



Mise en relation de la cartographie du rendement avec la distribution spatiale de l'état de surface du sol observée par télédétection

Ignacio Touriño Soto

► To cite this version:

Ignacio Touriño Soto. Mise en relation de la cartographie du rendement avec la distribution spatiale de l'état de surface du sol observée par télédétection. Agronomie. Institut National Polytechnique (Toulouse), 2005. Français. <NNT : 2005INPT014A>. <tel-04626884>

HAL Id: tel-04626884

<https://hal.science/tel-04626884v1>

Submitted on 27 Jun 2024

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

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



HAL Authorization



INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE de
TOULOUSE



ECOLE DOCTORALE « SCIENCES ECOLOGIQUES,
VETERINAIRES, AGRONOMIQUES ET
BIOINGENIERIES ».



ECOLE SUPERIEURE
D'AGRICULTURE DE
PURPAN

THÈSE

Présentée par

Ignacio TOURINO SOTO

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE

Spécialité : ANALYSE SPATIALE ET AGRONOMIE

**Mise en relation de la cartographie du rendement avec la
distribution spatiale de l'état de surface du sol observée par
télédétection.**

Application dans un contexte d'agriculture de précision

Soutenue publiquement le 17 juin 2005 à Toulouse devant le jury composé de :

M.	P.	GRIEU	ENSAT – INRA Toulouse	Directeur de thèse
Mme.	F.	CARRÉ	JRC - IES	Rapporteur
M.	R.	ESCADAFAL	IRD- CESBio	Rapporteur
M.	C.	PUECH	CEMAGREF- Montpellier	Rapporteur
M.	M.	GAY	ESA-Purpan	Examineur et co-encadrant
Mme.	M.	GUERIF	INRA- Avignon	Examinatrice
M.	P.	DOUBLET	G.C.O.	Invité

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier trois personnes sans qui ce périple particulier, appelé thèse, n'aurait pas eu lieu. Jean-François Sillon m'a encadré lors de mon DEA et m'a beaucoup aidé pour trouver un financement de thèse et pour démarrer ce travail ; je tiens à te remercier très fortement et, même si tu as quitté le navire pour trouver ton port à Nice, Michel Gay d'un point de vue scientifique et Philippe Grieu d'un point de vue administratif ont réussi à mener le navire à bon port, un grand merci donc à mes deux directeurs de thèse. C'est au port que le jury, mon jury, a évalué le bateau ; je vous remercie du temps consacré à la lecture, aux critiques, au déplacement, ... Merci beaucoup !!!!.

Mais une traversée de ce style n'est pas conseillé en solitaire, c'est ici que je remercie le capitaine en ingénierie Jean Philippe Denux et informatique David Grandcoin et les autres membres de l'équipage, permanents, Véronique Cheret, Anne et Jonathan ainsi que les saisonniers (Mégane, Ewa, Lara, Monica, Laetitia, Paulina, Thomas, Jean Guillaume, Cédric, Carlos, Isabelle, Pierres, Benoît, Michael, Martin....), merci à tous pour les échanges, les gâteaux, les cafés, l'appui technique et moral

Mais comme il n'y pas que son propre bateau dans la vie, j'ai eu l'opportunité d'échanger, de partager, d'être guidé et conseillé par d'autres personnes, c'est ici que je remercie d'une part les membres du comité de pilotage de la thèse - Philippe Lagacherie, Delphine Leenhardt, Martine Guérif et Philippe Doublet ainsi que les membres du comité de lecture sur le changement d'échelle qui m'ont beaucoup aidé : merci à Robert, Michel, Philippe, Gérard, Carine, Anne, Laurent, Olivier, Hervé, Patrick, Frédéric et tous les autres.....

Un grand merci aussi à mes amis - clin d'œil à Sylvie pour ta lecture attentive et tes corrections - et à ma famille pour leur soutien permanent et en particulier à celle qui partage ma vie et avec qui de nouvelles croisières se profilent, merci beaucoup Anne. Enfin Gracias a todos los que me han ayudado, tanto de cerca como de lejos, a realizar este trabajo.

Résumé

Ce travail de thèse répond à une demande émanant du Groupe Coopératif Occitan (GCO) et s'inscrit dans une problématique de recherche actuelle. Le GCO cherchait à travers ce travail, d'une part à aider l'agriculteur à définir de zones de modulation intra parcellaire et d'autre part à identifier au sein d'un bassin agricole les zones de plus grand potentiel pour la mise en place d'une démarche d'agriculture de précision.

La problématique de recherche se place donc dans un contexte d'agriculture de précision. Elle concerne l'étude de la relation spatiale entre la variabilité spatiale du sol et celle du rendement à l'échelle intra parcellaire, sur l'étendue d'un bassin d'action. Pour analyser cela, il est préalablement nécessaire d'acquérir et de comprendre la variabilité intra parcellaire de chacune des deux variables : le rendement et le sol.

La première partie de ce manuscrit s'attache à l'analyse du rendement. Le travail de terrain réalisé dans le cadre de cette thèse (acquisition et traitement des cartes de rendement et enquêtes chez les agriculteurs) est présenté ainsi que l'explication de la variabilité intra parcellaire à laquelle il a permis d'aboutir.

Dans une seconde partie, le manuscrit s'attache à l'analyse du sol. Une synthèse bibliographique ainsi qu'un travail de terrain sur les sols de la zone d'étude sont présentés. Puis, l'approche d'observation du sol par télédétection est proposée. L'originalité de cette approche repose sur l'étude de la variabilité des sols (le *pattern*) et non de la valeur de réflectance. Cela permet de surmonter un des problèmes récurrents de l'étude des sols par télédétection qui est le nombre de facteurs influençant cette mesure. Compte tenu de cette approche et sous l'hypothèse que le « vrai *pattern* » du sol correspond à celui qui est temporellement stable, nous avons proposé une méthode permettant d'identifier les images où ce *pattern* est présent à l'échelle parcellaire. La source de cette variabilité est ensuite expliquée.

Le « vrai *pattern* » de sol, identifié par télédétection, est alors confronté aux cartes de rendement. Les relations spatiales entre ces deux variables sont analysées. Cette analyse apporte des éléments de réponse à la question scientifique posée.

La dernière partie du manuscrit consiste à la classification du bassin versant en zones de variabilité locale, ayant une signification agronomique. Un descripteur de cette variabilité, basé sur une fenêtre glissante, est proposé. Cette spatialisation répond à la deuxième attente du GCO.

Table des matières

Remerciements.....	3
Résumé.....	5
Table des matières.....	7
Introduction : Contexte, objectifs et structure de la thèse.....	9
Contexte et objectifs	11
I. L'agriculture de précision	13
I.1. L'agriculture de précision : le terme.....	13
I.2. L'agriculture de précision : la démarche	15
I.3. L'agriculture de précision : les outils et méthodes	16
II. Terminologie associée à la « Variabilité »	23
II.1. La variabilité : composante de l'hétérogénéité	23
II.2. La variabilité à l'échelle intra parcellaire	25
III. Structure de la thèse	27
Première partie La variabilité du rendement.....	29
Introduction.....	31
IV. Le rendement : Acquisition et traitement.....	33
IV.1. L'acquisition	33
IV.2. Traitements	35
IV.3. Conclusion	39
V. La base de données : cartes de rendement	41
V.1. Localisation.....	41
V.2. Données disponibles et récoltées	43
V.3. Analyse de la base de données.....	46
V.4. Conclusion	48
VI. Interprétation des cartes de rendement	51
VI.1. Enquêtes auprès des agriculteurs	51
VI.2. Zones intra parcellaires	59
VI.3. Analyse pluriannuelle des cartes de rendement	62
Conclusion de la première partie	69
Deuxième partie La variabilité du sol :.....	71
Introduction.....	73
VII. Zone d'étude et télédétection	77

VII.1.	Zone d'étude : Les sols de Boulbène	77
VII.2.	La télédétection.....	85
VIII.	Identification du « vrai <i>pattern</i> » du sol.....	99
VIII.1.	Identification du sol nu	100
VIII.2.	Identification du « vrai » <i>pattern</i>	101
VIII.3.	Discussion et conclusion.....	120
IX.	Explication du pattern de sol identifié	123
IX.1.	Introduction.....	123
IX.2.	Matériel et méthodes.....	124
IX.3.	Résultats.....	125
IX.4.	Conclusion	128
	Conclusion de la deuxième partie	131
	Troisième partie Variabilité du sol et variabilité du rendement :	133
	Introduction.....	135
X.	Relations sol, rendement et végétation	137
X.1.	Sol et rendement	137
X.2.	NDVI et rendement.....	141
X.3.	Sol et NDVI	148
	Conclusion de la troisième partie.....	151
	Quatrième partie Stratification du bassin versant	153
	Introduction.....	155
XI.	La stratification	157
XI.1.	Descripteurs texturaux statistiques	158
XI.2.	L'image de la texture	159
XI.3.	Résultats.....	162
	Conclusion de la quatrième partie.....	169
	Conclusion et perspectives.....	171
	Bibliographie.....	181
	Références bibliographiques.....	183
	Table de matières	197
	Liste des tables.....	203
	Liste des figures	205
	Liste des annexes	209
	Annexes.....	211

Introduction :

Contexte, objectifs et structure de la thèse

Contexte et objectifs

L'agriculture de précision, concept de gestion culturale né aux USA dans les années 1980 (Robert, 2002), se base sur l'existence d'une variabilité intra parcellaire observée par de nouvelles technologies et sur la prise en compte de celle-ci dans la mise en place de l'itinéraire cultural. En France, en 1993-1994, l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages (ITCF), devenu depuis Arvalis – Institut du Végétal, et le Cemagref ont réalisé les premières études dans ce domaine. Mais ce n'est qu'en 1997 que les cartes de rendement et autres technologies utilisées en agriculture de précision sont diffusées (Zwaenepoel et Le Bars, 1997). En 1998, le laboratoire de télédétection et de gestion des territoires (LTGT) de l'Ecole Supérieure d'Agriculture de Purpan (ESAP) s'est investi dans ce domaine avec l'installation de capteurs de rendement et d'humidité et d'un récepteur DGPS sur la moissonneuse batteuse d'un entrepreneur agricole, opérant dans le bassin versant du Touch (31). L'intérêt d'installer un capteur de rendement sur le matériel d'un entrepreneur était d'acquérir, d'une part, les données de rendement spatialisées des parcelles de la ferme expérimentale de Lamothe, appartenant à l'ESAP, et d'autre part d'acquérir des données sur un grand nombre de parcelles de différents agriculteurs et sur différentes cultures. Ensuite, en 2000, le LTGT et le Groupe Coopératif Occitan (GCO) ont collaboré pour l'équipement de deux autres moissonneuses batteuses qui récoltent sur les parcelles d'un certain nombre d'adhérents à la coopérative. Les données de rendement enregistrées sont traitées selon la procédure établie par le LTGT (Denux, 2004). Le GCO recherchait à travers ce projet à acquérir des compétences et de l'expérience dans le domaine de l'agriculture de précision afin de pouvoir ultérieurement assister les adhérents pour leur fournir conseils et services. En 2002, troisième année de collaboration entre le LTGT et le GCO dans le domaine de l'agriculture de précision, la décision de s'investir dans un travail de recherche appliquée a été prise. Le GCO disposait à ce moment-là des cartes de rendement de deux campagnes de récolte, sans forcément comprendre les sources de variabilité observables sur ces cartes. Le travail de recherche engagé au travers d'une convention CIFRE devait permettre :

- de mettre en valeur les cartes de rendement, i.e., identifier et expliquer les sources de variabilité des cartes de rendement pour aider l'adhérent, motivé par une démarche d'agriculture de précision, à définir les zones de modulation ;
- d'aider la coopérative à identifier les zones au sein de son bassin d'action où une démarche d'agriculture de précision présente un plus grand potentiel. Cela se traduit par la proposition d'une méthode de spatialisation d'un indice de potentiel des sols.

Pour répondre au premier objectif, une série de cartes de rendement, acquises et disponibles, ont permis de cartographier la variabilité intra parcellaire du rendement. Ensuite un travail de terrain et d'enquête a permis d'expliquer ces sources de variation. L'ensemble de ces travaux répondant à cet objectif a eu lieu sur les bassins d'actions de Castelnaudary et de Toulouse où un réseau d'agriculteurs et des cartes de rendement étaient déjà disponibles.

Pour répondre au deuxième objectif, nous sommes partis de l'hypothèse que le sol est la source de variabilité principale du rendement. A partir de l'observation du sol, un indice de potentiel de la mise en place d'une démarche d'agriculture de précision a été établi. Mais préalablement à la conception de cet indice, l'hypothèse d'une relation entre la variabilité du rendement et celle des sols a été analysée et discutée. L'utilisation de la télédétection comme source de données pour appréhender la variabilité des sols et pour pouvoir ainsi la mettre en relation avec le rendement a été examinée. De nouvelles hypothèses, méthodes et techniques ont été vérifiées, proposées et mises en place dans cette étude des sols par télédétection. L'ensemble de ces méthodes, techniques et analyses a été élaboré à Toulouse. La proximité et la disponibilité d'une série temporelle d'images étant la raison de ce choix géographique.

Dans cette partie introductive, nous présentons :

- Le contexte général de l'agriculture de précision, avec sa définition et les étapes nécessaires à sa mise en place (chapitre I) : cela permet de comprendre la position de notre démarche de recherche dans un contexte plus général d'agriculture de précision.
- Certains termes généraux comme l'hétérogénéité ou la variabilité en agriculture de précision (chapitre I) : cela permet de comprendre et positionner notre démarche par rapport à cette terminologie.
- L'organisation générale de cette thèse.

I. L'agriculture de précision

I.1. L'agriculture de précision : le terme

I.1.1. L'agriculture de précision et ses nuances

En Français, le terme « Agriculture de précision » est le terme le plus répandu chez les acteurs concernés et les moyens de communication pour définir une agriculture qui utilise la variabilité spatiale intra parcellaire en vue de l'optimisation des pratiques culturales pour obtenir une amélioration des résultats économiques et de la protection de l'environnement. Ce n'est pas le cas dans les pays anglo-saxons où l'on peut rencontrer d'autres termes : « *precision farming* », « *precision agriculture* », « *site specific-management* », « *site specific agriculture* » ou « *site-specific farming* » (Auernhammer, 2001; Basso, 2001; Blackmore, 1999b; Earl et al., 1996; Kitchen et al., 1998; Pettygrove et al., 1997; Robert, 2002). Cette variété de termes peut être divisée en deux groupes la « *precision agriculture / farming* » et le « *site-specific management / agriculture / farming* ». Le terme « **precision agriculture** » est considéré comme un terme plus général pour exprimer l'utilisation des nouvelles technologies pour l'observation et l'analyse de l'évolution temporelle, à une échelle fine, des composants déterminants d'un processus de production agricole ; en revanche, le « **site-specific management** » est une composante de la « *precision agriculture* » visant à organiser les pratiques agricoles à l'échelle intra parcellaire (Acpa, 2003; Plant, 2001). Dans ce travail, **nous restons dans le domaine de l'agriculture de précision**, l'étude et la compréhension de la variabilité spatiale intra parcellaire ou inter parcellaire mais sans arriver jusqu'à la « gestion modulée » (« *site-specific management* »).

I.1.2. Agriculture de précision et connaissance

Le développement de **l'économie de la connaissance** est, depuis le Sommet Européen de Lisbonne de mars 2000, l'un des principaux objectifs de l'Union Européenne. La recherche, moteur fondamental de l'évolution de la société, vise à la fois l'acquisition des connaissances et leur utilisation. L'objectif premier de la recherche européenne est de faire de l'Europe « l'économie de la connaissance la plus compétitive et la plus dynamique du monde ». Concernant le domaine de l'agriculture, l'acquisition d'une connaissance détaillée sur les conditions de culture a été longtemps inaccessible ou très chère (Schmoldt, 2001; Witney, 2003). Ce n'est que depuis une quinzaine d'années que cette connaissance détaillée du milieu est possible. Les progrès technologiques en matière de localisation, de capteurs, et de communication ont permis aux agriculteurs, chercheurs et administrateurs de collecter une grande quantité de données géolocalisées et d'augmenter ainsi les connaissances

détaillées en agriculture. Ces nouvelles pratiques d'acquisition de données géolocalisées avec des moyens technologiques avancés au service de l'agriculture sont connues sous le nom d'agriculture de précision.

Les techniques et les outils mis en place dans une démarche d'agriculture de précision permettent aux agriculteurs de faire face aux exigences nouvelles qui leur sont imposées. Le contexte international, à travers la Politique Agricole Commune, avec la baisse du prix d'intervention européen pour un rapprochement du cours mondial des denrées agricoles, mais aussi la baisse inévitable des aides directes à la production, obligent les agriculteurs à réduire leurs coûts de revient pour conserver leurs marges et leurs revenus. D'autre part, la société et les consommateurs sont de plus en plus exigeants envers la profession agricole - et toutes les entreprises en général – en terme de qualité, de traçabilité et d'impact sur l'environnement de leurs activités (Cabrol, 2002).

1.1.3. Agriculture de précision et agriculture durable

Les approches visant à rendre conforme l'agriculture à des objectifs de développement durable, à réconcilier agriculture et environnement, se sont largement développées ces dernières années (Féret et Douguet, 2001). Ces approches se traduisent par des qualificatifs de l'agriculture : agriculture durable, agriculture raisonnée, agriculture biologique, agriculture de précision, etc.

Parmi ceux-ci, l'agriculture durable est un terme générique. Il signifie la production de produits de qualité dans le présent et dans le futur dans un environnement de santé, socialement acceptable et économiquement viable (Leiva et al., 1997). Les autres termes qualificatifs génériques ont été initialement appliqués aux pratiques ou aux systèmes d'agriculture (Vorley et Feret, 2001). Ces autres termes d'agriculture (biologiques, intégrée, raisonnée, de précision, réfléchie, etc.) peuvent toutefois revendiquer de contribuer à une « agriculture durable » (Vorley et Feret, 2001). Bien que l'agriculture de précision ait comme objectifs d'augmenter le bénéfice économique et de réduire l'impact environnemental, en adaptant les pratiques culturales au niveau de la parcelle (Blackmore, 1999a), elle est controversée au sein de la communauté de l'agriculture durable pour des raisons de niveau d'investissements et d'expertise technique important (Gold, 1999). Néanmoins, d'après Basso (Basso, 2001), pour atteindre l'ultime objectif d'une agriculture durable, les variabilités spatiale et temporelle doivent être prises en compte parce que les facteurs qui influent sur le rendement de la culture ont une différence de comportement spatio-temporel.

Cette variabilité spatio-temporelle est analysée dans une démarche d'agriculture de précision. En conséquence, la gestion modulée en agriculture de précision, qui permet à l'agriculteur d'adapter, à l'échelle intra parcellaire, les pratiques culturales, peut être considérée comme un pas en avant dans une démarche d'agriculture durable.

I.2. L'agriculture de précision : la démarche

La démarche en agriculture de précision peut être divisée en trois étapes fondamentales : observer – analyser – agir. Ces trois étapes sont les mêmes que les étapes de la conduite modulée présentée par Boisgontier en 1997 (Boisgontier, 1997).

I.2.1. Observer

L'observation consiste à la mise en évidence et la caractérisation de la variabilité spatiale intra parcellaire ou inter parcellaire. Elle consiste à collecter de l'information sur le milieu et la plante pour mieux connaître les hétérogénéités. Les systèmes de localisation qui permettent le positionnement des observations, la télédétection satellitaire ou embarquée, les différents capteurs (sol, rendement, mauvaises herbes, etc.) et toutes les nouvelles technologies sont les outils utilisés pour réaliser cette première étape. Dans ce travail de thèse nous avons réalisé des observations de la double variabilité intra parcellaire :

- du milieu : par télédétection satellitaire et aérienne;
- de la plante : au moment de la récolte avec des capteurs de rendement.

I.2.2. Analyser

L'objectif de l'analyse est : (i) la compréhension de cette variabilité, (ii) l'étude de l'influence des différents facteurs sur le rendement, (iii) l'étude des impacts de cette source de variabilité vis-à-vis de l'opération culturale à réaliser (décision opérationnelle), pour l'exploitation dans sa globalité (incidence économique et sur l'environnement) (Boisgontier, 1997). Dans ce travail de thèse, nous avons essayé d'expliquer la variabilité spatiale des cartes de rendement selon deux points de vue :

1. Celui de l'agriculteur : acteur premier dans l'agriculture, il possède les connaissances nécessaires pour expliquer la variabilité observée sur les cartes de rendement de ses parcelles. Ce travail de présentation, d'enquête et d'analyse des cartes de rendement est réalisé dans la deuxième partie de cette thèse. Il permet d'identifier les principales causes de variation.
2. Celui du sol : parmi les variables pouvant expliquer la variabilité du rendement – sol, climat, mauvaises herbes, ravageurs, précédent cultural - le sol présente

probablement une stabilité spatiale et temporelle que les autres variables ne présentent pas. La distribution des structures spatiales (« patterns ») des sols, observables au sein d'une parcelle, est stable dans le temps. La focalisation sur les sols doit ainsi permettre d'établir des cartes de préconisation qui peuvent aider à l'agriculteur dans sa prise de décisions.

I.2.3. Agir

Cette phase est l'étape objective finale de l'agriculture de précision. Il s'agit de la prise de décision et de sa mise en oeuvre sur la parcelle. Pour la mise en oeuvre de la conduite modulée des parcelles, deux pratiques sont possibles (Boisgontier, 1997):

- la modulation en temps réel, c'est-à-dire, à l'aide de capteurs permettant d'agir sur le matériel utilisé pendant le travail ;
- la modulation basée sur l'utilisation de cartes de préconisation.

L'utilisation de l'une ou l'autre des méthodes va dépendre de l'opération culturale à mettre en oeuvre, c'est-à-dire du type de paramètre pris en compte pour décider du réglage du matériel. Ces deux pratiques peuvent d'ailleurs être combinées pour la même opération culturale selon les différentes étapes de sa réalisation. Par exemple, pour la fertilisation azotée d'un blé, les deux premiers apports d'azote peuvent être réalisés à partir de cartographie prenant en compte différents paramètres du milieu (et en particulier des données pérennes comme la profondeur de sol, la texture, ...) et le dernier à l'aide d'un capteur mesurant le besoin réel de la plante au moment de l'apport.

Dans tous les cas, cette étape de mise en place d'une modulation ne concerne que l'agriculteur, la seule aide « externe » possible est celle du conseil et de l'aide à la décision, toutefois cette aide « externe » dépasse les objectifs de la thèse.

I.3. L'agriculture de précision : les outils et méthodes

L'agriculture se définit comme l'ensemble des activités développées par l'Homme et qui a pour objectif une transformation du milieu naturel afin de produire les plantes et nourrir les animaux qui lui sont nécessaires, particulièrement pour son alimentation. Parce qu'elles sont réalisées sur un territoire, ces activités agricoles de transformation du milieu naturel se caractérisent par leur dimension spatiale. Celle-ci doit être appréhendée par des outils et des données dont nous proposons ci-après une présentation succincte.

I.3.1. L'Analyse spatiale

L'analyse spatiale concerne l'analyse de toute variable régionalisée (VR) qui est définie comme une variable dont les valeurs sont localisées dans l'espace (Cressie 1991). Deux domaines sont concernés par le traitement des VR : la géomatique et la géostatistique (Burrough, 2001).

I.3.1.1. La géomatique

La géomatique peut être définie comme l'ensemble des applications de l'information au traitement des données géographiques, et en particulier à la cartographie (Aubry, 2000). L'outil de la géomatique le plus connu est les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Il peut être défini comme un système informatique permettant la saisie, le stockage, la gestion, l'analyse et la représentation graphique de l'information localisée (Aubry, 2000). En agriculture de précision, la plupart des travaux utilisent les SIG pour stocker l'information géographique. Mais dans d'autres travaux, les SIG sont abordés comme des outils intégrés et nécessaires à une démarche d'agriculture de précision pour l'observation, l'analyse et le traitement de données (Zhang et al., 1999) ou pour la préparation des apports modulés (Earl et al., 2000).

I.3.1.2. La géostatistique

Basée sur la théorie des variables régionalisées, développée par Matheron dans les années 70, la géostatistique est définie comme l'étude des variables numériques réparties dans l'espace. Le principal outil de la géostatistique est le variogramme. Il permet une description de la structure spatiale des données. Le semi-variogramme est calculé selon la formule suivante:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z_u(x_i) - Z_u(x_i + h))^2$$

Où x_i et x_i+h sont les localisations des échantillons de la variable Z_u . La sommation est étendue à tous les couples de points (x_i, x_i+h) distants de h . $N(h)$ représente le nombre de couples de points (Armstrong et Carignan, 1997). Le résultat graphique représente donc la variance en fonction des distances « h » (Figure I-1). En terme général, pour de faibles distances, la corrélation est forte (variance plus faible) pour ensuite atteindre la valeur où il n'existe plus de corrélation spatiale, là où la variance ne grandit plus. On a donc atteint le palier (C_0+C). La distance à laquelle ce palier est atteint définit la portée (a). Le troisième terme définissant un variogramme est l'effet pépité (C_0). Il s'agit, à de très faibles distances, de l'existence de valeurs de variance différentes de zéro. D'autres points importants sont la

pente à l'origine et la forme du variogramme. Un variogramme horizontal indique une absence de structure spatiale.

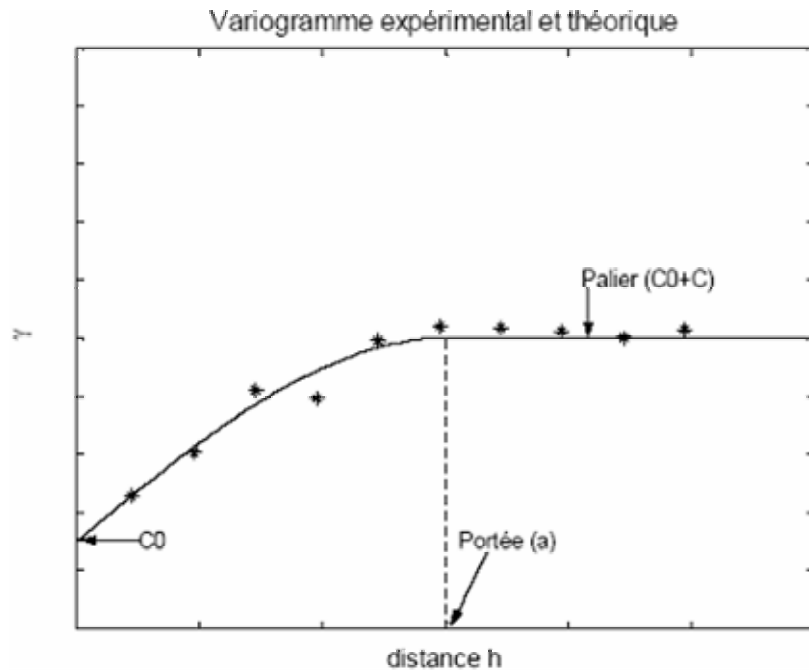


Figure I-1 - Composantes du variogramme : portée (a) , palier (C0+C) et effet pépité (C0).

