nivellement des parcelles test (pas de 10 m)	4340	4000
Amélioration méthode de cartographie numérique	3580,5	3300
Rapport	3580,5	3300
Total	11501,00	10600
TOTAL	78309,88	72175,00

6. Chronogramme

Taches	Mois 2006											
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Sélection de parcelles test												
Nivellement parcelles												
Cartographie géophysique												
Géostatistiques												
Amélioration de la méthode de carto numérique												
Édition du rapport de synthèse												

La cartographie géophysique devra être réalisée en période humide (nécessité d'une saturation en eau des sols maximale)

Bibliographie :

CABIDOUCHE Y.M., 1986. Distribution des sols à argiles gonflantes sur calcaires récifaux (zone caraïbe). Utilisation de mesures de résistivité électrique. In : "Sol et Eau", actes du Premier Séminaire Scientifique de Pédologie pour la Région de l'Amérique Centrale et des Caraïbes, la Havane, 8-20 avril 1985. Ed. ORSTOM, Paris, 187-219. (INVITE) (Texte Intégral)