Variogramme expérimental (étoiles) et variogramme théorique (ligne continue)

Le variogramme peut être modélisé ; on parle alors de variogramme théorique. L'ajustement de modèles au variogramme expérimental permet de caractériser le comportement spatial du jeu de données ou de produire des cartes spatialisées par krigeage (Legendre et Legendre, 1998). Les modèles de variogramme les plus courants sont les modèles sphérique, exponentiel, gaussien, cubique et la fonction puissance. Leur choix et leur ajustement nécessitent une décision de l'utilisateur et un certain temps de calcul. Dans la mesure où nous voulons travailler sur un grand nombre de parcelles et parce que les méthodes proposées doivent être extrapolables à d'autres sites, nous essayerons, tout au long de cette thèse, de nous affranchir de cette étape de modélisation afin d'avoir une démarche automatique.

Le variogramme croisé généralise le variogramme au cas multivarié. Il permet de mettre en relation des structures spatiales liées (Chica-Olmo et Abarca-Hernandez, 1998; Goulard et Voltz, 1992; Lacaze et al., 1994). Il est défini ainsi :

$$\gamma_{uv}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [(Z_u(x_i) - Z_u(x_i + h))(Z_v(x_i) - Z_v(x_i + h))]$$

Où x_i et x_i+h sont les localisations des échantillons des variables Z_u et Z_v . La sommation est étendue à tous les couples de points (x_i, x_i+h) distants de h . $N(h)$ représente le nombre de couples de points. Cette fonction décrit donc la liaison spatiale entre les variables « u » et

« v » (Webster et Oliver, 2001). Ce variogramme croisé sera partie intégrante des méthodes proposées dans cette thèse.

I.3.2. Les systèmes de navigation globale : le positionnement

Il existe actuellement dans le monde deux systèmes actifs de navigation globale (GNS) ; l'un américain, le GPS (Global Positioning System) et l'autre russe, le GLONASS (Global Orbiting Navigation Satellite System). Parmi ces deux systèmes, conçus dans une optique militaire, seul le système GPS offre aussi de véritables applications civiles. Le GPS dispose à l'état actuel du monopole pour la navigation et le positionnement. Dans un futur proche (2008), un troisième système, l'européen Galileo, augmentera l'offre de l'infrastructure globale de navigation par satellite (GNS). Il permettra une précision horizontale d'un mètre. Nous présentons quelques bases de l'actuel GPS et du futur Galileo.

I.3.2.1. GPS

Le GPS est un réseau de 24 satellites situés à une altitude de 20 200 km sur 6 orbites et qui émettent en permanence (1 signal toutes les 10^{-10} s) des signaux à une fréquence donnée (10.23 Mhz). Ces signaux peuvent être captés par le récepteur GPS du mobile terrestre et fournissent un positionnement dès lors que le signal provient d'au moins quatre satellites (principe de trilatérisation). Le système GPS assure une précision horizontale de l'ordre de 15 à 20 mètres. Pour améliorer la précision de la localisation, une correction différentielle peut être réalisée. On parle alors de dGPS (Differential GPS). Le principe de la correction différentielle en mode instantanée est la réception d'un nouveau signal dont le système est présenté dans la figure ci-dessous :

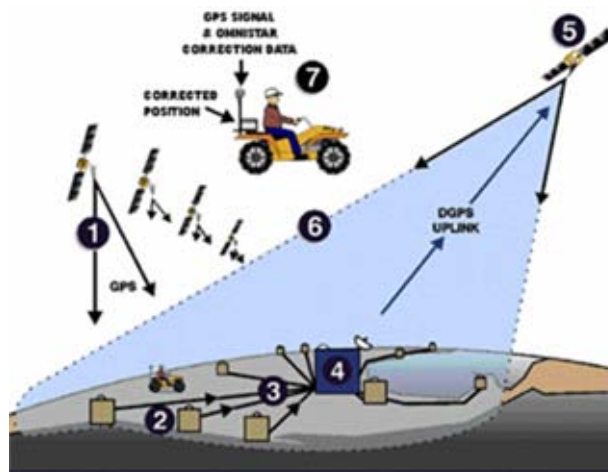


Figure I-2 - Système global de correction différentiel du signal GPS en temps réel (Omnis.T.A.R., 2005)

Le point (1 de la Figure I-2) est celui de l'émission du signal GPS. La réception par les stations de référence (2 de la Figure I-2) permet de mesurer l'interférence ionosphérique et d'autres erreurs inhérentes au signal GPS. Ensuite la donnée est traitée et envoyée (3 de la Figure I-2) aux centres de contrôle où les données sont vérifiées et compactées. Elles sont envoyées (4 de la Figure I-2) par liaison ascendante au satellite géostationnaire (5 de la Figure I-2) celui-ci permet, pour une zone donnée (6 de la Figure I-2), de corriger le positionnement. Cette correction est envoyée (7 de la Figure I-2) au client abonné. Ce système permet ainsi d'assurer une précision horizontale de positionnement entre 3 et 10 mètres (Omnis.T.A.R., 2005)

I.3.2.2. GALILEO

La constellation GALILEO sera composée de 30 satellites, dont 27 opérationnels et 3 de réserve. Ils seront placés sur 3 plans d'orbite circulaires régulièrement espacés, à une altitude de 23 616 km avec un angle d'inclinaison de 56°. Chaque orbite sera composée de 9 satellites actifs par plan, plus 1 en réserve. Cette constellation, dite de Walker, permet d'avoir une bonne précision de restitution de la position en tout point du globe grâce à la visibilité permanente d'au moins 8 satellites.

I.3.3. Les capteurs et méthodes

Il existe actuellement un grand nombre de capteurs permettant de mettre en évidence la variabilité intra parcellaire. Ces capteurs apportent des données sur le sol, sur l'évolution de la culture ou sur l'état final de la culture, c'est à dire, le rendement.

I.3.3.1. Mesures in situ

Les mesures in situ réalisées sur le terrain permettent le suivi et l'observation de toute variabilité, d'une part celle du sol par des mesures et analyses de sol permettant de caractériser la variabilité statique (cf. II.2) et d'autre part par le suivi de la culture (par exemple le besoin en azote). La limite de cette méthode est le caractère discret des mesures (mesures ponctuelles). Cette discrétisation n'est pas directement adaptée à de grandes étendues car elle est considérée comme très coûteuse en personnel et en matériel.

I.3.3.2. Méthodes géophysiques

Dans le domaine des sciences du sol, il existe un certain nombre de mesures permettant de cartographier et donc d'appréhender la variabilité des sols : mesures électriques, par induction électromagnétique, magnéto-tellurique-artificielle (MTA) et radar géologique (Michot, 2003). Parmi ces mesures, les deux premières sont amplement utilisées dans un contexte d'agriculture de précision :

- *Mesures électriques* : Cette méthode est basée sur l'injection d'un courant électrique continu et la mesure de la résistivité électrique apparente du sol en fonction de la géométrie du dispositif d'électrodes utilisée. Dans le domaine de l'agriculture de précision, l'outil MuCEP (Dabas et al., 2000; Dabas et al., 2001) a démontré la possibilité de spatialiser la variabilité intra parcellaire des propriétés du sol.

- *Mesures par induction électromagnétique* : Cette méthode est basée sur la mesure de la conductivité électrique des sols au moyen de conductimètres électromagnétiques. En agriculture de précision, un grand nombre d'études (Sudduth et al., 2001; Sudduth et al., 2000) a été réalisé.

I.3.3.3. Méthodes de télédétection

La télédétection présente un important potentiel dans l'étude de la variabilité dynamique (cf II.1), *i.e.* pour le suivi de l'état de la culture avec l'assimilation de données dans de modèle de simulation de croissance des cultures (Houlès, 2004; Launay, 2002). Néanmoins elle est aussi utilisée pour caractériser la variabilité statique (Michot, 2003). Le tableau suivant présente le potentiel de la télédétection pour l'agriculture de précision.

	Variables Biophysiques	Visible Proche Infrarouge	Proche Moyen Infrarouge	Infra-rouge thermique	Micro-ondes actives (radar)	Micro-ondes passives
Structure du couvert	LAI	+++	+++	+	++	+
	Taux de couverture	++++	++++	++	++	+
	Port foliaire	+++	+++	+	+	+
	Taille de feuilles	+	+	+	+	+
	Hauteur du couvert	-	-	-	++	-
Propriétés des feuilles	Contenu en chlorophylle	+++	-	-	-	-
	Contenu en eau	-	+++	-	+++	+++
	Température	-	-	++++	-	++
Sol	Humidité	-	+	+	++	+++
	Rugosité	+	+	-	++	+
	Résidus de récolte	+++	++	-		-
	Matière organique	++	++	-	-	-

Tableau I-1 Variables biophysiques estimables par télédétection. Le niveau de précision et la robustesse de l'estimation sont indiqués par le nombre de + (« +++++ » précis et robuste ; «-» non estimable par télédétection (Baret, 1999)

Dans le tableau suivant les variables biophysiques sont mises en relation avec une application possible en agriculture de précision :

Application	Variables biophysiques	Domaine spectral
Fumure azotée	LAI (biomasse), Chlorophylle	VIS/PIR
Irrigation	Température	IRT
travail du sol/ semis	Humidité du sol	µonde
Phénologie	LAI, structure, Température, ...	VIS/PIT IRT
Attaque parasitaire	Chlorophylle, LAI, résidus de récolte.....	VIS/PIR/MIR
Fertilité du sol	LAI (biomasse), matière organique.....	VIS/PIR/(MIR)
Rendement	LAI, chlorophylle, Température.....	VIS/PIR IRT
Qualité (protéines)	Chlorophylle, LAI	VIS/PIR

Tableau I-2 Variables biophysiques estimables par télédétection et utilisables pour différentes applications. Les domaines spectraux sont VIS : visible ; PIR : proche infrarouge ; MIR : moyen infrarouge ; IRT : infrarouge thermique ; µonde : micro-ondes (Baret, 1999)

I.3.3.4. Les cartes de rendement

Les cartes de rendement ont été à l'origine de l'acceptation de l'existence d'une variabilité intra parcellaire. Elles ont permis la spatialisation de cette variabilité, son interprétation et la possibilité d'être contrôlée en définissant des zones et en essayant des modulations (Pierce et al., 1997). Dans la partie II, dédiée à la variabilité du rendement, nous aborderons l'acquisition, le traitement et l'interprétation des cartes de rendement.

Dans cette thèse, les SIG, la géostatistique, les cartes de rendement avec le positionnement par dGPS ainsi que les images prises par les capteurs embarqués sur les satellites, sont utilisés pour appréhender et analyser la variabilité spatiale du sol et du rendement. Les autres techniques (terrain ou méthodes géophysiques) n'ont pas été exploitées car elles sont moins adaptées à l'échelle d'un grand bassin versant. En effet, elles nécessiteraient une trop grande quantité de données coûteuses et une importante expertise en changement d'échelle, pour atteindre une spatialisation sur l'ensemble d'un bassin versant ou bassin agricole.

II. Terminologie associée à la « *Variabilité* »

Le terme **variabilité** ne peut pas être dissocié du terme **hétérogénéité**, de même qu'il ne peut pas être dissocié de celui d'**échelle**. Ces termes, variabilité, hétérogénéité et échelle sont abordés dans une première rubrique de ce chapitre. Ensuite la décomposition de la variabilité intra parcellaire en deux termes, variabilité statique et variabilité dynamique est traitée. Dans chacune de ces deux rubriques, nous faisons référence aux différentes parties de la thèse qui sont ensuite présentées dans la conclusion.

II.1. La variabilité : composante de l'hétérogénéité

L'hétérogénéité spatiale peut être définie comme la complexité et/ou la variabilité d'une propriété d'un système dans l'espace et/ou dans le temps (Li et Reynolds, 1994). La propriété se réfère à une mesure ayant une dimension spatiale - et/ou temporelle - comme la biomasse, le sol, etc. La **complexité** est le descripteur qualitatif ou catégorique de cette propriété. La **variabilité** est le descripteur quantitatif ou numérique de la propriété (Li et Reynolds, 1995). L'hétérogénéité spatiale peut être divisée en deux groupes (Li et Reynolds, 1995) :

- **l'hétérogénéité structurelle**, qui est la mesure de la complexité ou variabilité de la propriété d'un système sans référence à un processus.
- **l'hétérogénéité fonctionnelle**, qui est la mesure de la complexité ou variabilité de la propriété d'un système en référence à un processus.

Par exemple, le rendement d'une culture peut être observé en tant que processus : sa variabilité constitue alors une réponse aux variations des propriétés du sol de la parcelle ; on étudie alors l'hétérogénéité fonctionnelle du sol dans le processus du rendement. En outre, le rendement peut être considéré comme une propriété de surface mesurable (directement par des capteurs embarqués sur la moissonneuse batteuse, ou indirectement comme sortie d'un modèle de croissance de culture) dont les variations à l'intérieur de la parcelle représentent son hétérogénéité structurelle (Garrigues, 2004). L'hétérogénéité fonctionnelle est donc un niveau supérieur d'analyse permettant d'étudier le lien de causalité entre un processus et les variations structurelles du système. Dans cette thèse, après une étude de l'hétérogénéité spatiale structurelle du rendement (Partie 1) – mesurée directement par les capteurs des moissonneuses batteuses – et de l'hétérogénéité spatiale structurelle de l'état de surface (Partie 2) - appréhendé par télédétection - nous étudierons l'hétérogénéité fonctionnelle du rendement, qui sera considéré comme un processus. Nous cherchons donc à étudier le lien

entre la distribution spatiale du sol (cause) et les variations structurelles du rendement (effet) (Partie 3).

Une branche de l'hétérogénéité spatiale est la structure spatiale, définie comme la configuration spatiale de la propriété d'un système (Gustafson, 1998). Cette structure spatiale ou distribution spatiale (*pattern* en anglais) peut prendre différentes formes (Dutilleul et Legendre, 1993; Gustafson, 1998) : gradient, bruit et *patch* (terme anglais). Le *patch* désigne une région relativement homogène vis-à-vis d'une certaine variable, assez nettement délimitée dans l'espace (Aubry, 2000). L'interprétation du pattern spatial du rendement et du sol sera réalisée lors de l'étude de l'hétérogénéité structurelle de ces deux variables (Parties 2 et 3).

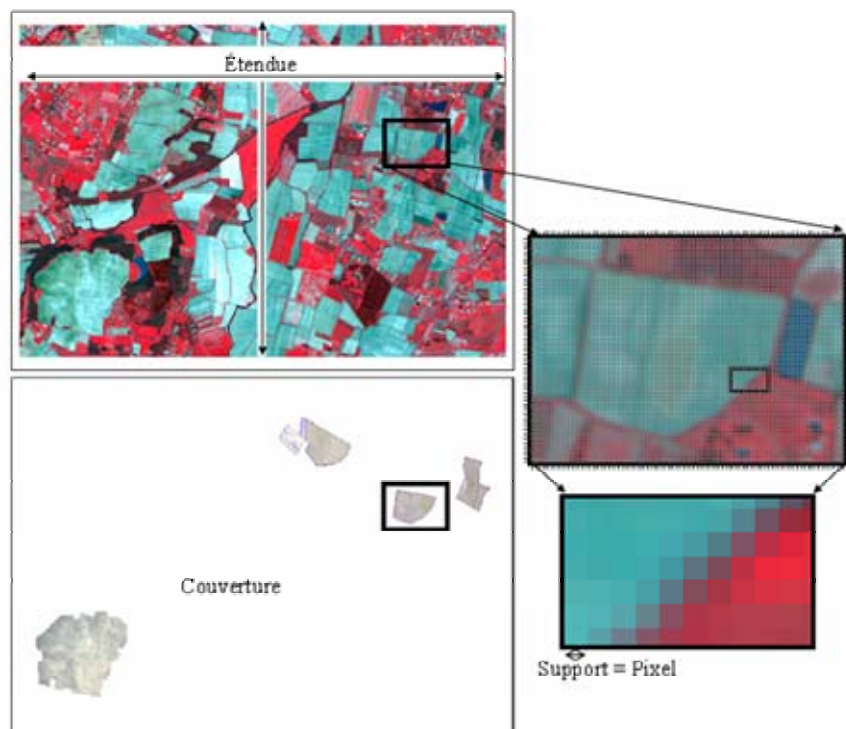


Figure II-1 - Représentation de notions associées à l'échelle : l'étendue, la couverture, le support et le pixel.

L'hétérogénéité spatiale d'un même phénomène dépend de l'échelle (Gustafson, 1998) :

- de **l'étendue** (*extent* en anglais) : il s'agit de la surface (volume ou temps) totale sur laquelle les mesures sont prises. L'étendue d'une image de télédétection correspond à l'emprise de l'image (Bierkens et al., 2000). L'étendue de la Figure II-1 est de 6780 mètres par 4640 mètres.
- du **support** : il s'agit de la surface de sol sur laquelle la variable est intégrée, c'est-à-dire la plus grande surface (volume ou intervalle de temps) pour laquelle la mesure est considérée comme homogène – on ne connaît pas la variance à l'intérieur de ce support (Bierkens et al., 2000). Pour les données de télédétection, la surface de sol

sur laquelle est intégré le signal radiométrique est approchée par une surface de forme carrée : le pixel. Dans la Figure II-1 le support spatial est de 10 mètres. De ce fait, l'image possède une résolution spatiale de 10 mètres.

Reliée à ces deux échelles, la couverture (*coverage* en anglais) est définie comme le ratio entre la surface de toutes les unités de support (ou points d'observation) par la surface de l'étendue. Sur la Figure II-1, les parcelles sélectionnés occupent une surface de 1 888 865 m², et l'étendue une surface de 31 459 200 m², donc la couverture est de 16.55, soit un taux de couverture de 6%.

Nous avons aussi une échelle dite de variation spécifique à la propriété observée. Elle est inhérente aux phénomènes étudiés. Par exemple pour un paysage agricole, comme celui de la Figure II-1, l'échelle de variation est donnée par l'étendue moyenne des parcelles (Garrigues, 2004). Enfin, il faudrait rajouter une dernière échelle dans le contexte d'agriculture de précision : **l'échelle d'opérabilité**. Elle est définie par la surface minimale de modulation ; cette surface étant variable selon la modulation envisagée, mais dépendante de deux facteurs (Baret, 1999) : la largeur de l'outil de modulation (d'environ 5 m à 24 m) et l'inertie longitudinale ou temps de réponse (de 1 à 10 m). Cette échelle rejoint le terme « *policy scale* » qui est l'échelle à laquelle les résultats du projet ou de l'étude sont attendus par les décideurs, appelée donc échelle décisionnelle (Bierkens et al., 2000).

II.2. La variabilité à l'échelle intra parcellaire

Dans l'élaboration du rendement d'une plante, plusieurs facteurs biotiques et abiotiques affectent le développement, et en conséquence le rendement de la plante. Les interactions entre tous ces facteurs ont lieu dans l'espace et dans le temps. Whelan (Whelan, 1998) et Bourennane et al. (Bourennane et al., 2001) évoquent que la variation temporelle est significativement plus importante que la variabilité spatiale. Dans l'étude de Whelan, pour des parcelles australiennes, la variabilité temporelle du rendement est dix fois plus importante que la variabilité spatiale.

Les variabilités spatiales de ces facteurs, biotiques et abiotiques, présentent une importance plus ou moins accentuée sur l'élaboration du rendement selon l'échelle d'observation à laquelle on se situe. D'après Whelan (Whelan, 1998):

- A l'échelle du paysage, échelle inter parcellaire, la variation du rendement peut être considérée comme la conséquence de la variabilité de l'interaction entre les cultures (facteurs biotiques) et le milieu (facteurs abiotiques).

-
- A l'échelle intra parcellaire, la variation de facteurs pédologiques, comme la texture, la structure, l'humidité (facteurs abiotiques) vont significativement contribuer à la variabilité spatiale du rendement.

A cette échelle intra parcellaire, la variabilité peut être divisée en deux termes :

1. **Variabilité statique** : elle est représentative du potentiel de la parcelle qui peut être étudiée par la cartographie des sols ou par une analyse pluriannuelle des cartes de rendement (Gay et Chéret, 1999). Cette variabilité statique caractérise les principales constantes du milieu, bien évidemment liées au sol (la fertilité, qui peut se décomposer en profondeur du sol, types de sol, teneur en matière organique, topographie,...). Ces indicateurs permanents peuvent être mesurés une fois et constituer ainsi une base de données que l'agriculteur pourra utiliser *a priori* pour raisonner ses opérations culturales (Baret, 1999).
2. **Variabilité dynamique** : elle est liée au comportement de la culture pendant l'année culturale en cours (Gay et Denux, 2000).

En conséquence, lorsqu'on s'intéresse à la variabilité intra parcellaire, une appréciation à échelle fine de la variabilité spatiale des sols et de leurs propriétés intrinsèques s'impose (Michot, 2003). Cette connaissance de la variabilité intra parcellaire des sols et l'évaluation de son influence sur la variabilité de la culture, pour établir de stratégies d'itinéraire cultural, est un pas essentiel dans la mise en place d'une démarche d'agriculture de précision (Earl et al., 2003; Mcbratney et Pringle, 1997). Cette caractérisation et comparaison de la variabilité spatiale du sol et des paramètres de la plante s'avèrent nécessaires pour pouvoir vérifier l'efficacité de la stratégie culturale prise, efficacité traduite par une réduction de la variabilité du sol ou de la plante (Eghball et al., 1999).

Cette variabilité spatiale doit être caractérisée en terme de quantité et de structure spatiale pour pouvoir établir une démarche de modulation intra parcellaire (Pringle et al., 2001) respectueuse de l'environnement (Cambardella et al., 1994).

III. Structure de la thèse

La Figure III-1 décrit la structure de cette thèse, dans le contexte terminologique associé à l'agriculture de précision et à la variabilité, tel qu'il a été présenté au cours de la **partie introductive**.

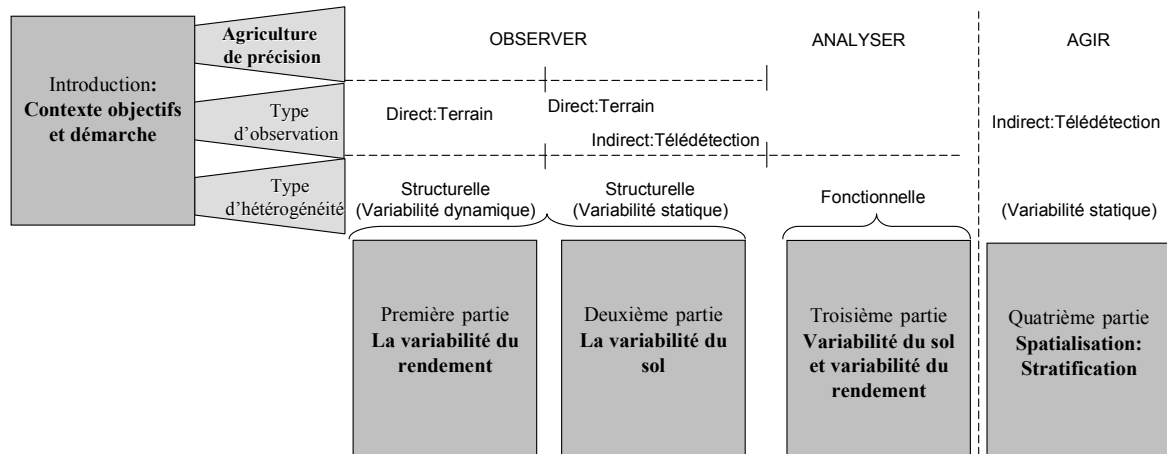


Figure III-1- Structure de la thèse : En gris foncé les parties de la thèse, en gris clair les notions reliées à l'agriculture de précision.

Ce document est divisé en 5 parties, illustrées dans cette figure par les grands carrés. Chacune de ces parties se trouve positionnée dans le contexte de l'agriculture de précision (observer, analyser et agir), du type d'observation (direct ou indirect), du type d'hétérogénéité (structurelle ou fonctionnelle) et du type de variabilité (dynamique ou statique).

En réponse aux objectifs présentés précédemment :

- l'explication du rendement (premier des 2 objectifs de la thèse) se situe dans la première étape d'une démarche d'agriculture de précision : l'observation. Cette observation est réalisée au travers de mesures de terrain : les cartes de rendement. L'observation de la variabilité du rendement est une observation du dernier stade phénologique de la variabilité dynamique de la culture. Elle est donc représentative de la parcelle à un temps « t ». Cette cartographie du rendement associée à des enquêtes chez les exploitants a permis d'expliquer la variabilité intra parcellaire et d'identifier ses différentes sources. La **première partie** de cette thèse est donc constituée de i) la présentation du traitement de cartographie du rendement, ii) explication et illustration des sources de variabilité rencontrées et iii) l'utilisation des cartes de rendement pour la détermination d'un zonage intra parcellaire.

La **deuxième partie** de cette thèse s'attache à étudier le sol. Compte tenu de la lourdeur et l'inadaptabilité des mesures terrain aux échelles de cette étude, l'approche du sol est réalisée par télédétection. La télédétection s'avère l'outil le plus adapté à l'échelle d'opérabilité (intra –parcellaire de quelques m²) et à l'étendue de cette étude (le bassin d'action de plusieurs centaines km²). Elle permet d'identifier les structures spatiales existant dans la parcelle. Nous avons donc disposé d'une série d'images pour observer le sol par télédétection. Cette observation du sol par télédétection, avec la présentation des limites des outils, est abordée dans cette deuxième partie de la thèse consacrée au sol. Ensuite, la structure spatiale du sol, identifiée par une méthode proposée dans le chapitre VIII, est mise en relation avec la structure spatiale du rendement : étude de l'hétérogénéité fonctionnelle (**troisième partie**).

Pour finir, la **quatrième partie** propose une méthode de stratification du bassin d'action, basée sur la variabilité locale du sol observée par télédétection et permettant de créer des zones plus ou moins variables ; ce zonage répond au deuxième objectif poursuivi.

L'originalité de cette démarche repose :

1. d'une part, sur les échelles spatiales : l'étendue du travail est le bassin d'action tout en conservant l'intra parcellaire comme l'échelle décisionnel ou d'opérabilité.
2. et d'autre part, sur l'utilisation de la télédétection pour répondre aux relations sol - rendement et à la stratification du bassin d'action avec deux approches particulières :
 - l'approche de l'observation de la variabilité non par son degré mais par sa distribution spatiale dans l'étude de la relation sol - rendement permet d'éviter un certain nombre de problèmes associés à l'utilisation de la télédétection. Elle a beaucoup de sens dans un contexte d'agriculture de précision où l'objectif ultime est de définir des zones de modulation au sein de la parcelle qui vont être dépendantes de cette distribution spatiale ; cette approche est donc la réponse à une question de recherche : **comment aborder l'étude des sols par télédétection dans une démarche d'agriculture de précision, compte tenu des limites de l'observation des sols par télédétection ?**
 - l'approche basée sur le calcul de la variabilité locale (texture). Cette approche permet de spatialiser la variabilité du bassin d'action et de créer de zones à plus ou moins fort potentiel de mise en place d'une démarche d'agriculture de précision.

Première partie

La variabilité du rendement

Introduction

Une carte de rendement est une représentation graphique, spatialement géoréférencée, de la production d'une culture pour une surface donnée (Pierce et al., 1997). Elle est essentielle dans la mise en place d'une démarche d'agriculture de précision – pour la compréhension de la variabilité - ainsi que dans l'évaluation de cette démarche (Birrel et al., 1996).

Cette partie est consacrée aux cartes de rendement. Sa finalité est de répondre au premier objectif de la thèse : la mise en évidence et l'explication du rendement intra parcellaire. Cette partie est divisée en trois chapitres : le premier concerne la méthode de cartographie des cartes de rendement, le deuxième la base de données disponible et le troisième la mise en valeur de cette base de données :

Le premier des 3 chapitres de cette première partie (chapitre IV) présente les principes et les outils de la cartographie du rendement, suivi de la méthode établie au sein du LTGT pour réaliser ces cartes. Durant cette thèse, les cartes de rendement de la campagne 2002 et 2003 ont été acquises avec l'appui technique d'étudiants en stage (à Castelnaudary et à Toulouse). La statistique concernant l'ensemble de la cartographie est présentée dans le chapitre suivant (chapitre V), avec la base de données disponible. Cette statistique montre entre autre, les différences de variabilité inter culturelles et inter annuelle. Dans le dernier chapitre de cette partie (chapitre VI), nous mettons en valeur les cartes de rendement. Ce dernier chapitre est divisé en trois grands sous-chapitres :

- un premier sous-chapitre illustre les sources de variabilité des cartes de rendement issues des connaissances des agriculteurs, enregistrées lors des enquêtes réalisées sur le terrain. Ceci permet ainsi de répondre :
 1. d'une part à une question scientifique clé : est ce que l'hypothèse, souvent formulée, que le sol est la principale source de variabilité intra parcellaire est vérifiable au travers des cartes de rendement ?
 2. d'autre part, et en relation directe avec cette question scientifique, au premier des objectifs de cette thèse : l'explication de la variabilité intra parcellaire.
- Un deuxième sous-chapitre présente une technique automatique de délimitation des zones indiquées et expliquées par l'agriculteur. L'objectif est de pouvoir insérer ces limites dans l'équipement embarqué sur le tracteur et ainsi pouvoir réaliser la modulation des actions de l'itinéraire technique.

- Dans le troisième, nous présentons une utilisation des analyses multi temporelles des cartes de rendement pour la mise en évidence des zones décrivant le potentiel de la parcelle.

IV. Le rendement : Acquisition et traitement

Une carte de rendement est le résultat cartographique des données traitées, issues de la masse de grain récoltée par la moissonneuse-batteuse, et enregistrées à pas de temps régulier. Deux étapes sont donc différenciables : (1) l'acquisition des données sur le terrain, travail qui a été réalisé en collaboration avec les stagiaires et co-supervisé par le responsable au sein du laboratoire du projet d'agriculture de précision, et (2) le traitement des données provenant du terrain. La carte de rendement est réalisée selon une chaîne de traitement semi-automatisée établie au sein du LTGT et mise en oeuvre par la personne qui a acquis les données de terrain.

IV.1. L'acquisition

Les moissonneuses batteuses disposent d'un certain nombre d'outils permettant l'acquisition des données qui seront enregistrées puis transférées et traitées. La présentation de ces outils, leur étalonnage et leur principe de fonctionnement, sont décrits dans les paragraphes suivants.

IV.1.1. Les outils

dGPS : (cf I.3.2.1) La correction différentielle permet la localisation, en latitude et longitude, avec une précision horizontale métrique, d'un point d'enregistrement. L'antenne dGPS se trouve sur le point le plus élevé de la moissonneuse batteuse (Figure IV-1).

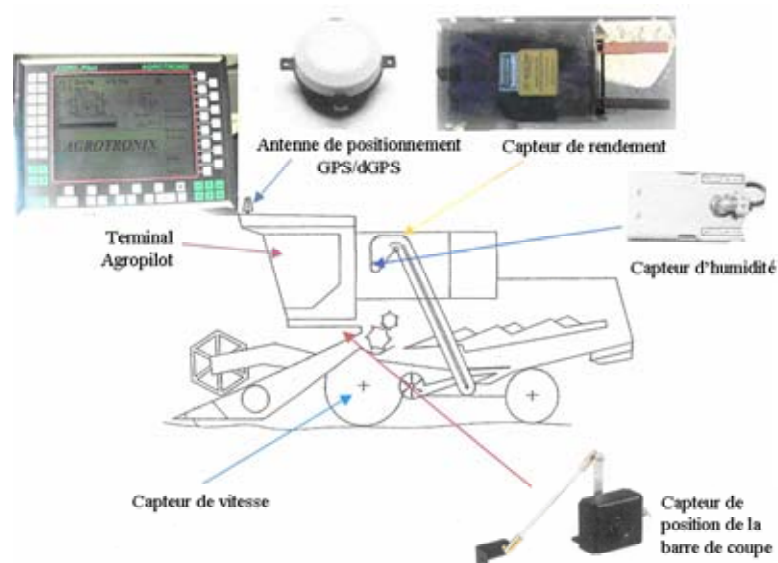


Figure IV-1- Outils installés sur la moissonneuse batteuse

Capteur de débit du grain : Parmi les capteurs existants dans le marché - capteurs volumétrique, massique et à rayon Gamma (Boisgontier et Ariaux, 1998) - les

moissonneuses batteuses installées par le LTGT ont été munies d'un capteur massique. La mesure se fait sur l'élévateur de grain par analyse de la contrainte du flux du grain sur le dispositif de mesure (Agrotronix 8 novembre 2004 : <http://www.agrotronix.fr/> Figure IV-1.). Cette mesure nécessite un étalonnage pour chaque machine et chaque variété de graines récoltées.

Capteur d'humidité : Installé dans la vis de transfert de trémie (Figure IV-1), le taux d'humidité du grain, variant lui aussi spatialement au sein de la parcelle, est estimé par mesure de la capacitance entre deux électrodes. La résistance électrique du grain varie en fonction de son taux d'humidité. Comme pour le capteur de flux, ce capteur nécessite également un étalonnage.

Capteur d'état de travail : Installé sur le convoyeur de la moissonneuse (Figure IV-1), ce système permet de déclencher l'arrêt de l'enregistrement, ou sa mise en marche, lorsque la barre de coupe est relevée ou en position basse. Entre l'enclenchement de la barre de coupe (position basse) et l'arrivée du grain sur le capteur, il existe un laps de temps correspondant au temps mis par le grain pour circuler à travers les organes de nettoyage de la machine (« *time lag* » en anglais).

Capteur de vitesse : Installé sur l'arbre de transmission, il permet de mesurer la distance parcourue par la moissonneuse-batteuse entre deux points de mesure - un point de mesure a lieu toutes les 3 secondes.

IV.1.2. Etalonnage

L'étalonnage est réalisé pour les capteurs de rendement, d'humidité et de pente.

Capteur de rendement : l'étalonnage, dit « étalonnage du zéro », consiste à l'enlèvement du « bruit sur la mesure » provoqué par les vibrations de la moissonneuse batteuse. Cette opération est réalisée lors de l'entrée dans le champ lorsque tous les « organes » sont embrayés, mais en l'absence de récolte de grain.

Capteur d'humidité : pour l'étalonner, il faut démonter le capteur, le plonger dans un échantillon de la culture à étalonner, relever la valeur affichée, emmener l'échantillon à la coopérative pour relever les valeurs d'humidité et ensuite modifier dans le terminal d'enregistrement de la machine la différence entre la valeur de la coopérative et celle relevée sur le terrain.

IV.1.3. Stockage

Tous les outils précédemment cités sont reliés à un terminal « Agropilot » (Figure IV-1), où sont stockées les données enregistrées dans une carte mémoire ayant une autonomie d'environ 9 h. Cela représente environ 25 ha de surface récoltée (Druchbert, 2002). Le chauffeur de la moissonneuse a pour consigne de vérifier la bonne réception du signal GPS, l'affichage en continu de la mesure de flux et de changer de carte mémoire avant la saturation de celle-ci.

IV.2. Traitements

La carte mémoire est le vecteur d'information entre le terrain et le laboratoire. Les informations comprises pour chaque enregistrement sont le positionnement de la machine (latitude et longitude), le flux, le numéro d'enregistrement, la vitesse, la date et le taux d'humidité (Figure IV-2). Les étapes suivantes consistent à un pré-traitement - projection, correction et étalonnage – suivi d'un traitement basé sur la méthode du « Potential Mapping » pour corriger les problèmes liés à la largeur de coupe variable (Blackmore et Marshall, 1996) et la correction du « time lag ».

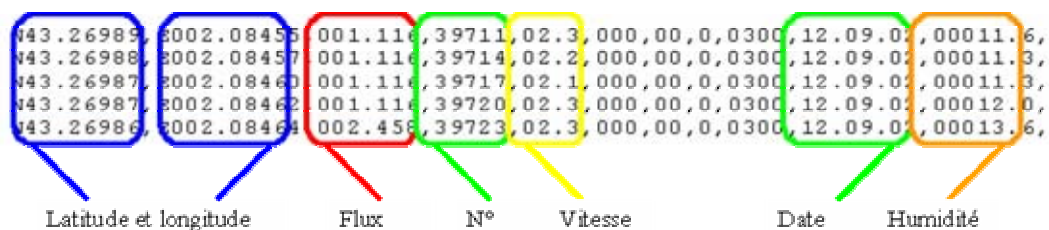


Figure IV-2- Information enregistrée dans l'Agropilot

Ces étapes, pré-traitement et "potential mapping", présentées ci-dessous, ont été implémentées au sein du laboratoire comme une nouvelle extension d'un logiciel SIG (Denux, 2004).

IV.2.1. Pré-traitements

Projection : Une projection cartographique utilise des formules mathématiques pour relier les coordonnées sphériques du globe à des coordonnées planaires plates (Melita et Kopp, 2002). Les coordonnées géographiques, enregistrées dans la carte mémoire via les données dGPS, ont donc été transformées dans la projection Lambert III, projection utilisée en France pour la zone sud continentale, permettant de minimiser les déformations.

IV.2.1.1. Temps de réponse

Le temps de réponse – « *time lag* » en anglais – représente le décalage temporel entre le moment de la coupe de l'épi, indiqué par le positionnement de l'enregistrement au dGPS, et

le temps mis par le grain pour atteindre le capteur – battage du grain et arrivée jusqu’au capteur. En fait, les mesures de débit et d’humidité faites à un instant « t » correspondent à un grain récolté au temps « $t-t_1$ », « t_1 » étant ce délai de réponse. Ce décalage est pratiquement constant pour une machine et un type de grain (Denux, 2004). En conséquence l’appréciation visuelle du nombre de points « sautés » permet une correction du temps de réponse. Cette correction, par recalage, a été utilisée par plusieurs auteurs (Blackmore et Marshall, 1996; Nolan et al., 1996; Reyners et al., 2001). Après observation des données, dans les cartes de rendement de la base de données du LTGT, le décalage est estimé à 4 -5 points, ce qui fait, avec une mesure toutes les trois secondes, de l’ordre de 12 à 15 secondes (Drucbert, 2002). Cette valeur correspond à l’ordre de grandeur de 10 à 15 secondes trouvé dans la bibliographie (Birrel et al., 1996; Reyners et al., 2001). Le temps de réponse et la correction réalisée, sont illustrés sur le zoom de la Figure IV-3.

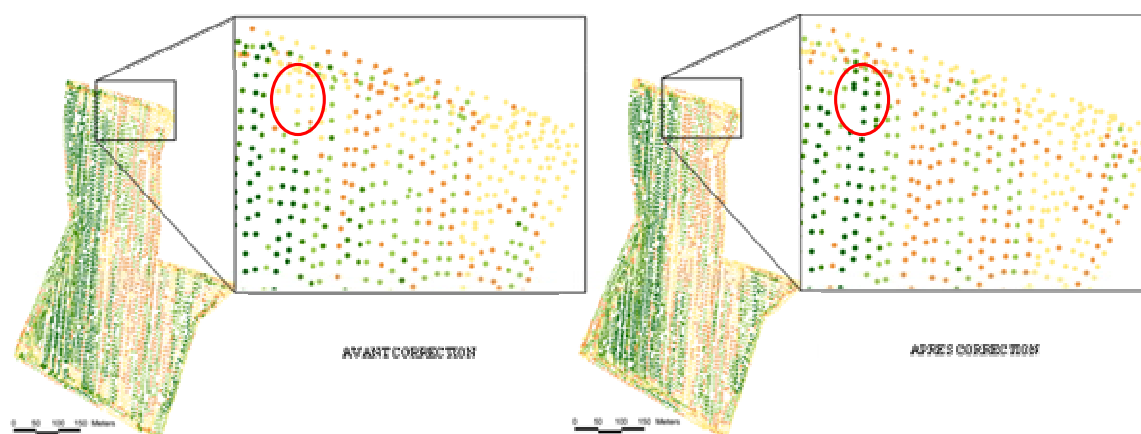


Figure IV-3 - Correction du temps de réponse : Sur la partie gauche du zoom de l’image de gauche (signalé en rouge) on peut observer un groupe de points en jaune, devenant en vert sur le zoom de l’image de droite.

IV.2.1.2. La pondération

Dans cette phase expérimentale, nous avons relevé, le plus fréquemment possible, la quantité totale de grain sortie de la parcelle (à partir des bons de livraison à la coopérative). Cette valeur permet d’introduire un coefficient de pondération dans les mesures instantanées faites par la moissonneuse-batteuse. Dans une carte de rendement, la somme des mesures individuelles est ainsi égale à la quantité totale de grain effectivement sortie du champ. Au moyen de ce coefficient, on peut faire abstraction de la plus grande partie des erreurs de mesure du capteur de rendement.

IV.2.2. « Potential Mapping »

La méthode proposée par Blackmore et Marshall en 1996 (Blackmore et Marshall, 1996) a été modifiée et adaptée au sein du laboratoire (Denux, 2004; Vazzoler, 1999; Zammit, 2000). L'objectif est de corriger les erreurs dues à l'incertitude sur la largeur de la barre de coupe utilisée. Lors de la moisson, pour une efficacité maximale de la machine, le conducteur de la moissonneuse cherche à utiliser sa barre de coupe en pleine coupe. Mais dans certaines situations (récolte couchée, obstacles, fin de bandes, etc), la totalité de la largeur de coupe n'est pas employée. Ceci fausse le calcul du rendement obtenu avec l'équation suivante (Drucbert, 2002)

$$Rdt_Brut = \left(\frac{\text{flux}}{Lc \times v} \right) dt = \frac{\text{masse}}{\text{surface}} \quad \text{où } Lc = \text{Largeur de la barre de coupe}$$

$$v = \text{Vitesse d'avancement}$$

$$dt = \text{temps entre deux enregistrements (3 s)}$$

Dans le cas où la barre de coupe serait utilisée à moitié de sa largeur, le rendement est divisé par 2 également. Avec le « Potential Mapping », la réalisation de la somme de flux mesurée sur une surface connue évite donc cette erreur. Les étapes du « potential mapping » sont les suivantes : limites de parcelles, grille d'extraction, extraction du rendement et interpolation.

IV.2.2.1. Limites de parcelles

L'obtention des limites des parcelles est réalisée automatiquement en créant une zone tampon d'un diamètre équivalent à la largeur de la barre de coupe autour de chaque point de mesure. Ensuite la dissolution de l'ensemble des polygones tampons permet d'obtenir le polygone qui détermine les limites des parcelles (Figure IV-4) (Denux, 2004)

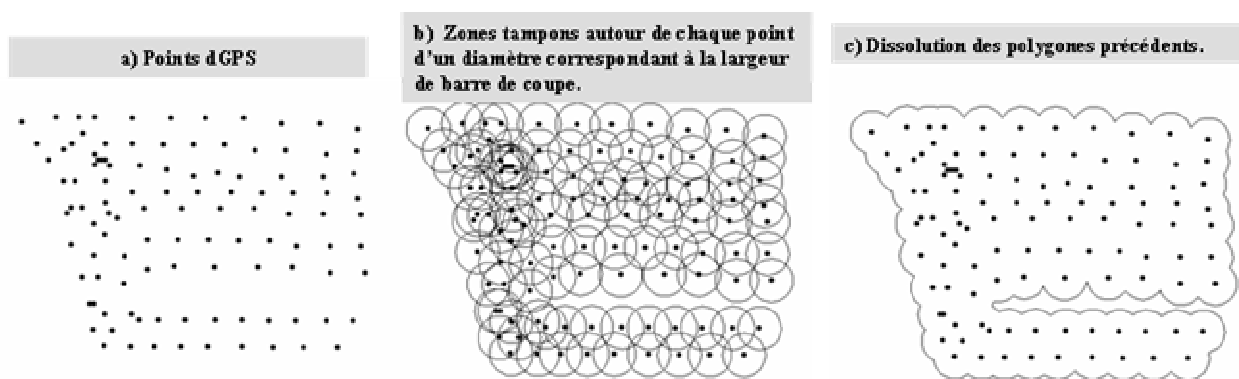


Figure IV-4 - Délimitation automatique des parcelles. (Denux, 2004)

IV.2.2.2. Grille d'extraction

La grille d'extraction, d'orientation Nord-Sud, doit être supérieure à la largeur de la barre de coupe pour éviter la création de cellules vides. La taille de la cellule a été établie à deux fois la largeur de la barre de coupe. Des orientations différentes de la grille n'ont pas montré des

modifications significatives du résultat (Ceron, 2003). Pour éviter les effets de bordure, la grille est intersectée avec la limite de la parcelle précédemment délimitée Figure IV-5.

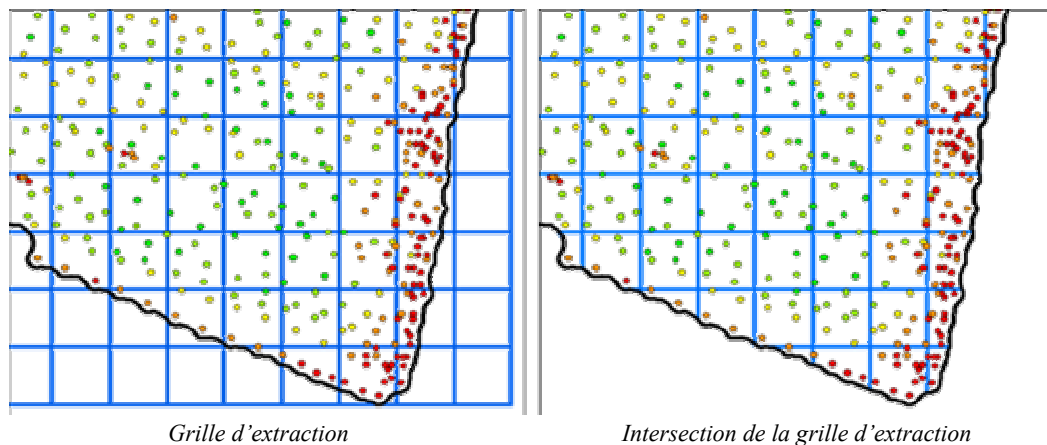


Figure IV-5 - Grille d'extraction

IV.2.2.3. Extraction du rendement

A chaque point est associé le poids de grains mesuré pendant un intervalle de trois secondes. A chaque cellule, on affecte la valeur de la somme des points présents divisée par la surface de la cellule pour obtenir une valeur de rendement, convertie ensuite en quintaux par hectare (RDT_QX dans la Figure IV-6).

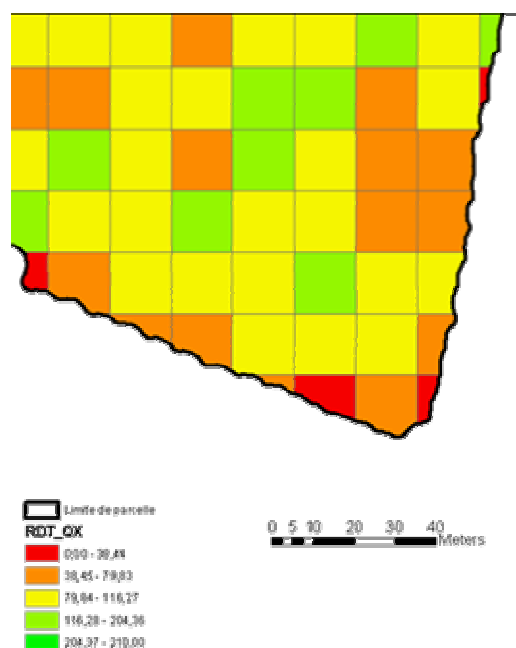


Figure IV-6 - Extraction du rendement

IV.2.2.4. Interpolation

Le résultat de l'étape précédente, la grille de valeurs, est celui qui est utilisé dans les différentes analyses de variabilité, de comparaison des rendements, etc. La dernière étape est la réalisation d'un plan d'information à 5 m de résolution, obtenu par interpolation, par

krigeage (Isaaks et Srivastava, 1989). Ce plan d'information sera principalement utilisé comme document de communication, par exemple lors des enquêtes chez les agriculteurs comme nous verrons dans les illustrations du sous-chapitre VI.1.

IV.3. Conclusion

Les processus d'acquisition et de traitement des données pour l'obtention des cartes de rendement sont une étape essentielle dans une démarche d'agriculture de précision. Néanmoins l'installation et le contrôle du matériel, le suivi des machines, la mise en place et l'amélioration de la chaîne de traitement nécessitent un investissement important en temps, en connaissance et en argent. La conception d'une seule carte de rendement, temps de déplacement pour le suivi et réalisation de la chaîne de traitement, peut être estimée à 30 minutes.

L'utilisation de la méthode du « Potential Mapping » (Blackmore et Marshall, 1996) permet d'obtenir de valeurs satisfaisantes :

- d'un point de vue spatial : l'utilisation du dGPS permet d'obtenir une précision métrique du positionnement. Ceci couplé au fait que la barre de coupe est d'environ 6 mètres et la cellule d'intégration du double, nous sommes sûrs que la distribution spatiale du rendement est correcte au sein de la parcelle.
- d'un point de vue des valeurs de rendement : la sommation des points de production enregistrés et calibrés par la quantité de grain sortie de la parcelle et pesée par la coopérative, permet d'éliminer les erreurs relatives de mesure du capteur et de transformer ensuite les valeurs de production en valeur de rendement.

Cette distribution spatiale est, après interpolation, disponible à une résolution de 5 m. Une telle finesse de résolution permet d'observer et interpréter la variabilité du rendement au sein de la parcelle.

Avec les cartes de rendement, issues de moissonneuses batteuses équipées des capteurs adaptés et d'un système de localisation précis, on dispose d'un outil d'une robustesse suffisante, permettant de mettre en évidence l'existence d'une variabilité intra parcellaire. Cette hétérogénéité de la parcelle était, au préalable essentiellement décrite par l'agriculteur, dans sa complexité (aspect qualitatif). La technologie des cartes de rendement permet de l'aborder dans sa variabilité (aspect quantitatif).

Dans cette expérimentation, nous avons eu à notre disposition jusqu'à 4 moissonneuses batteuses équipées pour produire des cartes de rendement. Toutes ces données ont été regroupées et structurées dans une base donnée que nous présentons dans le chapitre suivant.

V. La base de données : cartes de rendement

V.1. Localisation

Deux zones géographiques ont donné lieu à la cartographie du rendement : Une zone concerne le bassin agricole du GCO autour de la ville de Castelnaudary (11) et l'autre, le bassin versant du Touch (31), zone de recherche du LTGT, située au Sud-ouest de Toulouse.

V.1.1. Bassin Agricole du GCO en agriculture de précision

D'une surface d'environ 320 km², ce bassin agricole d'action du GCI est divisé suivant limites communales, se situe dans le département de l'Aude, en région Languedoc Roussillon, à la limite avec la région de Midi-Pyrénées (Figure V-1). Il est divisé en deux grandes zones : la zone de plaine, zone dite « du Sillon », et la zone dite de « la Piège » beaucoup plus accidentée. Ces deux zones présentent des caractéristiques pédologiques différentes (Ensam, 2002). La Piège se caractérise par des paysages en collines assez massives avec des replats. Les collines, versants de pentes moyennes à fortes, sont le domaine des sols peu profonds, voire superficiels, avec des affleurements rocheux localisés. Au contraire, les micro vallées et les re-creusements, souvent recouverts par des apports colluviaux ou alluvio-colluviaux, disposent de sols plus profonds. Pour « le Sillon » – partie en jaune (faibles altitudes) de la (Figure V-1) - deux zones sont différenciables d'un point de vue géomorphologique : (1) la zone entre la Montagne Noire et le Lauragais de Castelnaudary et (2) la terrasse et le cône d'alluvions anciennes. Ils correspondent à des sols irrégulièrement caillouteux, recouverts par des formations plus fines et plus récentes alluvio-colluviales et/ou éoliennes, d'épaisseur variable.

La pluviométrie, avec des valeurs annuelles autour de 800 mm, présente des valeurs extrêmes entre 700 mm et 900 mm. La température moyenne annuelle est de 13.2°C (Cemagref, 1988).

Au sein de ce bassin agricole, les parcelles cartographiées se trouvent sur l'ensemble des deux zones comme indiqué sur la Figure V-1 (avec les parcelles cartographiées en gris).

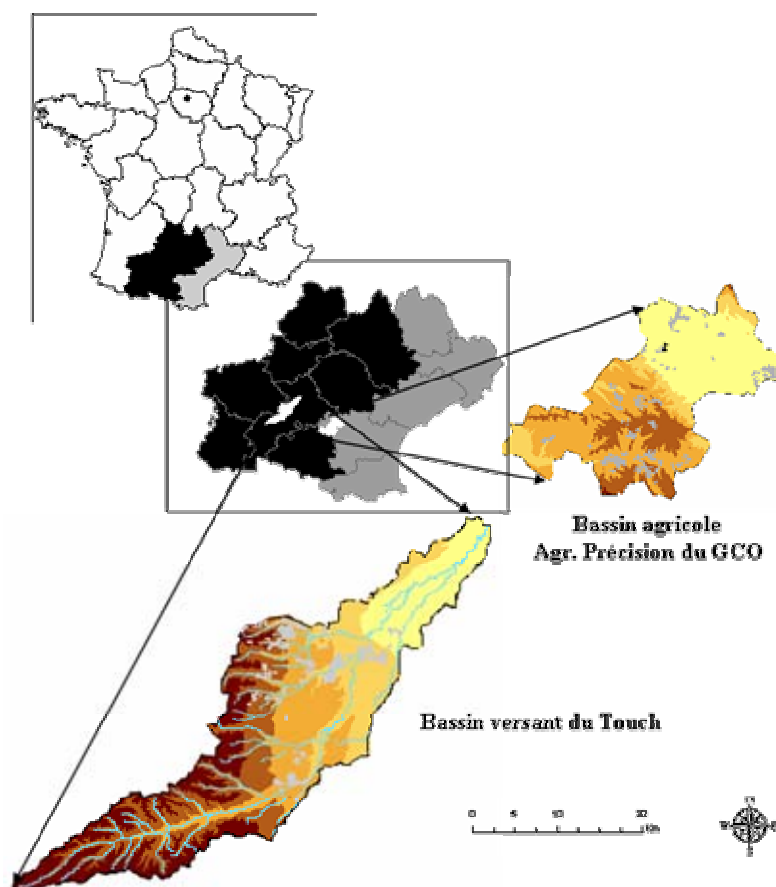


Figure V-1 - Localisation du bassin agricole en agriculture de précision du GCO (Aude) et du bassin versant du Touch (Haute-Garonne).

V.1.2. Bassin Versant du Touch

D'une surface de plus de 500 km², le bassin versant a son exutoire à Toulouse et remonte en direction Nord-est – Sud-ouest. Il se caractérise par sa géomorphologie en terrasses (cf. sous-chapitre VII.1.1). Dans le cadre du projet de recherche en agriculture de précision, nous nous sommes principalement intéressés à une ligne qui traverse les terrasses d'Est en Ouest (avec les parcelles cartographiées en gris sur la Figure V-1).

Le climat, de type aquitain continental, se caractérise par des hivers doux auxquels succèdent des étés chauds et secs. La pluviométrie moyenne est de l'ordre de 750 mm mais avec une répartition déséquilibrée tout au long de l'année (Gay et Denux, 2000; Guiresse, 1989) : un excédent l'hiver et un déficit hydrique important l'été. La sécheresse estivale est accentuée par l'influence du vent d'Auran.

Les parcelles cartographiées au sein du bassin versant du Touch se trouvent principalement sur la partie Nord du bassin versant du Touch et dans les terrasses les moins accidentées, comme on peut le voir sur la Figure V-1 où figurent les parcelles cartographiées (en gris).

V.2. Données disponibles et récoltées

« Toute science doit définir ses concepts, puis en tester l’extensivité, ces concepts ayant initialement été définis dans un contexte particulier » (Milleville, 1972). Avant de présenter les données concernant les parcelles cartographiées avec les cartes de rendement, nous devons définir les concepts de parcelle dans le cadre de la cartographie du rendement.

La parcelle est définie comme la portion de terrain de même culture constituant l’unité cadastrale. Ou sans faire référence aux éléments administratifs, la parcelle est une pièce de terre d’un seul tenant portant, au cours d’un cycle cultural donné, la même culture ou la même association de cultures, et gérée par un seul individu ou par un groupe déterminé d’individus (Milleville, 1972). Pour nous, la première définition rejoint le terme de parcelle cadastrale et le deuxième rejoint le terme de parcelle agricole ou culturale. Dans le contexte de la cartographie de rendement, nous allons rajouter la parcelle cartographiée, qui peut être définie comme la surface d’une parcelle agricole, cartographiée une année donnée. Pour illustrer ces trois définitions nous utilisons la Figure V-2 où les trois types de parcelles sont illustrés. Sur cette figure, on observe une parcelle agricole, la parcelle de Terreblanche, qui correspond à trois parcelles cartographiées pour le rendement, trois années différentes.

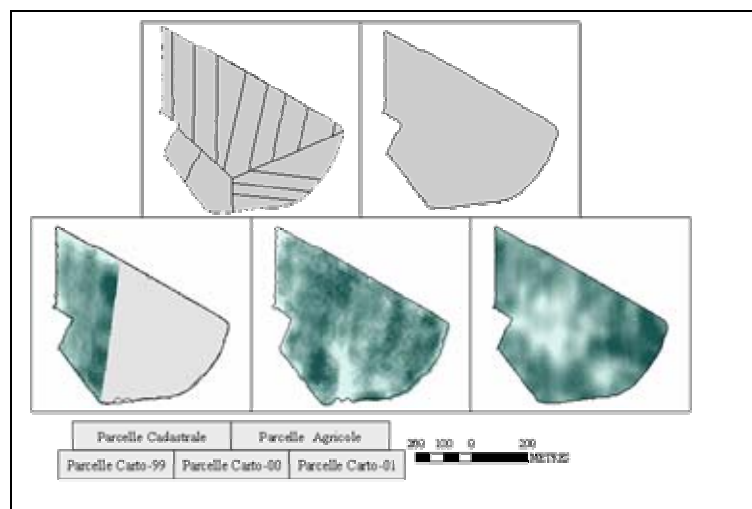


Figure V-2 - Parcelles: Cadastrale, Agricole et Cartographiée

Compte tenu de cela le nombre de cartes de rendement de la base de données fait allusion aux parcelles cartographiées et pas forcément à la parcelle agricole entière. La moyenne de la taille des parcelles cartographiées est donc souvent plus petite que celle des parcelles culturales.

Concernant les deux sites, Castelnaudary et Toulouse, nous avons estimé qu’environ 30 % des données acquises sur le terrain (cartographie des rendements) doivent être rejetées. Ce

rejet est dû à l'absence de données sur la presque totalité de la parcelle, à un mauvais positionnement, etc. Malgré ce rejet d'une partie des parcelles cartographiées, nous disposons de plus de 300 parcelles sur 4 ans de récolte pour chacun de deux sites. Pour Castelnau-dary, le nombre de parcelles, entre la récolte de 2000 et de 2003, est de 336 parcelles représentant une surface de 1 330 ha. Sur le bassin versant du Touch, entre 1999 et 2002, il y a eu 319 parcelles cartographiées représentant une surface de 2 134 ha.

La Figure V-3 montre cette différence de **surface** par année et par culture. La barre « type histogramme » montre le nombre de parcelles et la ligne avec un point montre l'étendue de la mesure, avec le maximum, le minimum et la moyenne représenté par point. En moyenne, pour l'ensemble des cultures, les parcelles de Toulouse présentent une surface voisine de 7 ha, contre une surface inférieure à 4 ha à Castelnau-dary. Les parcelles qui provoquent la différence de surface entre les parcelles de Toulouse et de Castelnau-dary sont celles en maïs et en tournesol de la zone de Toulouse. Elles se trouvent principalement dans la basse et moyenne terrasse couvrant des surfaces moyennes de 15 ha. Sur Castelnau-dary, cette faible surface est due, d'une part à une faible surface des parcelles cartographiées et non des parcelles culturales, et d'autre part à un nombre de parcelles cartographiées plus élevé dans la zone de la Piège, où le relief accidenté induit des parcelles plus petites que dans la zone du sillon (209 parcelles face à 127 parcelles).

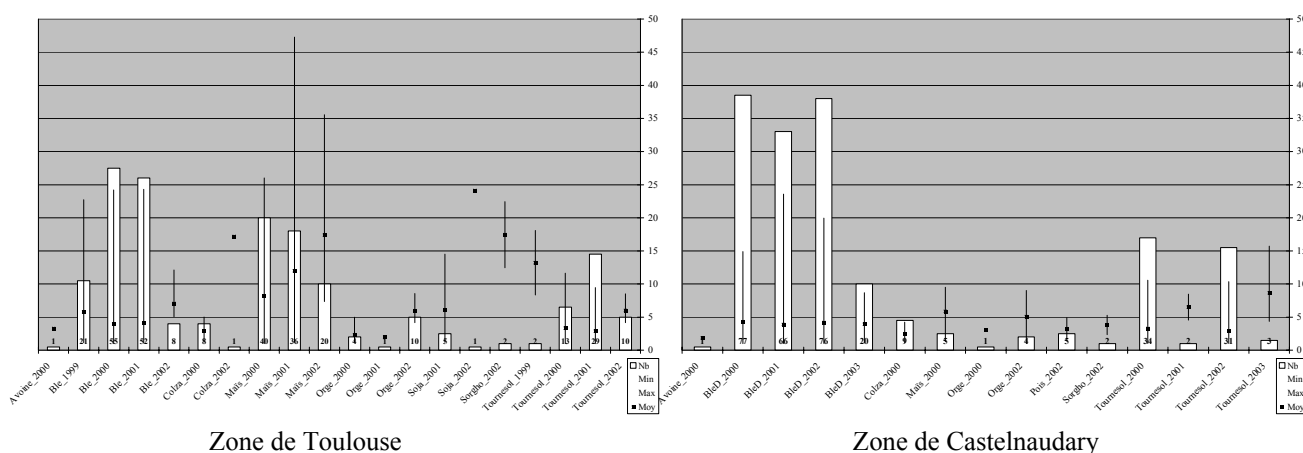


Figure V-3 - Surface (ha) par culture et par année pour les deux zones d'étude

En ce qui concerne la statistique du rendement, deux variables sont présentées : le rendement moyen des parcelles et la variabilité intra parcellaire du rendement.

Le **rendement moyen** des parcelles permet une comparaison inter parcellaire et inter-culture de la valeur du rendement. D'une façon globale, nous avons observé que le rendement est de l'ordre de 100 qx/ha pour le maïs, de 50 qx/ha pour le blé et de 20 qx/ha pour le tournesol (Figure V-4). A partir de ce rendement moyen, le calcul du coefficient de variation par

culture (CV= mesure de la dispersion relative correspondant au rapport de l'écart-type à la moyenne, en pourcentage) permet de comparer la variabilité du rendement inter-culture. Pour notre base de données, le blé et le tournesol présentent une variabilité autour de 30 %, et le maïs une plus faible variabilité, autour de 21 %.

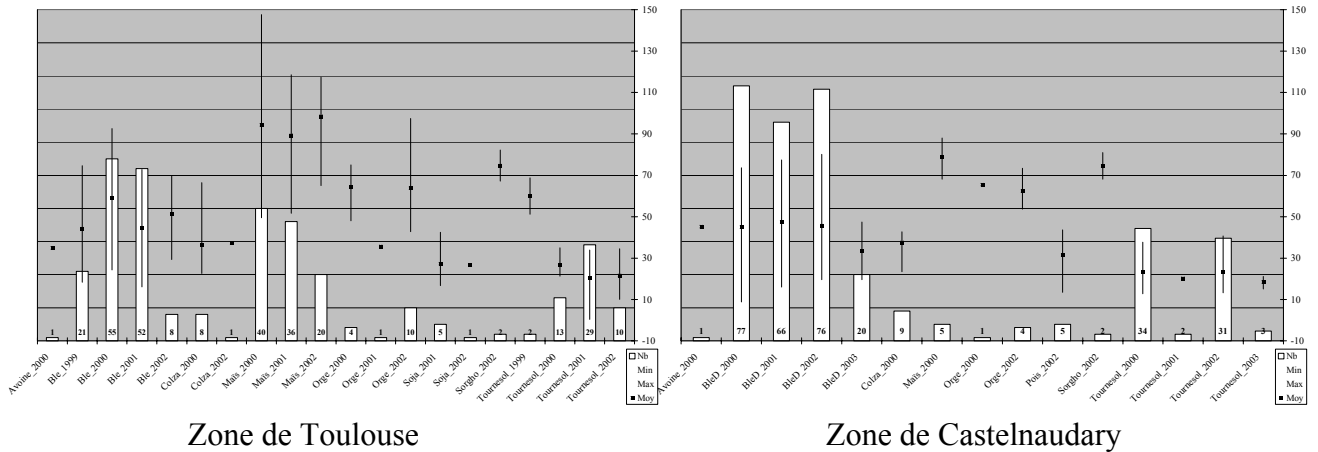


Figure V-4 - Rendement (qx) par culture et par année pour les deux zones d'étude

Mais, dans un contexte d'agriculture de précision, il est plus intéressant d'étudier la variabilité intra parcellaire du rendement au lieu de la variabilité inter parcellaire. Pour étudier cette **variabilité intra parcellaire**, nous avons besoin d'un descripteur de la variabilité. Le choix entre un descripteur spatial (issu du variogramme) et un descripteur classique, comme le coefficient de variation (CV) intra parcellaire, nous oriente dans un premier temps vers le premier. Pour cela et malgré notre choix de modéliser le moins possible le variogramme, nous avons cherché à automatiser l'ajustement du variogramme (Annexe I. Cartes de rendements : ajustement des variogrammes et analyses).

Lors de l'ajustement automatique, 6 modèles sont proposés. La qualité de l'ajustement de chacun des modèles est quantifiable. Donc les modèles sont inter comparables. Néanmoins, la qualité absolue de l'ajustement de la parcelle n'est pas évaluée. En conséquence, pour un certain nombre de parcelles, le meilleur modèle ajusté est insensé (il présente de valeurs de pallier et de portée aberrants : Annexe I) ; son utilisation dans un test statistique fausse les résultats. Face à cette contrainte scientifique et technique, nous avons décidé de nous orienter vers l'utilisation du coefficient de variation (CV).

Celui-ci est calculé par parcelle pour une même culture et pour une même année, a déjà été utilisé dans d'autres études récentes de la variabilité intra parcellaire, inter culture et inter années (Joernsgaard et Halmoe, 2003). Pour chaque parcelle, la valeur moyenne du rendement, son écart type, et le coefficient de variation sont calculés. Puis, pour toutes les unités expérimentales (même lieu, même espèce et même année), la moyenne de ces coefficients de variation est calculée. Le tableau suivant reprend les différentes valeurs et la

Figure V-5 montre la variation de ce CV pour les deux zones, par groupe de cultures et d'années.

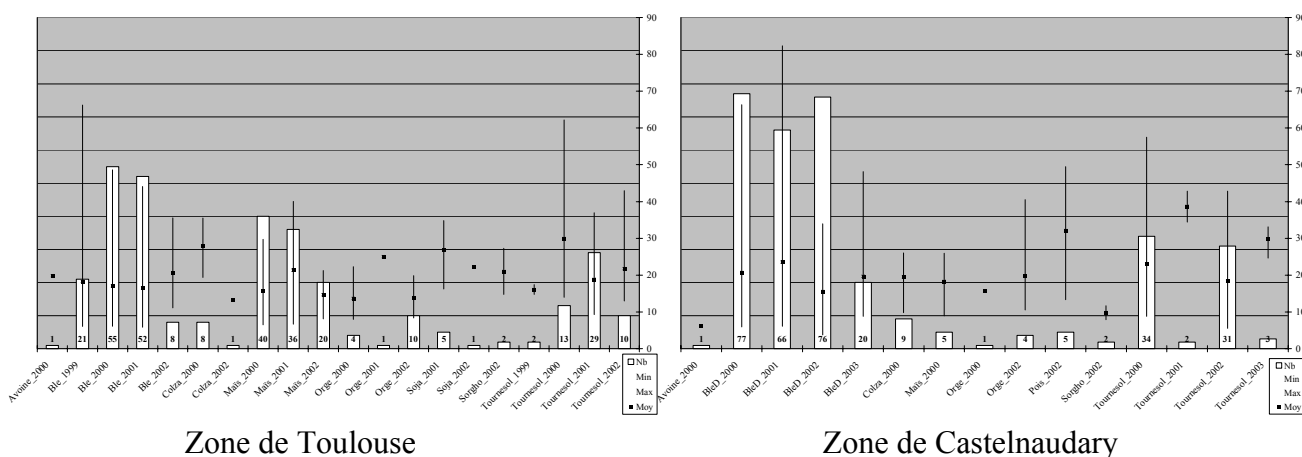


Figure V-5 - Coefficient de variation (%) intra parcellaire du rendement par culture et par année pour les deux zones d'étude

La statistique issue de ce tableau montre que globalement le Tournesol est la culture qui présente la variabilité intra parcellaire la plus élevée, suivie par le blé et le maïs. Le tournesol est une culture d'été, à cycle court. Il est très sensible aux incidences climatiques (pluviométrie et température) au moment du semis et de la floraison. Pour le maïs, l'usage de l'irrigation peut expliquer la plus faible variabilité intra parcellaire qui est observée. Cette irrigation va effacer le stress hydrique et donc provoquer une diminution de la variabilité du comportement de la culture dans la parcelle.

V.3. Analyse de la base de données

La base de données de cartes de rendement du projet de recherche en agriculture de précision du LTGT remonte à 1999. Elle comprend plus de 650 parcelles cartographiées, pour plus de 3 400 ha et près de 40 agriculteurs. Cela représente une des plus grandes bases de données de cartes de rendement en France. On peut envisager deux aspects pour les données présentes dans cette base de données : la fiabilité des données et la représentation statistique de l'échantillon des parcelles.

V.3.1. Mode d'utilisation des données

Lors de la conception des cartes de rendement, un certain nombre d'erreurs a été rencontré, dues à une absence d'étalonnage, une mauvaise réception des signaux du dGPS, un colmatage des capteurs d'humidité et de rendement par de la terre ou des résidus végétaux, le dysfonctionnement de capteur de position de la barre de coupe, etc. Tous ces problèmes provoquent des erreurs sur la valeur du rendement final.

Pour le suivi d'une seule **parcelle**, voire d'une exploitation, il est possible d'éviter ces erreurs et d'obtenir ainsi une bonne précision des valeurs du rendement ; le suivi de la moissonneuse batteuse avec des étalonnages réguliers, la prise des poids benne à la coopérative et leur suivi pour la corrélation, la vérification du signal dGPS, etc peuvent être faits régulièrement. En revanche, lorsque l'on s'intéresse à la cartographie d'un **grand nombre de parcelles**, comme c'est le cas ici, il n'est plus possible de corriger et de faire attention à tous ces problèmes par manque de personnel. Dans notre contexte, deux personnes à temps complet pour faire un suivi continu des 4 moissonneuses batteuse seraient nécessaires. Cette situation n'est pas envisageable du point de vue économique. En conséquence, les cartes de rendement présentent donc un manque de fiabilité de ces valeurs. Aussi il est nécessaire d'établir un compromis entre **représentativité spatiale**, associée au nombre de parcelles cartographiées, et **exactitude** dans la valeur du rendement. Prenons les termes d'exactitude et précision et l'exemple du joueur de fléchettes classiquement utilisé pour distinguer ces deux termes (Merour, 2001) :

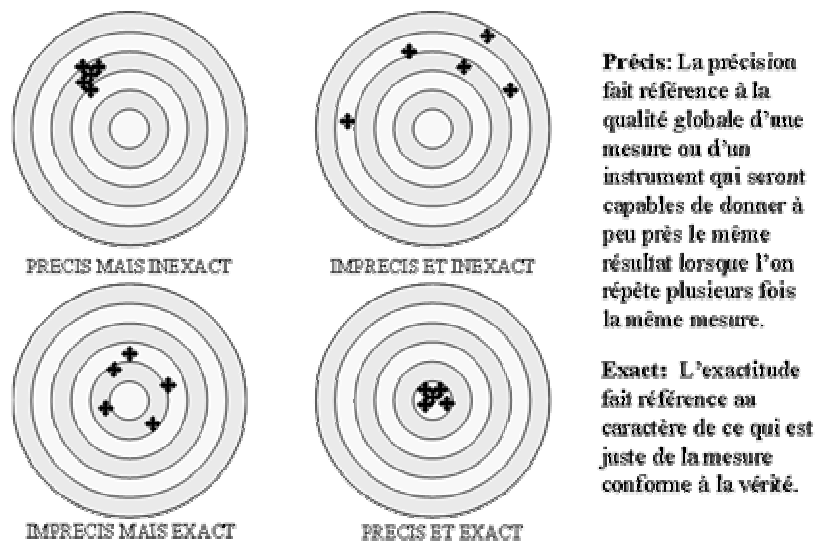


Figure V-6 - Précision et Exactitude (D'après Merour, 2001)

Nous pouvons considérer que **la base de données est précise et exacte d'un point de vue spatial. Mais d'un point de vue des valeurs de rendement, elle est précise mais inexacte.** En conséquence les distributions spatiales montrées par les cartes de rendement disponibles sont adéquates pour l'étude de la distribution spatiale du rendement (du pattern) plus que pour l'étude de la variabilité, il s'agit de travailler en terme relatif et non absolu.

V.3.2. Valeur statistique de l'échantillon

La modalité d'acquisition des cartes de rendement (moissonneuses batteuses appartenant à des entrepreneurs de travaux agricoles) ne permet de disposer d'un échantillon

statistiquement représentatif des parcelles agricoles cultivées sur les deux bassins d'action (le Touch et Castelnau-dary).

Mais là encore, nous devons faire la différence entre la valeur moyenne du rendement des cultures, issue des parcelles cartographiées qui n'a pas de réelle signification statistique (caractérisation de la variabilité inter parcellaire) et la mesure de la variabilité intra parcellaire. Pour cette dernière, le nombre important de parcelles cartographiées permet de disposer d'un grand nombre de situations différentes ; on couvre alors un large spectre de situations pour la recherche d'éléments de causalité.

La difficulté majeure de cette base de données réside dans un nombre insuffisant de répétition pour les parcelles cartographiées dans les combinaisons année, culture et lieu. La dispersion géographique des parcelles, les contraintes de l'assolement et de la rotation, le nombre de machines des entrepreneurs (équipées et non équipées pour l'enregistrement des rendements), n'ont pas permis d'obtenir un nombre suffisant de répétitions de situations comparables. « Malgré les 1400 ha de cartes de rendement réalisées les 3 années, seuls 34 ha ont été couverts les trois années » (Cabrol, 2002). Pour cette surface, on compte 17 parcelles, soit une moyenne de 2 ha

On verra dans le chapitre suivant que cette contrainte est forte pour une analyse complète des données. C'est aussi la rançon d'un travail de recherche issu de la demande d'une coopérative agricole.

V.4. Conclusion

La carte de rendement est l'outil le plus économique à la portée de l'agriculteur pour mettre en évidence une variabilité intra parcellaire. Elle est donc un outil précieux dans la première étape de l'agriculture de précision : l'observation, intégrée dans une démarche d'étude de l'hétérogénéité structurelle.

Distribution spatiale

La démarche qui consiste à s'intéresser à une grande étendue pour pouvoir disposer d'un grand nombre de parcelles cartographiées, sur différents lieux, années, cultures et agriculteurs, a été la source d'un problème de fiabilité dans la valeur du rendement et de l'échantillon d'unités expérimentales. Mais, comme nous avons conclu dans le chapitre précédent, une mauvaise cartographie des valeurs du rendement n'implique pas une mauvaise distribution spatiale de celui-là. Il est donc possible de s'intéresser aux **cartes de**

rendement comme source d'information de la variabilité spatiale du rendement (du pattern) et non de sa valeur.

Variabilité

Logiquement, et malgré les erreurs existantes dans la valeur moyenne du rendement, il existe une variabilité de la valeur moyenne du rendement entre espèce, année et lieu de l'ordre de 40 %. Mais l'avantage des cartes de rendement est de pouvoir mettre en évidence la variabilité intra parcellaire. Cette variabilité, appréhendée ici par le coefficient de variation, a permis d'observer **une variabilité intra parcellaire inter culture de l'ordre de 10 % à 20 %**.

La variabilité intra parcellaire du rendement et sa distribution spatiale au sein de la parcelle sont le résultat final d'un processus complexe, la production d'une culture. Celle-ci dépend d'au moins quatre familles d'éléments de causalité (l'espèce et la variété cultivée, le sol, le climat et l'itinéraire technique développé par l'agriculteur). La variabilité du rendement caractérise alors une hétérogénéité fonctionnelle, en référence au processus de production, dont il convient d'approcher les éléments de causalité.

Dans cette démarche de recherche appliquée, c'est auprès de l'agriculteur, en charge de la conduite de la culture, que nous avons cherché d'abord les éléments de compréhension de ces variations.

VI. Interprétation des cartes de rendement

La carte de rendement peut être aussi définie comme le fruit des interactions dans l'espace et dans le temps de 4 facteurs : l'espèce cultivée, le sol, le climat et les pratiques culturales. Sa richesse réside donc dans son interprétation. L'interprétation des cartes de rendement a ainsi été l'objectif d'un grand nombre de publications basées sur des analyses de corrélation du rendement avec des facteurs du sol et de la plante (Mallarino et al., 1999), par le suivi du développement de la plante par télédétection (Roel et al., 2000) ou d'autres techniques (Blackmore, 2000; Broos et al., 1999; Lark et Stafford, 1997). Mais cette mesure intéresse particulièrement l'agriculteur, acteur principal de la mise en place de la culture, des observations et des éventuelles modulations. C'est l'agriculteur qui, à partir de ses connaissances du milieu, de l'historique de la parcelle, des problèmes ponctuels – au moment de l'irrigation, des apports azotés, du semis – peut expliquer la variabilité observée sur les cartes de rendement. Dans ce chapitre, nous cherchons à illustrer les sources de variabilité des cartes de rendement à partir des connaissances des agriculteurs, recueillies lors des enquêtes réalisées sur le terrain. C'est un travail qualitatif. La quantification de ce travail est réalisée dans les derniers sous-chapitres, elle consiste à la délimitation des zones intra parcellaires. Une technique de délimitation et une réflexion sur l'utilisation des cartes de rendement pour établir ces limites est proposée à la fin de ce chapitre.

VI.1. Enquêtes auprès des agriculteurs¹

Cette phase s'est réalisée principalement au cours de l'été 2002 pour les deux zones, Castelnaudary et Toulouse. Les agriculteurs auprès desquelles les enquêtes ont été réalisées correspondent aux agricultures disposant des parcelles cartographiées et donc moissonnées par les entrepreneurs équipées. Dans le contexte général des objectifs de la thèse, ces enquêtes vont permettre de répondre à la demande de l'agriculteur pour connaître et comprendre la variabilité intra parcellaire du rendement de leurs parcelles. C'est aussi le moyen de vérifier ou refuser l'hypothèse selon laquelle le facteur principal de variabilité intra parcellaire est le sol. Les étapes de ce travail sont les suivantes :

1. Obtenir le maximum d'informations sur la parcelle : itinéraires culturaux, analyse des sols, plans d'irrigation, données climatologiques, etc. ;
2. Présenter le résultat des cartes de rendement, pour ainsi faire participer et motiver l'agriculteur dans la démarche ;

¹ Travail réalisé avec Etienne Voisin à Toulouse et Fabien Cabrol à Castelnaudary

3. Essayer de comprendre avec l'agriculteur les variations observées du rendement.

Concernant l'information du point 1, nous avons établi un questionnaire spécifique. Ce questionnaire (Annexe II. Exemple d'enquête réalisée) est divisé en 5 parties : 1) Généralités, 2) Plante, 3) Pratiques culturales, 4) Sol et 5) Notes. Il permet d'aborder et recueillir l'ensemble des pratiques et informations (spatiales non) relatives à la parcelle et qui peuvent ultérieurement être utilisées pour répondre aux deux autres objectifs (lors de la compréhension de processus) ou dans d'autres projets de recherche (pour la paramétrisation des modèles de simulation de cultures). Les deux autres objectifs ont permis, de comprendre quelques origines de la variabilité observée.

Cependant, il ne peut être question de présenter ici l'ensemble des cartes avec les explications des observations obtenues pendant ces enquêtes. Il est intéressant d'un point de vue agronomique de synthétiser par une présentation et des illustrations, les principales sources de variation du rendement remarquées par les agriculteurs. Ces sources de variations au sein des parcelles ont été divisées, selon leur origine, en deux groupes : pédoclimatiques et anthropiques.

VI.1.1. Origines pédoclimatiques

Les principaux facteurs qui ressortent de l'étude d'interprétation et analyse des cartes de rendement ayant une origine pédoclimatique sont le sol et la topo et/ou microtopographie de la parcelle. Ces facteurs sont liés entre eux. En effet les parties concaves et convexes d'une pente vont, dans certains cas, présenter différents types de sols. Ces changements de sols ne vont pas être forcément relié à un plus fort ou plus faible rendement, parce que les comportements peuvent être différents selon la culture et l'année climatique. Ainsi, une zone concave d'accumulation d'eau, dans une parcelle cultivée en blé peut avoir des conséquences catastrophiques sur cette culture une année très humide – étant donné la sensibilité du blé à l'anoxie - et des conséquences très intéressantes une année sèche. A l'opposé, la même zone hydromorphe du sol cultivé en maïs présenterait moins de « risques » à cause de la moindre sensibilité du maïs à l'engorgement.

Dans la zone de Castelnaudary, où le relief est plus accidenté, les parties concaves des parcelles sont des lieux d'accumulation. Le sol y est plus riche et plus profond. En revanche, les parties convexes, le sommet de buttes, sont des lieux d'érosion. Le sol y est moins profond et moins riche (Cabrol, 2002; Ensam, 2002). Dans la zone de Toulouse, comme

nous verrons plus en détail dans le chapitre VII.1 concernant les aspects bibliographiques des sols, la microtopographie de la parcelle peut avoir une influence sur le type de faciès argileux développé donnant ainsi lieu à des planchers imperméables à des profondeurs de 50 – 60 cm qui ont une influence sur le développement des cultures. Pour illustrer ces propos et d'autres, nous commenterons une série de cartes de rendement :

VI.1.1.1. Effet de la pente

La Figure VI-1 montre une carte de rendement, associée à une photographie de la parcelle. La zone sud de la parcelle est un peu en pente avec des sols plus clairs ; la rupture de pente délimitant la zone de vallée et de versant est indiquée par une ligne continue. Comme nous pouvons l'observer sur la carte, la différence de rendement entre les deux parties est significative.

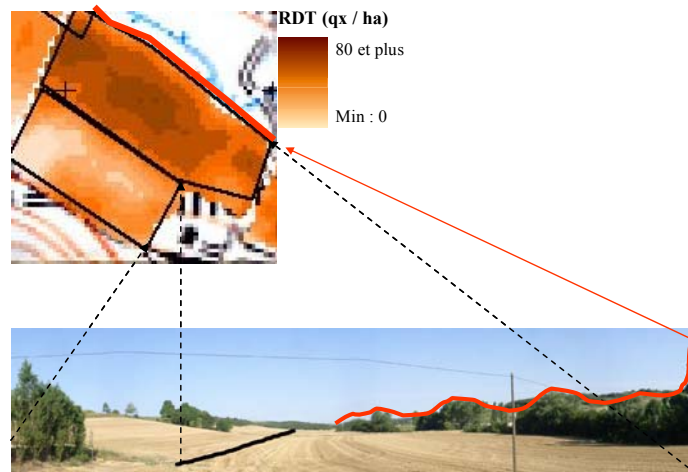


Figure VI-1 – Effet de la pente et photographie associée

Le même effet de pente est observé sur la Figure VI-2. Nous montrons à gauche les courbes de niveau et à droite la carte de rendement ; la ligne dessinée en rouge marque le changement de pente, qui est aussi le changement de rendement. Ce changement de pente est aussi associé à un changement de sol, moins riche en nutriments ou en capacité en eau.

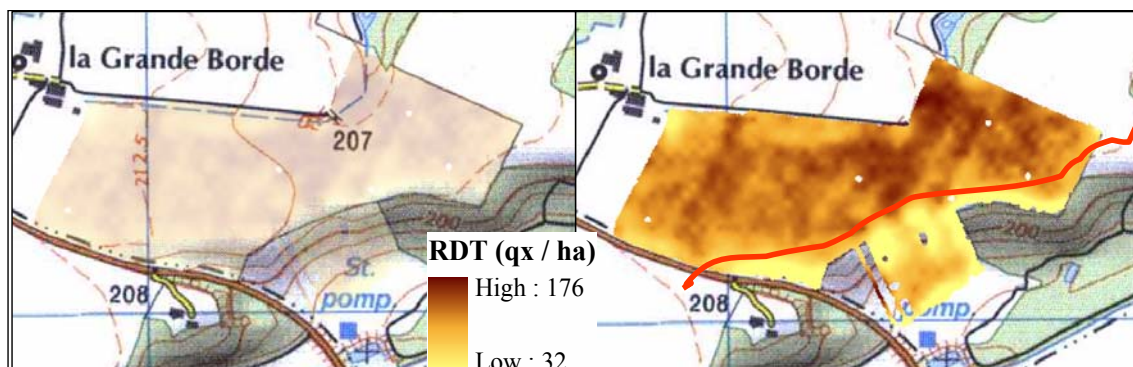


Figure VI-2 - Effet de la pente: courbe de niveau, à gauche, et rendement, à droite.

VI.1.1.2. Effet du sol

Il est difficile de différencier dans le cas précédent (changement de pente) les effets liés au sol. Il est aussi difficile de distinguer les effets du sol de ceux qui proviennent l'histoire de la parcelle – ancien talus – ayant provoqué un changement de sol au sein de la parcelle. Ces effets historiques seront présentés comme facteurs anthropiques. Parmi les effets du sol, la profondeur du sol est une importante source de variabilité du rendement. Dans l'exemple de la Figure VI-3, il y a une forte variabilité du rendement due aux changements de profondeur du sol, le cas extrême étant l'affleurement de la roche mère – indiqué par un cercle - et son impact observable sur le rendement.

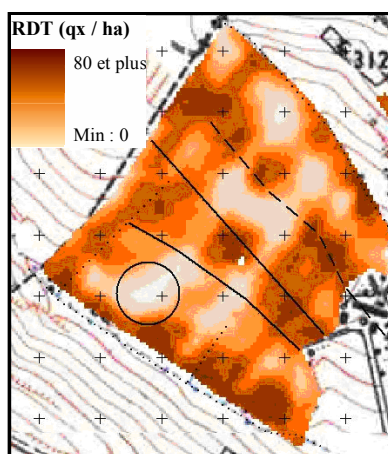


Figure VI-3 - Effet direct du sol. Le cercle de la figure indique la position de l'affleurement de la roche mère.

VI.1.1.3. Effet du voisinage

Arbres : Sur la partie nord de la parcelle de la Figure VI-1, une série d'arbres délimitent la parcelle – ligne en rouge. Sur la carte de rendement, on observe que le rendement y est plus faible. On retrouve l'effet des arbres, dans les Figure VI-4. Deux zones ont été délimitées : la zone circulaire représente le rendement autour d'un arbre et l'autre montre l'effet de bordure boisée. Dans les deux cas, le rendement est plus faible. Ces effets, sur les cartes de rendement, provoqués par la présence des arbres peuvent être dus à deux raisons, soit une compétition pour différentes sources (eau, nutriments), soit par un changement microclimatique (zones d'ombre, moins de précipitations, etc.).

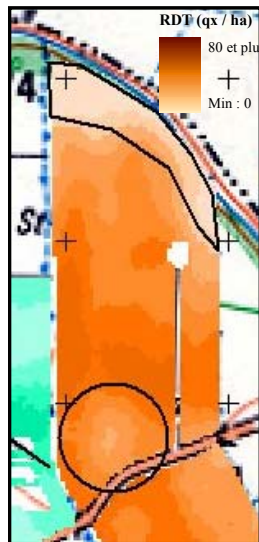


Figure VI-4 - Effet autour d'un arbre : zones avec un plus faible rendement

Rivière : Dans la Figure VI-5, nous avons une parcelle délimitée par la rivière du Touch dans son extrémité Sud et Est. Lors de grands événements pluvieux, une partie de la parcelle s'est retrouvée sous l'eau. Cette inondation a provoqué des pertes de rendement visibles sur la carte.

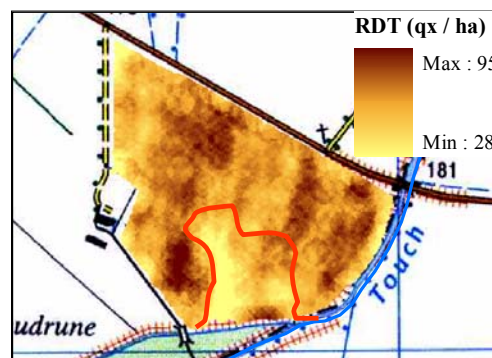


Figure VI-5 - Effet des inondations, proximité à la rivière : rendement plus faible dans la zone inondée indiquée en rouge.

VI.1.2. Origines anthropiques

Les actions de l'homme peuvent être aussi divisées en deux groupes selon leurs origines temporelles. Ainsi il peut y avoir des actions de l'homme considérées comme historiques – remembrement, drainage – qui ont introduit une variabilité intra parcellaire, et des actions plus récentes – précédents culturels, labour, etc. - qui provoquent des différences intra parcellaires.

VI.1.2.1. Origines historiques

Le cercle dans la parcelle Figure VI-6 montre l'emplacement d'un ancien talus, devenu maintenant une zone à forte concentration de cailloux ; dans cette zone le rendement a été plus élevé que sur le reste de la parcelle.

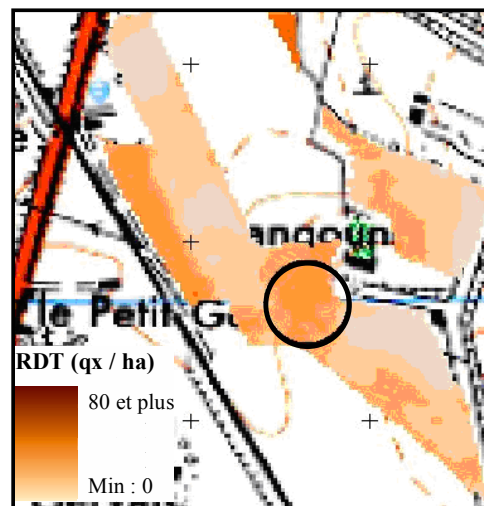


Figure VI-6 - Effet d'un ancien talus (cercle) : rendement plus élevé.

L'occupation du sol peut avoir aussi un impact sur le rendement. Le trapézoïde de la Figure VI-7 délimite la localisation d'une ancienne vigne, et son actuel impact sur le rendement. Cet impact sur le rendement est aussi illustré sur la parcelle de droite de la Figure VI-7 où le trapézoïde délimite la localisation d'un ancien bois.

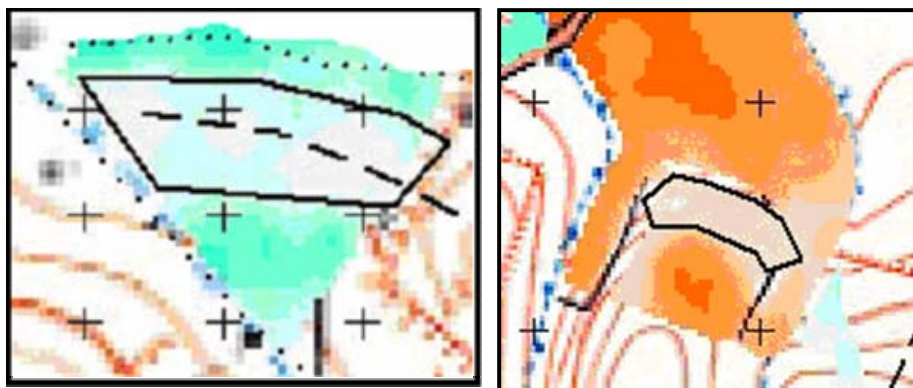


Figure VI-7 - Effet d'une ancienne vigne et un ancien bois : diminution du rendement

VI.1.2.2. Modifications récentes

La notion de modifications récentes est associée à celle d'itinéraire technique. La Figure VI-8 illustre l'effet d'un mauvais désherbage dans la zone des deux ronds présentant un faible rendement. D'autres causes ont été observées sur des zones labourées face à des zones non labourées, des variétés de blé différentes dans la même parcelle, etc.

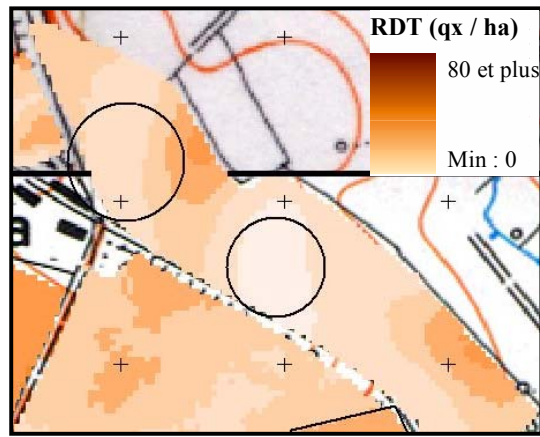


Figure VI-8 - Effet d'un mauvais désherbage : zones de faibles rendement (cercles) indiquées par l'agriculteur

Les bandes Nord Sud avec différentes valeurs de rendement dans la parcelle de la Figure VI-9 correspondent au mauvais fonctionnement du drainage pour cette parcelle : «les drains doivent être bouchés».

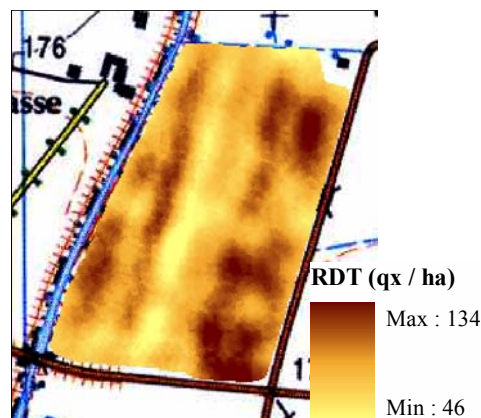


Figure VI-9 - Effet provoqué par un dysfonctionnement du système de drainage : lignes verticales de plus forte ou faible valeurs de rendement.

Un facteur récent souvent retrouvé et très significatif est le précédent cultural. Généralement les blés cultivés sur un précédent différent d'une céréale à paille ont un meilleur rendement. Le maximum de différence est atteint pour un blé après une légumineuse, grâce à leur effet bénéfique sur le rapport C/N du sol. La Figure VI-10 montre une parcelle avec deux précédents différents : à gauche de la ligne rouge, il y a eu un précédent tournesol et à droite un précédent colza. Le rendement est significativement plus élevé sur le précédent tournesol que sur le précédent colza.

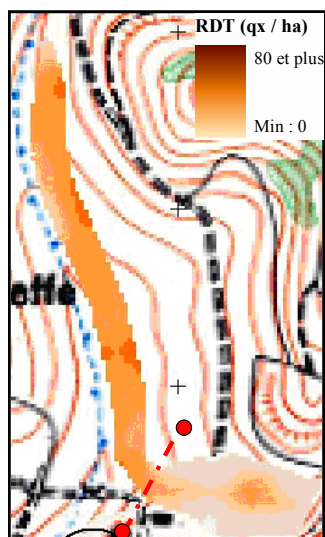


Figure VI-10 - Effet du précédent cultural. La ligne rouge entre les deux points rouge délimite le précédent culturale : à gauche du tournesol et à droite du colza.

Une autre différence est celle de la source de l'apport azoté. Ainsi la Figure VI-11 montre l'effet d'un apport de fumier comparé à un apport de lisier.

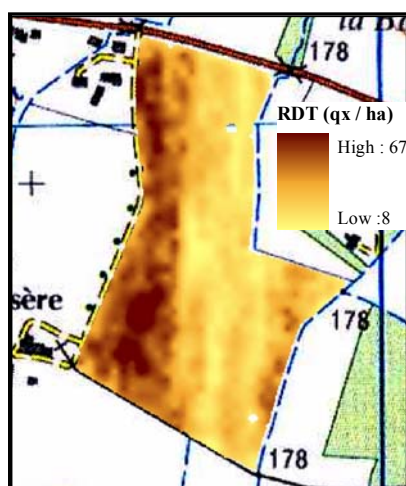


Figure VI-11 - Effet du type d'apport azoté. La différenciation du rendement entre la partie gauche et droite de la parcelle est due à un apport de fumier sur l'une et de lisier sur l'autre.

VI.1.3. Conclusion

La carte de rendement permet de mettre en évidence la variabilité intra parcellaire du rendement. **Elle est le constat de la variabilité et non l'identificateur de sa causalité.** Notre démarche vise à expliquer la variabilité spatiale du rendement. Celui-ci est le résultat final d'un processus mis en œuvre par l'agriculteur. Pour cela, nous nous sommes appuyé sur un questionnaire auprès des agriculteurs pour atteindre notre objectif.

Cette démarche est donc une recherche de causalité essentiellement qualitative qui a permis d'identifier deux origines de la variabilité intra parcellaire : origines pédoclimatiques et

origines anthropiques. Elles sont présentées dans le Tableau VI-1, et mises en relation avec les termes de variabilité statique et dynamique, définis dans la partie introductive.

	VARIABILITE	
	STATIQUE	DYNAMIQUE
ORIGINES PEDOCLIMATIQUES	***	
Effet de la pente	***	
Effet du sol	***	
Effet du voisinage	**	*
ORIGINES ANTHROPIQUES		***
Origine dans l'historique	*	*
Modifications		***
Disfonctionnement		***
Précédent culturale		***
Apports différenciés	*	**

Tableau VI-1 Récapitulatif des sources de variation du rendement intra parcellaire. (* : Degré d'importance)

La variabilité du rendement intra parcellaire dépend d'un grand nombre de facteurs tant « statiques » que « dynamiques ». Une part de la variabilité intra parcellaire ne peut être expliquée que par l'agriculteur. Cette variabilité est le fruit de son travail, de l'itinéraire technique (un désherbage peu efficace sur une zone, un double apport de fumier sur une autre zone, un double semis sur la partie proche de la rivière, etc). On est davantage dans le cadre d'une variabilité dynamique, qui n'a pas de raisons de se répéter de manière systématique chaque année. Toutefois, en terme général, si la source principale de la variabilité intra parcellaire du rendement reste le sol, on est face à une variabilité de nature répétitive qui peut être rapprochée d'une notion de « potentialité du sol » à permettre l'expression du rendement d'une culture.

VI.2. Zones intra parcellaires

VI.2.1. Introduction

Une fois les cartes de rendements établis et la distribution du rendement expliquée qualitativement par l'agriculteur, il est nécessaire de délimiter les zones d'un point de vue informatique. C'est l'étape indispensable pour mettre en place une conduite modulée. Nous avons donc recherché des techniques de traitement d'images permettant de **passer de l'appréciation qualitative** de l'agriculteur (identification d'une zone de comportement particulier du rendement) **à une appréciation quantitative** (génération des limites numériques de cette zone).

VI.2.2. Matériel et méthodes

Parmi les parcelles présentées dans le sous-chapitre précédent (Sous-chapitre VI.1), les résultats de deux parcelles sont ici présentés. Ces deux parcelles, cultivées en blé,

correspondent à la Figure VI-3 (facteurs sol) et la Figure VI-5 (effets de voisinage). L'objectif de la méthode est :

- Premièrement, d'extraire de façon automatique les zones où l'agriculteur a identifié la cause de la variabilité observée sur la carte de rendement, et
- Deuxièmement, de délimiter les autres zones, où une variabilité du rendement existe. Ces zones doivent être adéquates aux contraintes d'opérabilité (taille de machines, temps de réaction pour la modulation, etc) en terme de taille et de nombre. En effet, une dizaine de zones de 12 mètres de large ne représente pas une disposition du zonage « opérable ».

La technique la plus adaptée à ce type d'extraction de zones, est **la segmentation**. Ainsi, dans notre cas il est nécessaire de tenir compte également de l'échelle (reliée au deuxième objectif). On doit donc pouvoir, à partir de la segmentation, sélectionner la taille des zones afin qu'elles soient adaptées aux outils et aux contraintes de modulation. La méthode de segmentation du logiciel e-Cognition permet cela. Dans cette méthode le paramètre d'échelle permet, en le modifiant, le contrôle de la taille des objets qu'on veut discriminer. Ce paramètre d'échelle est un terme abstrait qui détermine l'hétérogénéité maximale permise pour les objets résultant de la segmentation. Pour des données hétérogènes, les objets résultant de la segmentation pour un **paramètre d'échelle** donné sont plus petits que pour des données homogènes (Baatz et al., 2004). Cette technique présente donc l'avantage de pouvoir délimiter les zones en les adaptant à la taille désirée par l'agriculteur en tenant compte de la variabilité présente sur la carte de rendement.

VI.2.3. Résultats

Pour la première parcelle, située à Castelnaudary, l'agriculteur avait remarqué une zone présentant un faible rendement dû à l'affleurement de la roche mère (en rouge sur l'image de gauche de la Figure VI-12). La segmentation proposée (en bleu sur l'image de droite de la Figure VI-12) montre bien les limites de cette zone de rendement en relation directe avec le rendement ainsi que les autres zones issues des variations du rendement. A partir de ce moment l'agriculteur peut intégrer ces limites dans sa machine et moduler la profondeur du travail du sol, les apports, etc.

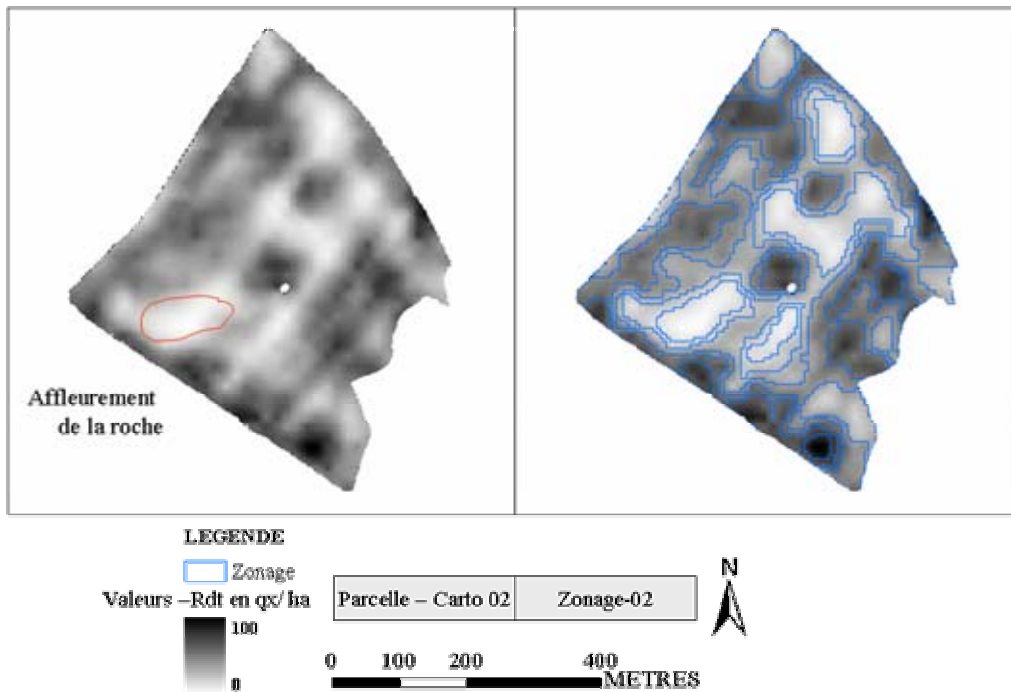


Figure VI-12 - Délimitation des zones à partir de la carte de rendement: correspondance entre la zone identifiée par l'agriculteur (affleurement de roche) et le zonage proposé.

L'autre exemple concerne une parcelle sur le secteur du Touch. Pour cette parcelle, une zone de faible rendement, provenant d'une anoxie du blé causée par l'inondation d'une partie de la parcelle, était visible en 2002 (en rouge sur l'image centrale supérieure de la Figure VI-13). La délimitation des zones pour l'ensemble de la parcelle a été réalisée (en bleu sur l'image centrale inférieure de la Figure VI-13).

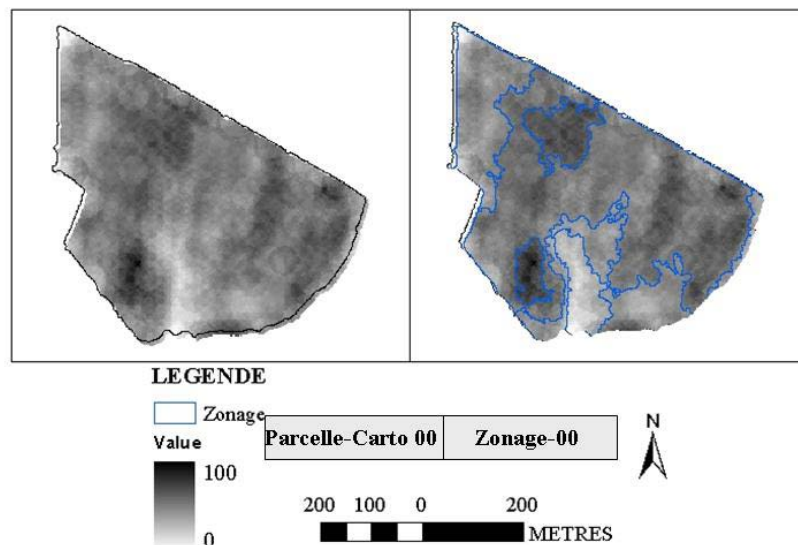


Figure VI-13 - Délimitation des zones à partir de la carte de rendement

La Figure VI-13 montre que cette délimitation est bien définie et ajustée aux connaissances de l'agriculteur en jouant sur le paramètre d'échelle jusqu'à obtenir des zones modulables.

VI.2.4. Discussion

Sur la base de l'analyse des cartes de rendement par l'agriculteur, nous disposons des outils de traitement d'images qui permettent, par des techniques de segmentation, de retrouver les limites géographiques de ces zones. On réalise ainsi les phases d'observation et d'analyse, débouchant sur une action qui sera localisée géographiquement dans la parcelle. Parce qu'il y a eu identification des facteurs de causalité, il y a en même temps identification de l'action de correction.

L'ensemble du processus décisionnel de l'agriculture de précision est donc accompli. Au moins trois critiques importantes apparaissent dans cette démarche :

- L'agriculteur a une identification sélective des zones caractéristiques de variabilité dans sa parcelle : celles dont il connaît l'origine. Le traitement d'image fait apparaître d'autres zones pour lesquelles on ne dispose pas d'éléments d'explication. Comment faut-il les traiter ?
- Parce que le rendement est un « mélange » entre les différents types de variabilité, statique et dynamique, le traitement et les décisions à prendre seront différents selon la cause de variabilité identifiée par l'agriculteur (et son rattachement à un type ou un autre de variabilité).
- A un moment donné, l'agriculteur dispose de plusieurs cartes de rendement, il se pose alors la question de comment aborder l'analyse pluriannuelle des cartes de rendement ? Le point suivant aborde cette question.

VI.3. Analyse pluriannuelle des cartes de rendement

VI.3.1. Introduction

Au début de l'apparition des cartes du rendement, dans les années 90, les interprétations que l'on proposait se basaient sur l'hypothèse selon laquelle certaines parties de la parcelle auraient eu constamment un bon rendement, tandis que d'autres auraient eu en permanence un moins bon rendement. Cette hypothèse se base sur une prééminence des caractéristiques permanentes du sol qui auraient toujours eu le même effet sur le comportement de la culture.

Au fur et à mesure de l'utilisation de la technologie des cartes de rendement, on a pu disposer de cartes établies pendant plusieurs années sur une même parcelle. Il fut alors possible de vérifier les hypothèses énoncées dans le paragraphe précédent. Un certain nombre de méthodes simples ont été développées pour extraire, à partir des cartes du

rendement, des zones présentant une constance de comportement (Fraisie et al., 1999; Fridgen, 2000; Grenzdörffer et Gebbers, 2001; Kitchen et al., 1998; Larscheid et Blackmore, 1996; Layrol et al., 2001; Layrol et al., 2000; Panneton et al., 2001; Shatar et Mcbratney, 2001; Swindell, 1997). Ces méthodes sont différentes dans leur conception et leur approche. On peut citer :

- la création de cartes de *scores* (Swindell, 1997) : chaque pixel d'une année est classé, après normalisation des données de rendement, de 1 à 5. Puis les valeurs des niveaux de rendement sont sommées sur le nombre d'années.
- les cartes de tendance (Larscheid et Blackmore, 1996) : c'est une méthode dite supervisée car l'utilisateur emploie des connaissances à priori pour définir les classes. A partir des données de rendement normalisées, une carte de tendance est calculée – cette partie s'appuie sur la méthode des cartes de *scores*. Parallèlement à cette carte de tendance, une carte de stabilité temporelle, basée sur le coefficient de variation (CV), est réalisée. La combinaison des deux donne lieu à des zonages de type : zone de haut rendement et stable, zone de bas rendement et stable ou zone instable
- méthodes de classification (Layrol et al., 2001; Layrol et al., 2000; Panneton et al., 2001) : les méthodes de classification, type ISODATA (*Interactive Self Organizing Data Analysis*) ou logique floue (*Fuzzy Logic* en anglais), ont l'avantage d'être implémentées dans des logiciels de traitements d'images (Merour, 2001). Cela permet d'utiliser les données de rendement mais aussi d'intégrer toute autre source de données spatialisées (MNT, images aériennes, images de télédétection, etc).

VI.3.2. Application de la méthode de Blackmore²

Parmi les méthodes présentées ci-dessus, la méthode de Blackmore est la seule permettant d'obtenir un résultat spatial agronomiquement interprétable pour une modulation. Comme nous le verrons dans la partie méthodologique présente deux composantes : 1) la valeur du rendement et 2) la variabilité spatiale et temporelle du rendement.

Dans la suite nous présenterons la parcelle sur laquelle la méthode a été appliquée, la méthodologie, les résultats ainsi qu'une discussion sur l'utilisation multi-temporelle des cartes de rendement dans la création du zonage.

² Ce travail a été réalisé en collaboration avec JG Drucbert

VI.3.2.1. Matériel

Pour mettre en place cette méthode, il faut disposer d'au moins trois campagnes de rendement cartographiées pour une parcelle. La parcelle de la Figure VI-14, parcelle de *Terreblanque*, répond à ces contraintes. Le rendement de cette parcelle de 25 ha, cultivé en blé en 1999, 2000 et 2001, a été cartographié. La répartition spatiale des valeurs de rendement est montrée dans la Figure VI-14.

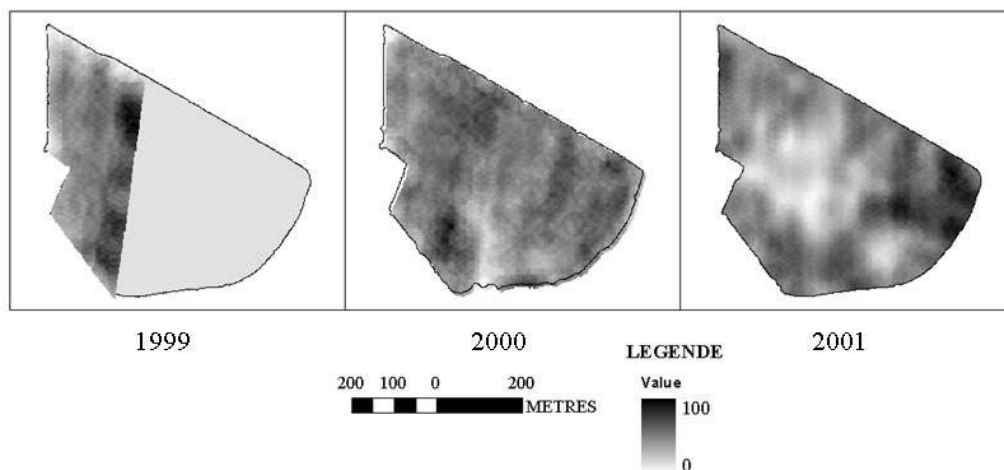


Figure VI-14 - Cartographie du rendement sur trois années pour la même parcelle.

Sur cette cartographie temporelle du rendement trois points sont à remarquer :

- La zone de rendement cartographiée chaque année ne couvre pas la totalité de la parcelle culturale (9 ha sur les 25 ha). Il est en effet difficile en conditions réelles, de disposer sur quatre ans de rendement, du rendement cartographié sur la totalité de la parcelle culturale.
- La variabilité temporelle des rendements est importante.
- La variabilité inter annuelle de la distribution spatiale des rendements est élevée. En analyse visuelle, il n'apparaît pas, de manière évidente, de zones présentant un rendement systématiquement plus fort (ou plus faible) chaque année

VI.3.2.2. Méthodes

La méthode est mise en place pour la partie superposable des trois parcelles cartographiées. La structure plus détaillée de la méthode est illustrée Figure VI-15. Elle présente deux principales composantes : une tendance spatiale et une tendance temporelle.

1. La tendance spatiale : elle est représentative des zones de la parcelle où le potentiel de rendement est faible ou élevé. Pour la calculer, en cas de polyculture, il est nécessaire de normaliser d'abord les données – cela permet de s'affranchir des différences climatiques et des rotations culturales – et ensuite de calculer la moyenne du rendement.

2. La tendance temporelle : elle est représentative de la stabilité temporelle des zones de rendement à tendance faible ou élevée. La détermination de cette stabilité se fait par le calcul du coefficient de variation.

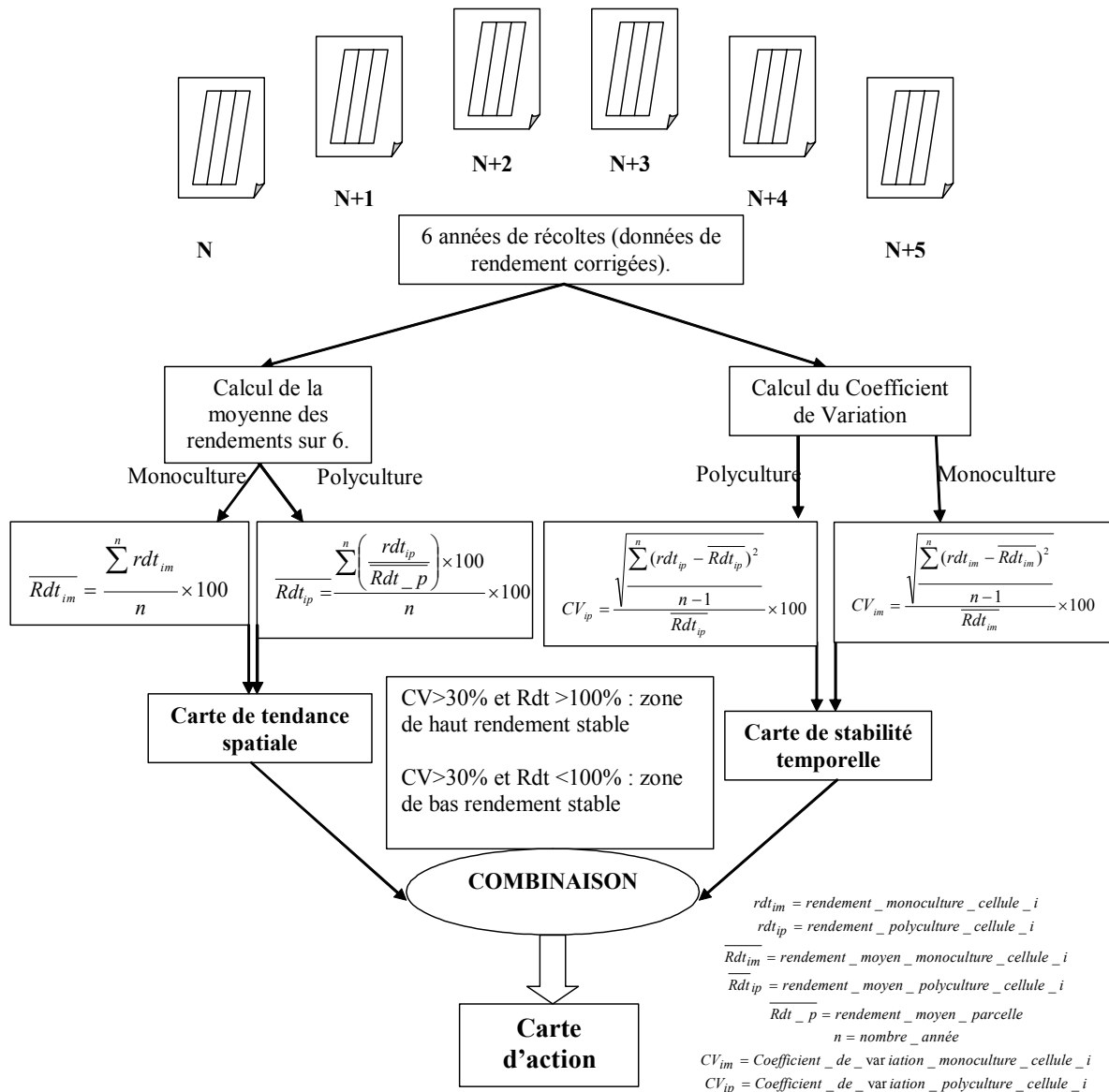


Figure VI-15 - Structure de la méthode de «Blackmore».

Le résultat final de cette analyse est la combinaison booléenne des 2 cartes, spatiale et temporelle :

- zone de haut rendement stable
- zone de bas rendement stable
- zone de rendement instable.

VI.3.2.3. Résultats

L'application de la méthode de « Blackmore » permet d'obtenir deux produits cartographiques. Sur les deux cartes de gauche de la Figure VI-16, les zones en rouge indiquent des zones de faible rendement tandis que les zones en vert sont indicatrices d'un fort rendement.

La variabilité temporelle de ce rendement est exprimée dans les deux cartes de droite de la Figure VI-16 : chaque pixel contient la valeur du coefficient de variation du rendement. Les zones plus sombres traduisent une forte variabilité, contrairement aux zones les plus claires (stabilité du rendement).

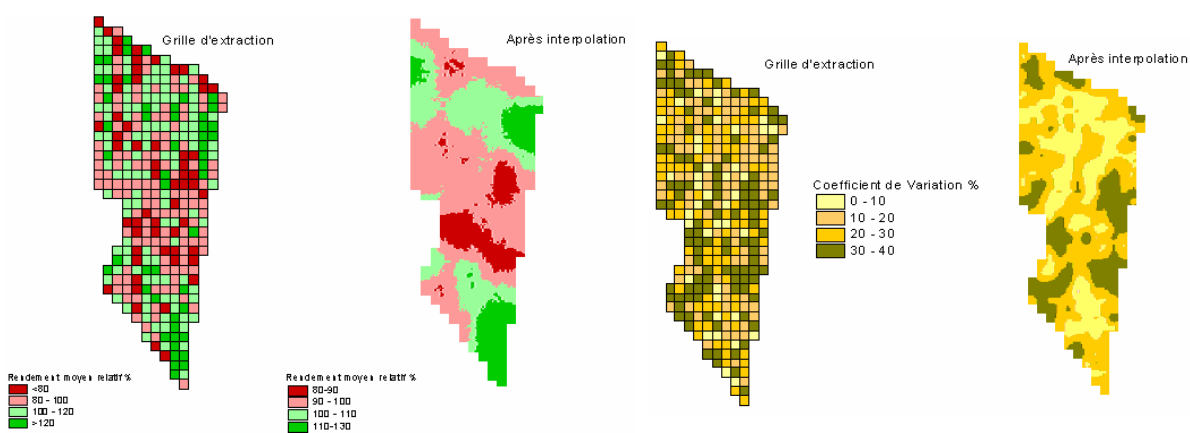


Figure VI-16 - Résultat de la variabilité spatiale et temporelle d'après la méthode de « Blackmore ».

La combinaison de ces deux cartes donne le résultat final pour cette parcelle, avec trois classes : rendement bas et stable, rendement haut et stable, rendement instable.

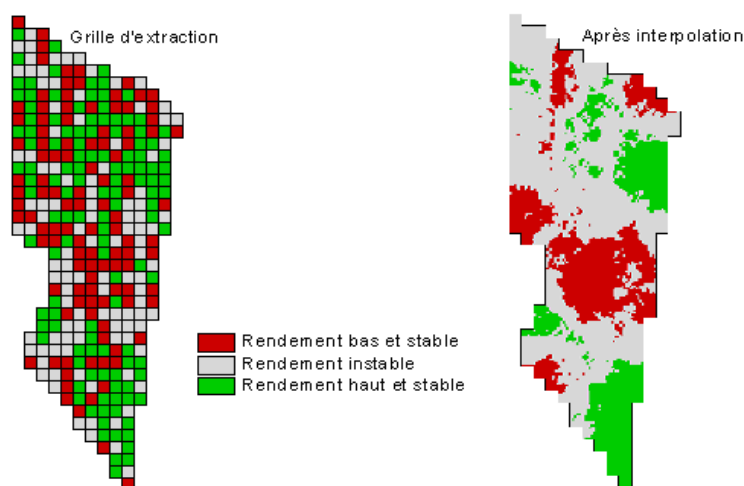


Figure VI-17 - Résultat final de la méthode de « Blackmore » : Carte d'action

Le traitement de cette parcelle, avec trois années de carte de rendement, fait apparaître (Figure VI-17) une zone centrale avec un rendement bas et stable (rouge) qui est bien

différenciée des deux zones de rendement haut et stable. Dans la plus grande partie de la parcelle, la couleur grise indique l'existence d'une instabilité temporelle du rendement.

Ce résultat aboutit à un constat (certaines zones « poussent bien » et d'autres « ne poussent pas bien ») mais ne fournit pas d'éléments d'explication. De plus les zones issues de la méthode ne sont pas identifiables sur une carte de rendement isolée, il est donc encore plus difficile de les expliquer. Ce résultat reste donc au niveau du constat contrairement à la démarche précédente d'enquêtes (sous chapitre VI.1) où les zones marquées étaient rattachées à une explication.

VI.3.3. Discussion

Durant les années 90 et jusqu'à de très récemment (Blackmore et al., 2003) l'hypothèse de départ, selon laquelle les caractéristiques permanentes du sol avaient toujours le même effet sur le rendement, était à la base de la recherche de zones de modulation à partir des cartes de rendement.

Il est tout d'abord remarquable de constater que notre base de données, forte de plus de 600 parcelles, ne contient qu'un petit nombre de situations où une cartographie du rendement de la même partie de territoire existe trois années de suite. D'où la difficulté matérielle de mise en place de ces approches méthodologiques pluriannuelles. En plus de cette difficulté matérielle, il y a aussi les difficultés de trouver une explication à ces zones.

L'hypothèse initiale d'interprétation des cartes de rendement se basait sur des concepts de potentialités de sol. Ces potentialités étaient supposées suffisamment différenciées pour que cela s'exprime dans une constance spatiale et temporelle de la hiérarchie des rendements. Cette hypothèse est remise en cause. Dans un article récent Blackmore propose une révision de la méthode qu'il proposait et formule de nouvelles conclusions (Blackmore et al., 2003). Il écrit en particulier que « les tendances spatiales » (type fort rendement stable, ou bas rendement stable, etc.) qui devraient découler après plusieurs années d'analyse des cartes du rendement n'apparaissent pas. Les effets des années s'annulent entre eux », de ce fait « le traitement des parcelles, basé entièrement sur les tendances historiques des cartes du rendement, ne peut pas être réalisé », cela implique « que la conduite des parcelles doit se concentrer sur la gestion de la variabilité intra parcellaire pour une année donnée ». D'où le changement d'orientation de l'utilisation des cartes de rendement. Il est conseillé de ne pas utiliser les cartes de rendement comme source unique pour la création de zones intra parcellaires (Annexe III : Méthodes de zonage intra parcellaire). Néanmoins elles peuvent

servir à trouver des relations avec des facteurs explicatifs du rendement (modèles semi-déterministe) ou comme donnée de validation, dans les modèles de croissance de culture (Gay et Chéret, 1999), dans les essais en grand parcelle, etc

Conclusion de la première partie

La disponibilité des capteurs de rendement, des outils de localisation par satellites et des outils de traitement d'images ont permis la production de cartes de rendement. Ces cartes mettent en évidence une variabilité du rendement à l'intérieur de la parcelle. Pour l'agriculteur, c'est le premier pas d'une démarche d'agriculture de précision devant le conduire vers une modulation des apports dans la parcelle. Son objectif est alors de compenser, par des apports adaptés, les différences de potentiel de production qui existent et y adapter son itinéraire technique.

Dans le cadre de l'expérimentation conduite tant à Castelnaudary que sur le bassin versant du Touch, nous avons pu montrer que :

- techniquement la cartographie des rendements fonctionnait de manière satisfaisante ;
- les résultats acquis permettaient une expression d'une variabilité intra parcellaire, quantifiable (calcul de paramètres statistiques, géostatistiques et production de représentation cartographique) ;
- une partie de la distribution spatiale de ces rendements pouvait être expliquée de manière qualitative par les agriculteurs en charge de l'exploitation des parcelles considérées.

Nous avons ensuite cherché à exploiter l'ensemble des données dont nous disposions et en particulier la succession de cartes de rendement sur une même parcelle. Il y avait là une opportunité intéressante pour mettre en évidence une hétérogénéité fonctionnelle, puisque la carte de rendement doit forcément être rattachée à un processus : la production de grain, résultat de la croissance et du développement d'une culture.

L'analyse d'une succession de cartes de rendement sur une même parcelle est une piste logique pour mettre en évidence une distribution spatiale particulière et répétitive du rendement. Mais compte tenu des résultats présentés dans ce travail, montrant la variabilité temporelle du pattern du rendement, et les résultats présentés par d'autres auteurs (Blackmore et al., 2003), l'hypothèse d'une répétitivité des effets du sol sur les valeurs du rendement n'est pas confirmée. Ceci signifie que la seule analyse des cartes de rendement ne permet pas de mettre en évidence aisément l'existence d'un zonage temporellement stable dans les parcelles. En l'absence d'une conduite modulée de l'itinéraire technique, seul le sol

peut présenter une variabilité spatiale de sa composition, à l'échelle intra parcellaire et c'est aussi le seul facteur présentant une stabilité temporelle. D'où l'intérêt d'aborder les sols dans une deuxième partie dans laquelle une démarche similaire à celle de la première partie (démarche d'acquisition et de compréhension) doit être mise en place.

Deuxième partie

La variabilité du sol :

Introduction

Objectif

La complexité des variations spatiales peut avoir d'importantes conséquences pour ceux qui veulent décrire l'environnement à un endroit donné, et plus particulièrement pour ceux qui veulent le contrôler (Oliver, 2001). C'est le cas en agriculture de précision où la capacité de mesurer la variabilité spatiale du sol et d'évaluer son influence sur la variabilité du rendement est une étape fondamentale pour l'implémentation d'une démarche de conduite modulée (Earl et al., 2000). L'obtention de l'information sur les sols à l'échelle intra parcellaire est donc essentielle dans une démarche d'identification de la variabilité à l'intérieur de la parcelle (Sommer et al., 2003). Cette variabilité du sol détermine le potentiel pérenne de la parcelle (cf. chapitre II.2). Elle est caractérisée par les principales constantes du milieu, celles liées au sol, comme la profondeur, la topographie, etc. (Baret, 1999).

Cette partie est, de ce fait, **consacrée au sol**. Son but est de **comprendre et de trouver un outil ou une méthode permettant d'identifier ou d'évaluer sa variabilité** aux échelles d'opérabilité (intra parcellaire) et aux étendues (bassin d'action) définies précédemment.

Pour des raisons de matériel, de déplacement, de mise en place de mesures et de disponibilité des images dans l'étude de la variabilité du sol, la zone d'action est le bassin versant du Touch (cf. chapitre V.1.2).

Justification de l'usage de la télédétection

Pour obtenir l'information sur les sols à l'échelle intra parcellaire, il existe un grand nombre de techniques qui peuvent être divisées en deux grands groupes : échantillonnage (sampling) et détection (sensing), ce dernier pouvant être à distance (télédétection) ou proche. Les **techniques d'échantillonnage** « terrain » sont considérées comme très précises, mais elles impliquent un coût de main d'œuvre très élevé et un grand nombre de mesures à réaliser (Basso, 2001). De plus, cette méthode nécessite des post-traitements de spatialisation permettant un changement d'échelle ascendant (du point, à la parcelle ou au bassin versant) ainsi qu'une expertise technique et scientifique. Ces types de technique ont été infructueusement mises en place dans ce travail de thèse (Annexe IV : Terrain). Les **techniques de détection**, qui consistent, à la prise de mesures sur le terrain, aéroportées ou satellitaires, fournissent des données spatialisées en continue, sont moins gourmandes en temps de travail et plus économiques pour l'étendue d'un bassin versant. Pour cette étendue, parmi ces techniques de détection, les techniques dites proches (EMI, MuCep, capteurs de

réflectance de terrain, etc.) sont peu appropriées. Elles sont conçues pour un suivi parcellaire ou intra parcellaire. Par contre, les techniques de détection **aéroportées ou satellitaires** sont bien adaptées à cette étendue et leur résolution correspond bien à l'échelle de modulation en agriculture de précision (échelle décisionnelle).

La Figure montre la position de ces techniques dans l'espace des échelles d'étendue et de support (pixel). Les flèches sortantes des techniques d'échantillonnage et de détection proche représentent les besoins de traitement de spatialisation ou de changement d'échelle. Dans cette figure, nous avons aussi positionné l'agriculture de précision dans un contexte classique (ellipse en pointillés). Celui-ci correspond à une étendue de la parcelle (ou des groupes de parcelles) et à une échelle décisionnelle intra parcellaire (autour de 10 m). Dans le contexte de cette thèse, l'échelle décisionnelle est la même (autour de 10 m), par contre l'étendue est celle du bassin versant. En conséquence, les images provenant des satellites sont bien adaptées à nos contextes et objectif d'un point de vue de l'étendue (Figure).

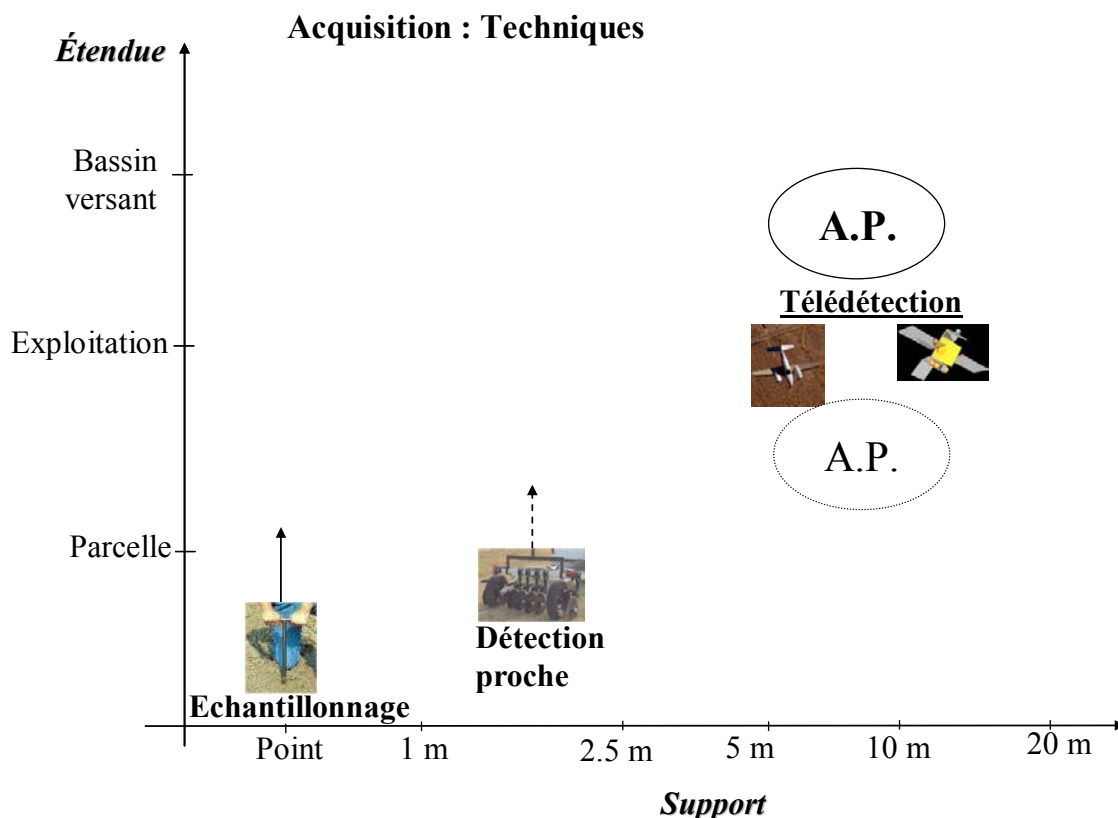


Figure Intro-2ème partie - L'observation du sol en Agriculture de Précision (A.P.) : Echelles d'étendue et de support

Concernant le choix de la taille du support (pixel) dans le domaine de l'agriculture de précision, cette taille doit être en relation avec la taille de manœuvre au moment de la modulation, c'est-à-dire avec l'échelle d'opérabilité (cf. II.1). Compte tenu des contraintes techniques des engins agricoles (dimensionnement et temps de réponse), cette échelle se

situe à l'heure actuelle entre 5 et 20 mètres. Vu la position dans la Figure des techniques satellitaires, ces méthodes sont bien adaptées à notre contexte d'un point de vue de support. Toutefois, même s'il y a adéquation entre notre échelle d'étude et la technique de détection utilisée, la télédétection des sols présente quelques caractéristiques qui peuvent devenir des contraintes dans notre contexte. En particulier cela concerne :

1. le pouvoir de pénétration de l'onde qui n'est que de quelques micromètres dans le domaine du visible (Girard et Girard, 1999). Ce faible pouvoir de pénétration implique la première des **hypothèses de travail** sur l'utilisation de la télédétection des sols dans le domaine du visible : les variations spatiales de l'état de surface du sol doivent être significatives des variations des propriétés représentatives du sol.
2. la réflectance des sols est l'intégrateur d'un grand nombre de facteurs (humidité, rugosité, matière organique, ...), cela implique l'impossibilité de dissocier chaque facteur.
3. l'instantanéité de l'image ne permet pas de savoir, pour une parcelle donnée, si la distribution spatiale de l'état de surface du sol observée est le reflet d'un effet naturel ou des activités humaines.

Dans un premier temps, nous proposons un chapitre rassemblant les principaux éléments bibliographiques sur les caractéristiques des sols de la zone d'étude et sur l'usage de la télédétection pour l'analyse des sols. Ensuite, nous présenterons une méthode basée sur une analyse diachronique au moyen de la géostatistique qui nous a permis d'appréhender le degré de distribution spatiale ou le « **vrai pattern** » du sol. Par une analyse des données historiques (photographies aériennes), nous essayerons enfin de montrer une partie de l'origine de cette distribution de la variabilité existant dans les sols.

VII. Zone d'étude et télédétection

VII.1. Zone d'étude : Les sols de Boulbène

Dans le Sud-Ouest français l'appellation « Boulbène » désigne essentiellement des terres légères, plus ou moins battantes, sensibles à l'érosion et qui n'ont pu évoluer que dans des situations peu accidentées. Ces situations correspondent à de larges couloirs alluviaux, généralement constitués de plateaux de terrasses, dont les sols essentiellement limoneux donnent les boulbènes. Ces boulbènes s'opposent à de sols plus compacts que sont les croupes molassiques recouvertes d'une formation argileuse et qui reçoivent l'appellation de terreforts.

Nous allons maintenant présenter les sols de boulbènes dans leur contexte géomorphologique à l'échelle régionale, puis nous ferons un zoom sur notre zone d'étude : les terrasses du Touch, affluent de la Garonne. Enfin nous présenterons les sols de boulbènes d'un point de vue pédologique et agronomique.

VII.1.1. Contexte géomorphologique

VII.1.1.1. Echelle régionale

Au cours du quaternaire s'édifient les systèmes de terrasses, formés de plateaux alluvionnaires situés à des niveaux différents, mais dont la structure, la composition et la disposition des matériaux restent sensiblement identiques (Marty, 1969).

Cette structure en terrasse alluviale correspond, d'après Hubschman (Hubschman, 1975), à une superposition d'une couverture limoneuse sur une couche d'alluvion plus ou moins caillouteuse. La couche de cailloux, mélangée à des sables et à des graviers, repose sur le substratum molassique (au contact de celui-ci se situent les plus gros galets).

Dans la vallée de la Garonne, on compte cinq niveaux de terrasses. Ces terrasses sont généralement reconnues et associées à un âge « chrono stratigraphique » :

1. la haute *nappe culminante* correspondant aux cailloutis : Donau
2. deux glacis alluviaux préglaciaires étagés correspondant à la *haute terrasse* de Rieumes (Günz) et à la *moyenne terrasse* de St Lys (Mindel)
3. deux terrasses glacio-fluviales étagées correspondant à la *basse terrasse* de Seysses (Riss) et au niveau alluvionnaire récent de la *basse plaine* (Würm)
4. enfin les alluvions récentes du lit majeur de la Garonne.

Dans le département de la Haute Garonne et suivant le « schéma » des terrasses, les paysages ont été construits par la Garonne et ses affluents sur sa rive gauche. Ils ont creusé le socle molassique, avec l'alternance des différentes glaciations et constitué des paysages remarquables, d'Ouest en Est, jusqu'à le fleuve (Figure VII-1)(Mazieres, 1990).

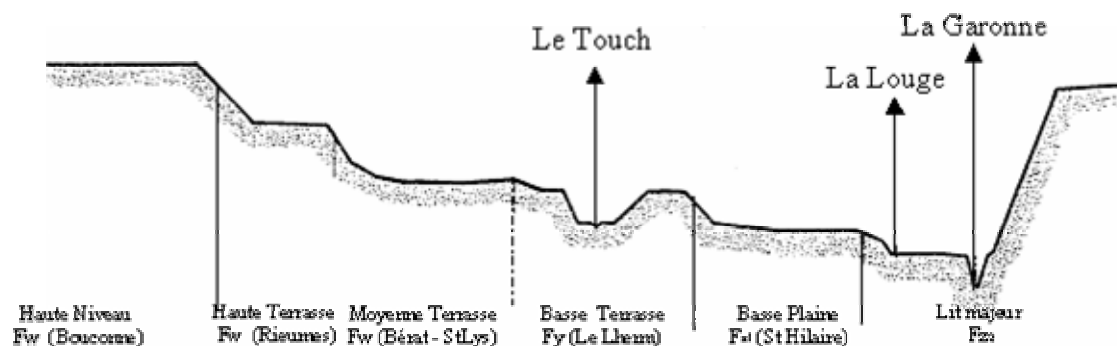


Figure VII-1- Coupe schématique de la vallée de la Garonne en amont de Muret , d'après la CRAMP (C.R.A.M.P., 1995)

Un de ces affluents, le Touch, a entaillé la moyenne terrasse de la Garonne et déposé sur sa rive gauche des dépôts anciens où l'on rencontre des sols lessivés hydromorphes (Guiresse et Bourgeat, 1990). Sur ces terrasses du Touch, le degré d'évolution des sols est assez en accord avec l'ancienneté des terrasses.

VII.1.1.1.a. Fy : Basse terrasse :

Les sols, dits de boubènes superficielles, sont plutôt de type hydromorphe, à pseudogley, voire gley profond et le grepp³ est discontinu. Cela est dû au contexte très hydromorphe en raison de l'imperméabilité de la grave, très altérée et donc très argileuse. Allant vers le centre de la terrasse, une large dépression se dessine, drainée artificiellement par des fossés. Le manteau limoneux y est très peu épais – moins de 60 cm, l'horizon B s'est enfoncé prématurément au sein de la grave, elle-même en voie d'altération.

Se rapprochant du pied du talus de la moyenne terrasse, on se situe aux points de résurgence de la nappe transitant au sein des alluvions grossières de ce niveau. Les sols présentent alors une couche d'argile supérieure à 45 %, avec manifestation de caractères vertiques (§ ci-dessous). Une richesse en argile doit être liée d'une part à un lessivage très accusé (13 % seulement d'argile en A) et d'autre part à la proximité de la molasse.

On retrouve d'ailleurs ce caractère argileux dans les dépôts laissés anciennement par les crues du Touch, mais le sol est ici du type lessivé hydromorphe.

VII.1.1.1.b. Fx : La moyenne terrasse :

³ Le grepp est une concrétion résultante de la cimentation du grave par les hydroxydes de fer et de manganèse

Dans le même contexte hydromorphe que la basse terrasse, les sols de bouldiers sont essentiellement superficiels, de type dégradé hydromorphe et le grepp y est plus continu.

Sa plus grande ancienneté se traduit par une altération plus poussée de la grave. Les galets y sont emballés dans une argile bleutée compacte, constituant un plancher imperméable pour les eaux superficielles. Elle présente une évolution des sols plus poussée qu'en Fy.

Dans cette terrasse on trouve une évolution du sol de l'Ouest vers l'Est (Begon, 1990).

- Partie Ouest : La couverture limoneuse est plus épaisse ; le processus de lessivage détruit l'horizon B et l'horizon A s'approfondit. Cet horizon A est considérablement appauvri en fer et en argile (de l'ordre de 15%), et il prend un aspect blanc talqueux (bouldiers blancs).
- Partie Est : L'horizon B est réduit en épaisseur et sa teneur en fer est accrue par phénomène d'accumulation en fer et manganèse. Le sommet du grave est cimenté en grepp.

VII.1.1.1.c.Fw : Haute terrasse :

Les sols sont de type lessivé glossique hydromorphe. Les teintes sont proches de celles des sols de la moyenne terrasse, teintes blancs talqueux, mais les sols sont plus profonds.

VII.1.1.1.d. FV : Haut niveau

Le sol perd son épaisseur à cause de la progression du front de dégradation, l'horizon B est enrichi d'oxydes de fer provenant de l'horizon A. Sur cette terrasse on voit parfois des formations d'argile rouge de moins d'un mètre d'épaisseur.

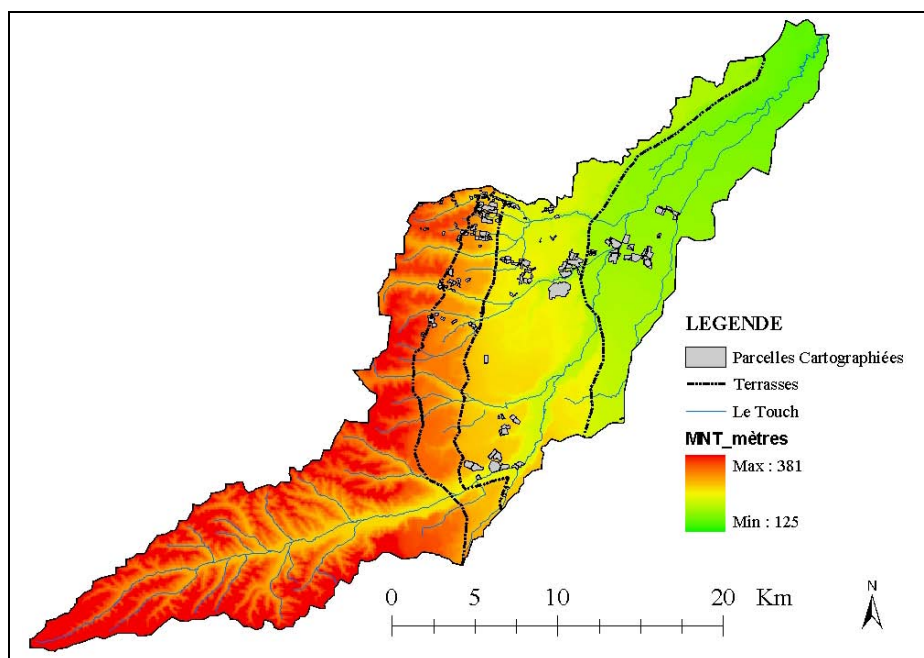


Figure VII-2 - Bassin du Touch: représentation des terrasses

La Figure VII-2 montre la position des différentes terrasses du bassin versant du Touch, délimitées par des lignes en pointillés. On peut observer aussi le positionnement des parcelles cartographiées en rendement entre 1999 et 2003.

VII.1.2. Contexte pédologique

Le profil textural des sols de boubène se caractérise par son développement dans un matériau alluvial et comportant un horizon superficiel sablo-limoneux, reposant sur des horizons compacts plus argileux, plus ou moins caillouteux et ferrugineux. On peut la caractériser par le comportement structural de l'horizon de surface qui traduit l'abondance de limons fins ou sables très fins (Hubschman, 1990).

La caractéristique principale des boubènes est leur taux élevé de limons (jusqu'à 85 %) avec une répartition relativement équilibrée entre limon fin (2 – 20 μ) et limon grossier (20 – 50 μ). Concernant les éléments grossiers, lorsque les cailloux (> 5 cm) sont absents superficiellement, on rencontre en général un horizon argileux en profondeur. Au contraire, des boubènes caillouteuses dès la surface sont l'indice que la proportion de cailloux ou de graviers (2mm – 5 cm) risque d'augmenter avec la profondeur et la présence de grepp devient probable.

Les sols caillouteux se rencontrent indifféremment quel que soit le niveau de la terrasse, cependant les sols caillouteux se manifestent avec une plus grande fréquence sur les hautes terrasses et les niveaux supérieurs.

VII.1.3. Contexte agronomique

VII.1.3.1. Drainage

Pour les boubènes, l'excès d'eau temporaire constitue l'une des contraintes principales à la mise en valeur agricole, d'où l'intérêt du drainage dans ces types de sols. Dans les années 80, différents organismes (CACG, ministère de l'agriculture, ONIC, INRA) se sont fortement intéressés au drainage des boubènes.

Concernant ce drainage la topographie et la présence d'un plancher imperméable jouent un rôle primordial.

VII.1.3.1.a. Topographie (Penalver et al., 1990)

Dans la mise en place de drains, l'écartement est modulé entre parcelles ou à l'intérieur de la parcelle en fonction de l'importance de la pente, de la forme de la pente, de ses irrégularités et de la situation géomorphologique

Plus la pente est prononcée, plus l'écartement entre les drains doit être augmenté. L'écartement est resserré en bas de versant ou en contrebas de terrasse pour tenir compte des apports d'eaux autre que la pluie directe.

VII.1.3.1.b. Plancher imperméable (Bouzigues et Chossat, 1990) :

Ce plancher peut avoir différentes sources :

1. La discontinuité texturale marquée vers 50 – 60 cm est considérée comme imperméable lorsque la teneur en argile approche ou dépasse les 40%. Néanmoins dans certains cas, même pour des taux d'argile de 40 – 45 %, la discontinuité ne peut pas être considérée comme un obstacle à l'écoulement -cas a et b de la Figure VII-3
2. L'organisation structurale de l'horizon argilique Btg - (cas c et d de la Figure VII-3).
3. Le cailloutis alluvial situé à différentes profondeurs sous les sols de bouldiers peut aussi constituer un plancher imperméable. Il est alors fortement colmaté en sa partie supérieure par une argile à dominante grise et rouilleuse avec précipitations ferro-manganiques assez rares ou très localisées – cas e de la (Figure VII-3).
4. Le grepp est localisé généralement dans les zones déprimées ou sur les ruptures de pentes et constitue un milieu imperméable discontinu. Il n'apparaît que sous forme de plaques d'extension limitée (de quelques mètres carrés à quelques dizaines de mètres carrés) dont l'épaisseur n'excède guère une cinquantaine de centimètres. Généralement localisé près de la surface (0 – 50 cm) mais parfois aussi vers 80 – 100 cm, le grepp constitue une gêne pour les façons culturales et la mise en place du réseau de drainage – cas « e » de la Figure VII-3.

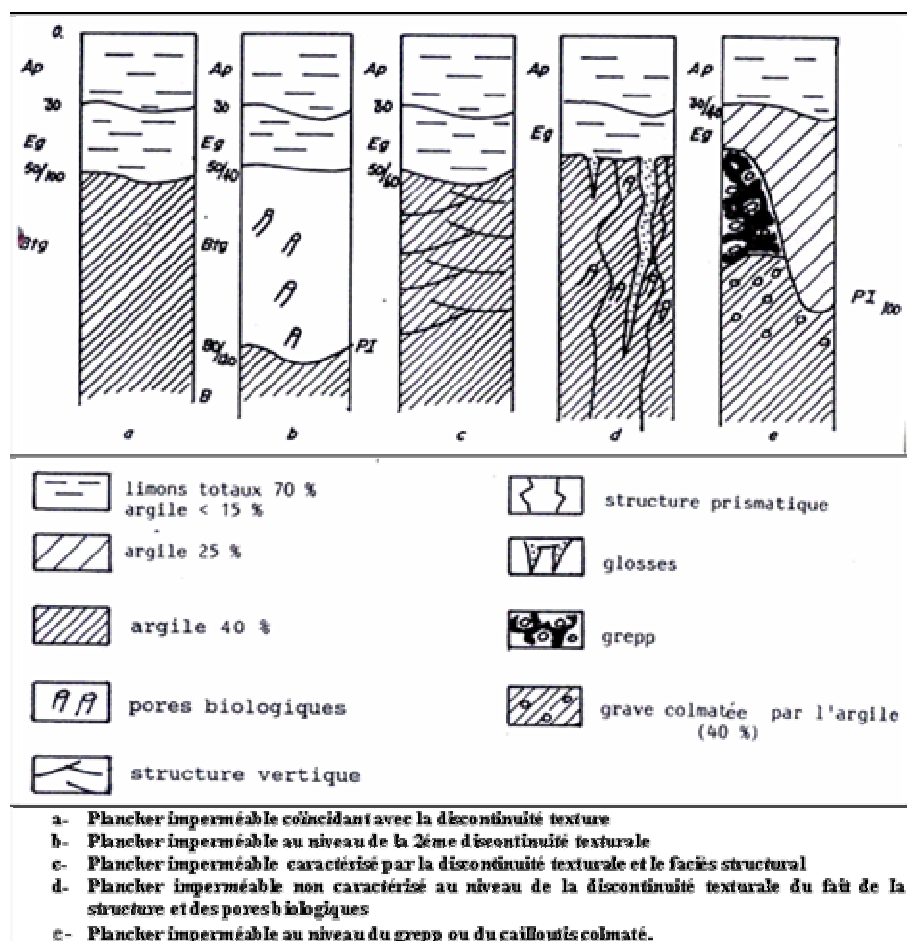


Figure VII-3 - Critères morpho-analytiques d'identification du plancher imperméable ;
(Bouzigues et Chossat, 1990)

VII.1.3.1.c. Structure de l'horizon argilique (Favrot et al., 1990; Zimmer et al., 1990)

Comme nous avons déjà dit, l'organisation structurale de l'horizon argillique Btg peut provoquer l'apparition d'un plancher imperméable. Cette organisation peut être de deux types différents (Figure VII-4) prismatique ou verticale.

Les faciès :

1. *Faciès type prismatique* : les fissures présentant une continuité verticale très nette traversant tout l'horizon argilique. Il s'agit de gloses à forte porosité biologique et de petits pores racinaires colonisant l'ensemble du matériau.

Dans ces faciès, les restitutions des réseaux sont beaucoup plus faibles et l'intensité des infiltrations profondes sensiblement accrue.

2. *Faciès type verticale* : il est caractérisé par la superposition de plaques subhorizontales, épaisses de 5 à 10 cm présentant des faces grisâtres brillantes, lissées et striées enrobant une matrice rouilleuse. Ce mode d'arrangement limite fortement la circulation verticale de l'eau. De ce fait, les écoulements ont une

composante horizontale importante et sont interceptés (en grande partie) par les drains. Des transferts hydriques, d'intensité variable dans le temps s'opèrent également en direction des couches profondes, selon trois voies préférentielles :

1. par les vides séparant les plaques subhorizontales où subsistent des empreintes racinaires de 150 à 200 μm .
2. par les fissures verticales interconnectant les plans subhorizontaux et comblées par des dépôts limoneux en provenance des horizons supérieurs.
3. Via les rares pores racinaires ou de vers traversant l'horizon

Dans les horizons B/Cg Fe sous jacents, les transferts verticaux s'opèrent plus facilement en raison de la présence de nombreuses pisolithes, d'agrégats ferrugineux limitant les phénomènes de gonflement et de pores biologiques tapissés d'hydroxydes de fer qui constituent des voies de circulation préférentielles.

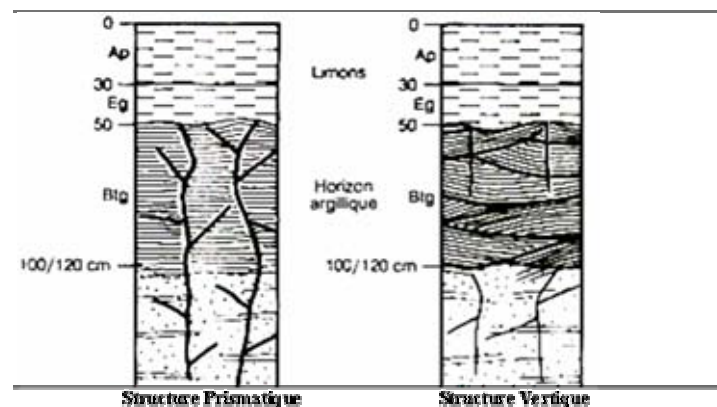


Figure VII-4- Type de faciès ; d'après (Favrot et al., 1990)

Ces faciès ont une incidence sur les mécanismes d'infiltrations profondes en sols de boubènes. Le comportement des différents faciès associés à la profondeur du cailloutis, et la présence d'un aquifère peu profond permettent d'expliquer les différences de coefficients de restitutions et donc les infiltrations profondes.

Répartition sur l'espace :

Le passage d'un faciès à l'autre est progressif, lié aux ondulations de la micro topographie. Ainsi, sur la moyenne terrasse de la Garonne, Favrot et al. (1990) ont remarqué que la structure prismatique se rencontre en position de sommet (micro-butte) alors que le faciès vertical se localise dans les creux ou sur les parties planes (micro-creux). Un faciès intermédiaire occupe les pentes, plus ou moins longues, raccordant creux et bosses dont l'écart des cotes ne dépasse pas 0.50 m.

Sur d'autres zones, ils ont observé que la répartition des faciès était différente. Alors que le faciès prismatique coïncide avec une faible profondeur d'apparition du cailloutis alluvial (100 à 120 cm), le faciès vertical n'apparaît que lorsque cette profondeur est plus

importante (> 120 cm). Le passage d'un faciès à l'autre est parfois brutal car lié aux irrégularités d'apparition des galets.

VII.1.3.2. Irrigation

Avec les boubènes il est paradoxal de devoir souligner à la fois leur forte sensibilité aux excès d'eau et leur faible capacité de réserve facilement utilisable. Pour améliorer la productivité agricole, il en résulte, comme nous l'avons souligné, la nécessité du drainage, mais aussi de l'irrigation.

Son développement, depuis 40 ans, a transformé le paysage agricole des boubènes. Il a permis la substitution de prairies et de céréales d'hiver par des cultures de printemps : maïs, soja, tournesol et sorgho. Le soja a pris de 10 à 30 % des surfaces irrigués au maïs et a donné naissance à une rotation maïs-soja. Le gain de rendement procuré par l'irrigation est estimé entre 30 à 70 q/ha pour le maïs et 5 à 25 q/ha pour le soja (Balas et al., 1990). Le matériel en 1998, sur la zone du canal de St Martory était de 36 % d'enrouleurs, 34 % en couverture totale, 15 % en couverture intégrale et 10 % d'irrigation par pivot.

VII.1.4. Conclusion

Les affluents de la rive gauche de la Garonne ont creusé le socle molassique et sous l'influence des différentes glaciations ont constitué un schéma en terrasses. Le Touch fait partie de ces affluents et quatre terrasses y sont différenciables : la basse terrasse, la moyenne terrasse, la haute terrasse et le haut niveau. Le sol principalement développé sur ces terrasses est un sol de boubènes, caractérisé par son contenu en limon, à la différence des sols dits de terrefort, caractérisés par leur compacité, fruit du contenu en argile.

Le profil des boubènes présente une importante diversité, cette diversité est en relation directe avec la terrasse voire la position dans la terrasse. Ainsi, sur la moyenne et haute terrasse on peut trouver un niveau induré, le grepp, absent sur la basse terrasse où la caractéristique principale est le fort contenu en argile à profondeur variable. Ce niveau induré de forts contenus argileux est à l'origine d'une couche imperméable caractéristique des boubènes.

A l'échelle de la parcelle, l'irrigation est, depuis 40 ans, de plus en plus répandue. Cette irrigation implique selon la modalité (enrouleurs, pivot,...) une distribution spatiale de l'eau différente au sein de la parcelle. Cette différenciation intra parcellaire est accentuée par les systèmes de drainage installés dans les années 70-80. En fait, cette distribution spatiale différenciée du drainage peut être considérée comme une démarche d'agriculture de

précision jouant sur la variabilité statique de la parcelle, c'est-à-dire, sur le sol. Au sein de la parcelle, la mise en place des drains a été modulée. Pour une même parcelle, l'orientation des drains, la profondeur et l'écartement vont varier selon le type de sol et la topographie. Nous sommes devant un exemple d'agriculture de précision pratiquée ainsi dès les années 80.

Cela vient se confronter à une des « hypothèses » du départ en agriculture de précision qui considère qu'au sein de la parcelle l'itinéraire cultural est le même. En fait cela n'est plus vrai parce que la variabilité spatiale intra parcellaire du drainage est une source de variation. A un autre niveau, les ondulations de la micro-topographie constituent aussi une source de variabilité spatiale du sol. Ainsi, nous allons trouver de zones d'alternance entre faciès vertiques, limitant la circulation verticale de l'eau, et faciès prismatique, à plus fort degré d'infiltration profonde. Cette différenciation de faciès et donc de perméabilité peut avoir des influences sur le développement des cultures.

Tous ces points (situation dans la terrasse, irrigation, drainage, faciès) sont des points clés dont il faut tenir compte dans l'étude des sols dans un contexte d'agriculture de précision parce qu'ils vont déterminer la variabilité aux différentes échelles (inter parcellaire, intra parcellaire, décamétrique, etc).

VII.2. La télédétection

VII.2.1. Généralités

VII.2.1.1. Définition

La télédétection est définie comme l'ensemble de techniques permettant d'obtenir de l'information sur un objet, un phénomène ou une surface, par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci (Chuvieco, 1996; Girard et Girard, 1999). Ces mesures peuvent s'appuyer sur deux types de produit :

- les photos aériennes : prises à basse (drônes) ou haute (avions) altitudes : télédétection aéroportée.
- les images satellites prises à partir de satellites d'observation de la terre : télédétection satellitale.

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes principalement intéressé aux **satellites d'observation de la terre**. Néanmoins, dans ce chapitre, nous ferons appel aux archives historiques des **photos aériennes** comme support d'aide à l'interprétation du comportement de la variabilité spatiale des sols, appréhendée par les images satellites.

VII.2.1.2. Rayonnement électromagnétique

La télédétection est basée sur l'utilisation d'instruments appelés capteurs qui enregistrent le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par les objets de la surface terrestre ou de l'atmosphère et le convertissent en un signal numérique de sortie. Ce rayonnement provient de 2 types de sources:

- du Soleil et de la Terre, émetteurs et réflecteurs naturels
- d'émetteurs artificiels comme les radars.

Dans le premier cas, il s'agit de la télédétection passive, dans le second cas de la télédétection active (on émet un rayonnement avant d'en enregistrer le retour). Ici on s'intéressera uniquement à la **télédétection passive**.

VII.2.1.3. Les satellites

Les satellites utilisés en télédétection passive utilisent des capteurs appelés radiomètres. Selon l'objectif d'utilisation de ces satellites - surveillance de l'atmosphère, de l'océan ou de la terre - les radiomètres embarqués sont calibrés pour mesurer dans certaines bandes spectrales, appelés canaux. Parallèlement à cette résolution spectrale, la dimension spatiale est définie par l'étendue et par le support (généralement appelé résolution). La Figure VII-5 positionne un certain nombre de satellites selon trois classes : grande étendue, haute résolution et multi-spectrale.

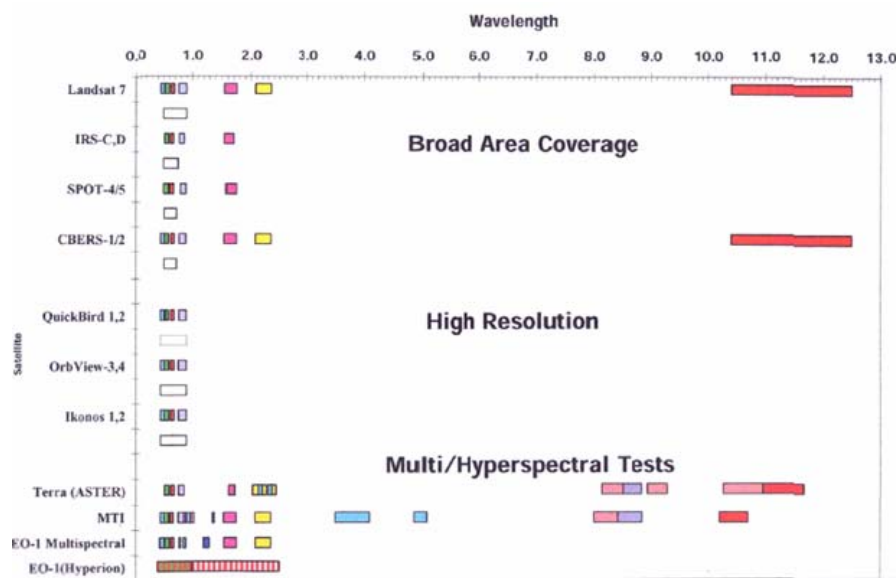


Figure VII-5 Positionnement des satellites en fonction de trois classes : grande étendue, haute résolution et multi-spectrale. (D'après Stoney, 2004)

Dans ce travail de thèse, voulant aborder **une grande étendue**, ce sont les satellites de la première classe les mieux adaptés. Avec **une résolution décamétrique** et une étendue de l'ordre des 60-100 km, les images issues de ces satellites répondent à nos attentes. Dans

notre cas, nous disposons des images SPOT que nous présentons plus en détail au point suivant.

VII.2.1.4. Le satellite SPOT

La famille SPOT, constitué de SPOT 1,2,4,5 (à la suite d'une défaillance de son système de stabilisation SPOT 3 a cessé de fonctionner en novembre 1996) présente les caractéristiques spatiales et spectrales suivantes :

1) 4 bandes de longueur d'onde d'observation, réparties en deux modes spectraux :

a) Le mode multibande, pour lequel les instruments enregistrent les rayonnements émis dans trois (ou quatre pour SPOT 4 et 5) bandes de longueur d'onde différentes :

- la bande B1, du vert : 0,50 à 0,59 μm
- la bande B2 du rouge : 0,61 à 0,68 μm
- la bande B3 du proche infra-rouge : 0,78 à 0,89 μm
- la bande B4 du moyen infrarouge MIR : 1,58 à 1,75 μm (disponible pour SPOT 4 et 5)

b) Le mode panchromatique. Il est destiné à privilégier la finesse géométrique de l'image et à distinguer par exemple des routes, des bâtiments importants, une exploitation

2) une largeur d'observation de 60 km donnant lieu à des images d'une étendue de 60 km par 60 km.

3) Une résolution spatiale de 10 mètres en panchromatique et 20 mètres en multibande pour les satellites SPOT 1,2 et 4 et respectivement de 5 mètres et 10 mètres pour SPOT 5.

Dans le cadre de cette thèse nous disposons d'une **série de 11 images SPOT**, obtenus dans le cadre d'un accord ISIS, en partenariat avec le CESBio (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère). Les corrections atmosphériques pour le calcul de réflectance au sol ont été réalisées par le CESBio en utilisant le modèle SMAC (Launay et al., 1999). Cette série d'images comprend 10 images, du mois de mars au mois de novembre 2002 et une image en avril 2003 (Tableau VII-1).

Dates (jj/mm/aa)	21/03/02	23/04/02	15/05/02	14/06/02
	20/07/02	14/08/02	14/09/02	06/10/02
	27/10/02	22/11/02	03/04/03	

Tableau VII-1- Dates de prise de vue des images de la série SPOT.

VII.2.1.5. La réflectance spectrale

La réflectance désigne le rapport de l'énergie réfléchié par un objet dans une bande de longueur d'onde et de l'énergie reçue du soleil par cet objet pour la même bande de

longueur d'onde (Girard et Girard, 1999). L'évolution de réflectance avec la longueur d'onde, dite signature spectrale, est utilisée pour caractériser le milieu observé. Par exemple la Figure VII-6 montre la signature spectrale de différentes surfaces comme la neige, la végétation, le sable ou l'eau. Ce comportement, différent pour chaque type de surface, est à l'origine de l'étude par télédétection de chacune des surfaces.

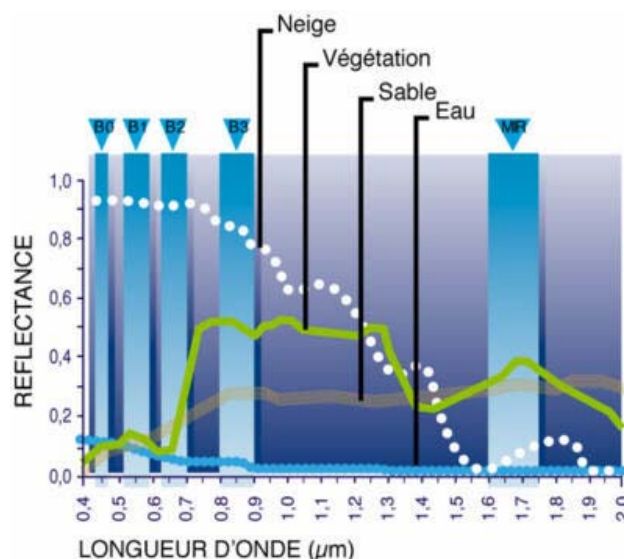


Figure VII-6 - Comportement spectral de 4 milieux différents.(Cabrières, 2001)

VII.2.2. La télédétection et les sols

VII.2.2.1. La réflectance spectrale des sols.

La réflectance de sols a fait l'objet de nombreuses études. Ainsi, Ben-Dor et al. (Ben-Dor et al., 2003) ont établi des relations, en laboratoire et pour de sols d'Israël, entre la croûte structurale du sol et la réflectance dans la région spectrale des SWIR (short-wave infrared), Mougenot (Mougenot, 1993) et Mougenot et al (Mougenot et al., 1993) ont étudié la réflectance des sols selon leur degré de salinité. Demattê et Garcia (Dematte et Garcia, 1999) ont mis en relation les réflectances spectrales entre 400 et 2500 nm, mesurées au laboratoire avec l'IRIS (Infra Red Intelligent Spectroradiometer), et 60 échantillons de sols de l'état de Parana, au Brésil, pour estimer la teneur du sol en éléments comme l'argile ou le fer. Viscarra-Rossel et McBratney (Viscarra Rossel et McBratney, 1998) ont réalisé, en 1998, un étude similaire, pour de sols australiens, dans lequel la région spectrale étudiée allait de 1300 à 2500 nm. Ils ont montré que l'augmentation de l'argile et du contenu en eau du sol provoquait une diminution de la réflectance, tandis qu'un changement du taux de matière organique (MO) ne provoquait aucun effet sur la réflectance. Ben-Dor et Banin (Ben-Dor et al., 1995) en Israël, Malley et al (Malley et al., 1999) au Canada et plus récemment Chang et al. (Chang et al., 2001) aux Etats Unis ont utilisé un NIRS (Near

Infrared Reflectance Spectroscopy) pour établir, d'une façon rapide et non destructive, des relations entre la réflectance et un certain nombre de propriétés du sol (argile, CaCO_3 , Ca, Fe, Mg, CEC, ...). Thomasson et al (Thomasson et al., 2000) ont aussi trouvé des relations entre les réflectances allant de 250 à 2500 nm et certaines propriétés des sols du Mississippi. D'autres relations entre les propriétés du sol et la réflectance ont été mises en évidence par d'autres auteurs : Chen et al (Chen et al., 2000) pour le carbone organique en surface du sol à partir d'images aériennes ou Escadafal concernant la couleur du sol (Escadafal, 1993). Ces travaux et d'autres synthèses (Barnes et Baker, 2000; Barnes et al., 2003; Brisco et al., 1998; Dwivedi, 2001; Moran et al., 1997)) permettent d'affirmer que la réflectance de sols est liée aux propriétés des sols.

Mais, malgré ces relations entre la mesure de réflectance et les propriétés du sol (Scull et al., 2003) et malgré le fait que la télédétection soit une source de données importante dans la cartographie des sols par la continuité de données télédétections, **les images satellites ne sont pas utilisées couramment pour cartographier les propriétés des sols parce que la réflectance du sol est gouvernée par nombreux facteurs** (Baret et al., 1993) : l'humidité, rugosité, conditions climatiques, angle de prise de vue, etc (Barnes et al., 2003; Thomasson et al., 2001). En plus la télédétection ne peut donner que des informations sur la partie la plus superficielle du sol : le pouvoir de pénétration d'une onde électromagnétique est de l'ordre de grandeur de sa longueur d'onde, soit de l'ordre du micromètre dans le domaine du visible, alors qu'il est de l'ordre du centimètre pour les hyperfréquences (Girard et Girard, 1999).

VII.2.2.2. La réflectance spectrale des sols et ses facteurs d'influence

Comme nous avons évoqué dans le paragraphe précédent : nombreux facteurs gouvernent la réflectance du sol et ainsi ses variations. Un certain nombre de synthèses (Barnes et al., 2003; Dubucq, 1989; Girard et Girard, 1999; Michot, 2003; Thomasson et al., 2000) énumèrent et décrivent ces facteurs de variation. Nous les présentons en les divisant en deux groupes : extrinsèques et intrinsèques.

VII.2.2.2.a. Facteurs extrinsèques :

Ces facteurs vont jouer sur la valeur de la mesure télédétectionnée mais ne sont pas directement liés au sol.

- 1- Caractéristiques de l'appareil de mesure : angles d'ouverture, résolutions spatiale et spectrale
- 2- Rôle de l'atmosphère, de la nébulosité et effet des aérosols sur la diffusion

- 3- Conditions d'observation : inclinaison de l'axe du capteur, l'orientation et la source illuminante.

VII.2.2.2.b. Facteurs intrinsèques :

Les facteurs intrinsèques sont reliés à l'état de surface du sol - défini par Escadafal (Escadafal, 1989) comme la composition et l'organisation de tous ces facteurs à un instant donné. Nous allons examiner l'importance de chacun d'eux dans la réflectance des sols, pour ensuite mieux interpréter les résultats de notre analyse.

VII.2.2.2.b.1. L'humidité :

Lors d'un apport d'eau (précipitations atmosphériques ou irrigations), l'eau au contact du sol se répartit en trois fractions :

- a- évaporation sans pénétration dans le sol
- b- infiltration dans le sol
- c- ruissellement de surface

Selon l'intensité ou la quantité d'eau disponible dans les sols, l'eau peut être absorbée dans sa totalité, une partie peut être infiltrée et le reste stagne ou ruisselle. Habituellement, les sols sont caractérisés par l'intensité maximale de pluie admissible, sans ruissellement, (pour la région de Toulouse les ordres de grandeur sont de 6 à 8 mm/h - (Dubucq, 1989)).

En ce qui concerne leur couleur, les sols humides sont plus sombres que les sols secs, et une augmentation de l'humidité de surface des sols s'accompagne d'une diminution de leur réflectance

VII.2.2.2.b.2. La matière organique :

Les débris végétaux ou les résidus de récolte s'accumulent sur le sol et subissent une décomposition par voie biologique (humification) qui entraîne une destruction rapide de 72 à 85 % de matière organique. Les protéines sont dégradées et le rapport C/N diminue, l'humus apparaît. Cet humus est le responsable, par ses propriétés colloïdales, d'une partie de la résistance du sol aux processus d'érosion. Il contribue aussi à la coloration du sol. Il peut lui donner de teintes foncées noirâtres, grisâtres ou brun foncé. En conséquence, l'humus a pour effet de diminuer la réflectance des sols dans toutes les bandes spectrales. Néanmoins, pour des taux de matière organique inférieur à 1.5 % l'effet tend à être masqué par d'autres composants tels que les couleurs induites par la présence de fer ou la teneur en eau superficielle.

VII.2.2.2.b.3. La granulométrie

La granulométrie s'exprime par la répartition relative de différentes particules de sol, définies par leurs diamètres extrêmes. Avec un seuil à 2 mm, les éléments grossiers (graviers (2 mm à 2 cm), cailloux (2 à 7.5 cm), pierres (7.5 à 25cm) et blocs (au-dessus de 25 cm)) sont différenciés des éléments fins, définissant la texture (argiles ($< 2\mu\text{m}$), limons (de 2 à 50 μm) et sables (de 0.05 à 2mm)).

1. Eléments grossiers (la pierrosité) : la réflectance des sols augmente avec la pierrosité de la surface du sol : l'énergie réfléchiée par les éléments grossiers est généralement plus importante que les ombres qu'ils occasionnent. Ces éléments peuvent être cachés par le travail du sol, par le labour, puis se montrer au fur et à mesure qu'ils sont lavés par l'eau.
2. Eléments fins (la texture) : Il existe une relation indirecte entre la réflectance et les éléments fins :
 - Les argiles souvent solidement liées à la matière organique ont une faible clarté, donc une réflectance généralement faible.
 - Les sables, généralement caractérisés par une forte clarté et une faible teneur en eau, présentent une réflectance relativement élevée.
 - Les limons, de par leur propriétés physiques, tendent à l'imperméabilisation du sol et son asphyxie. Leur abondance constitue un facteur d'instabilité de la structure. Ainsi, sous l'action de la pluie, la structure de surface des sols limoneux se modifie : de rugueuse elle devient lisse (croûte de battance) et se caractérise par une forte réflectance spectrale.

VII.2.2.2.b.4. Le calcaire

Pour des taux de calcaire totaux inférieurs à 10-20%, il n'y a pas d'influence du calcaire sur la réflectance. Par contre, au-delà de cette limite, plus la réflectance est grande, plus il y a de calcaire si les autres facteurs sont les mêmes.

Pour les valeurs dépassant 60 - 70% de calcaire, il y a peu de différences de réflectance, et sur les images et photographies aériennes, il y a saturation dans les valeurs très fortes.

VII.2.2.2.b.5. Le fer

La réflectance des sols diminue avec l'augmentation de la teneur en fer.

Il semble qu'en dessous de 2 à 3 %, la teneur en fer n'intervienne pas sur le signal et lorsqu'elle est supérieure à 15 % , la réflectance est faible.

VII.2.2.2.b.6. La couleur

Les couleurs sont estimées et codifiées grâce à la charte de couleur « Munsell Soil Color Chart », cela afin d'éliminer toute dénomination trop personnelle ou subjective. On indique pour chaque couleur les caractéristiques suivantes :

- la teinte dominante (hue) : couleur spectrale dominante
- la pureté (value) : paramètre quantifiable qui correspond à la proportion de balance ou de noir entrant dans la composition de la teinte.
- l'intensité (chroma) : force de la couleur spectrale

La couleur de surface du sol a fait objet de nombreuses études à la fin des années 80 et au début des années 90 (Escadafal, 1993; Escadafal et al., 1988a; Escadafal et al., 1988b; Huete et Escadafal, 1991). Elle est le résultat de l'intégration de plusieurs facteurs telles que la matière organique, le fer, le calcaire, l'humidité,...

VII.2.2.2.b.7. La rugosité

La rugosité de surface dépend de facteurs extrinsèques tels que la microtopographie ou les travaux culturaux et de facteurs intrinsèques comme les fentes, les croûtes ferrugineuses, la structure du sol, la battance. Quelle qu'en soit l'origine, la rugosité modifie la réflectance en fonction de la quantité d'ombre saisie par le capteur. Ainsi, plus une surface est rugueuse, plus sa réflectance est faible.

VII.2.3. L'étude de la variabilité des sols par télédétection

VII.2.3.1. La réflectance des sols et sa variabilité

La réflectance des sols est donc un intégrateur d'un grand nombre de facteurs- intrinsèques et extrinsèques- difficilement séparables ; il est en effet difficile d'imputer à un seul élément ces variations de la réflectance, car il s'agit d'une combinaison d'effets présents à l'instant de la mesure par le capteur (Michot, 2003). En conséquence, **ce n'est pas la valeur de la réflectance ou sa mise en relation avec ces facteurs qui est analysée ici mais les variations spatiales de la réflectance du sol, observées par télédétection.**

Ces variations sont plus facilement appréhendables dans le domaine du visible : il est très important en agriculture de précision de savoir comment les propriétés varient au sein des parcelles (Frogbrook et Oliver, 2000). Une image satellite du sol nu est un excellent moyen d'étudier les variations de couleur au sein d'une parcelle : une image ne permet pas de dire quel type de sol est observé mais il est possible d'établir les limites d'un changement de sol en regardant les variations de sa couleur (sans prendre en compte les problèmes liés aux pixels mixtes).

Dans ce chapitre nous allons donc nous intéresser principalement à la structure spatiale – l'agencement dans l'espace ou *pattern* – du sol observé par télédétection. Mais afin

d'étudier cette structure spatiale, il est nécessaire d'abord de différencier les parcelles en sol nu de parcelles en végétation. Au sein des parcelles en sol nu il faut ensuite identifier celles présentant le vrai *pattern* (ou *pattern* naturel du sol) d'un *pattern* qui serait le fruit d'artefacts anthropiques tel que l'irrigation. Nous présentons une méthode, basée sur la géostatistique et l'analyse diachronique des images, permettant l'identification du « vrai » *pattern* de sol parcellaire.

VII.2.3.2. Télédétection et géostatistique

La géostatistique apporte un outil, le variogramme, permettant la description de la structure spatiale d'une variable régionalisée (Curran et Atkinson 1998). La mesure de télédétection est sensible aux caractéristiques de surface des sols. La combinaison des deux outils, la télédétection et la géostatistique, est une solution adéquate à l'étude de la variabilité spatiale du sol. L'analyse de la distribution de variabilité spatiale (Tourinho-Soto et al., 2004) peut être reliée aux propriétés permanentes du sol (Kerry et Oliver, 2003). Néanmoins trois points doivent être considérés dans l'utilisation combinée de la géostatistique et de la télédétection :

- 1- La propriété d'observation (ex. végétation) et la variable observée (ex. NDVI)
- 2- La dimension spatiale (le support ou pixel)
- 3- La dimension temporelle (date et nombre d'observations).

Avant la présentation de chacun de ces points, nous allons introduire le variogramme expérimental d'une image, où la distance minimale est celle d'un pixel, qui n'est pas considéré comme un point. Pour une image, on ne parle pas de variogramme ponctuel, c'est un variogramme résultant des valeurs prises sur une surface donnée, l'IFOV (« Instantaneous Field Of View »). On parle d'un variogramme régularisé (Woodcock et al., 1988a). Cette « IFOV » est l'une des caractéristiques fondamentales des images de télédétection (Woodcock, 1987). Parmi les différentes définitions de résolution spatiale (Forshaw, 1983), nous faisons ici référence à la surface au sol à partir de laquelle les valeurs de l'image sont obtenues, c'est-à-dire, la plus petite composante d'une image, le pixel (Atkinson et Aplin, 2004; Dungan, 2001).

Pour une résolution spatiale donnée, l'estimateur du variogramme pour une bande k est :

$$\gamma_k(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [CN_k(x_i) - CN_k(x_i + h)]^2$$

où CN_k est le compte numérique dans cette bande et $N(h)$ le nombre des paires de distance, à une distance h (Chica-Olmo et Abarca-Hernandez, 1998). Mais cette distance h est

normalement la distance prise pour toute direction, omnidirectionnelle - cas b de la Figure VII-7. Néanmoins, en télédétection une approximation est très souvent faite ; h est alors considéré la distance prise dans la direction orthogonale (celle des pixels) et seulement deux distances sont alors prises en compte – cas a de la Figure VII-7. L'exactitude de l'approximation est dépendante de l'isotropie ou anisotropie des données. Pour vérifier si le variogramme est très sensible au type de « h » considéré, on peut le calculer dans les deux directions orthogonales – cas b de la Figure VII-7- et voir si la différence avec le variogramme omnidirectionnel est significative.

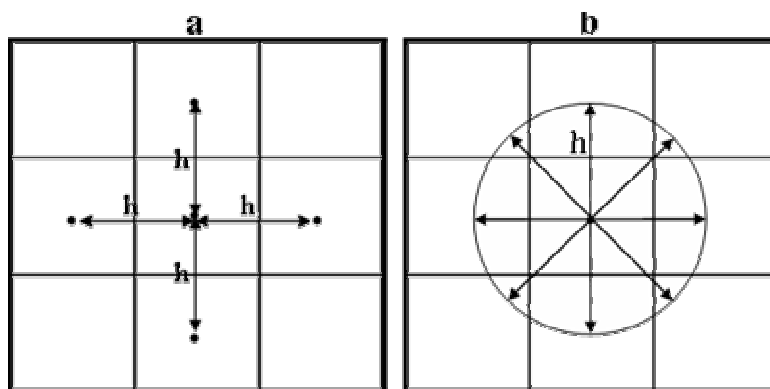


Figure VII-7- Méthode de calcul pour le variogramme : a) Orthogonal et b) Omnidirectionnelle

Sur la Figure VII-8 nous avons représenté le variogramme pour les deux directions. Le comportement diffère selon l'étendue. Ainsi pour nos images, à l'échelle du paysage – cas 1) de la Figure VII-8, la superposition des variogrammes indique qu'il n'y a pratiquement pas de différence entre le cas a et le cas b : utiliser le cas a pour cette étendue n'induit pas d'erreurs significatives pour le calcul du variogramme. Néanmoins à l'échelle de parcelle, une certaine anisotropie, montrée par la non superposition des variogrammes, indique le besoin de s'orienter vers l'utilisation du variogramme omnidirectionnel.

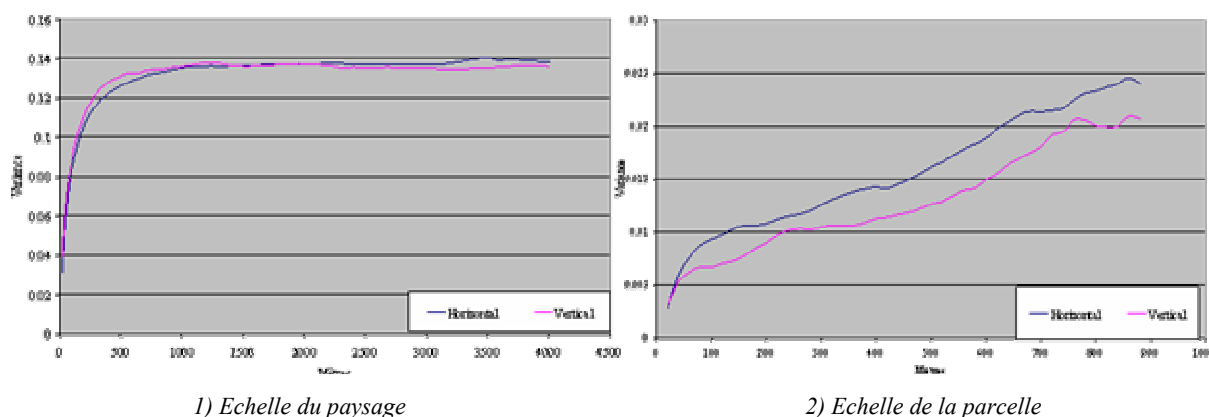


Figure VII-8- Variogramme directionnel - Horizontal et Vertical à deux échelles différentes : l'échelle du paysage et l'échelle de la parcelle

Concernant l'interprétation du variogramme des images de télédétection sur une zone régulière, les travaux de référence à ce sujet remarquent les points suivants (Curran, 1988; Woodcock et al., 1988a; Woodcock et al., 1988b) :

- a- Le pallier (sill), est relié à la proportion de la surface couverte par des objets, qui est une fonction de son nombre ou densité
- b- La portée (range) est reliée à la taille des objets de l'image, plus en terme de surface qu'en terme de forme
- c- La forme du variogramme est reliée à la variance de la taille des objets de l'image.
- d- Augmenter la taille de pixel a plusieurs effets sur la variogramme :
 - La hauteur du variogramme est réduite
 - La portée augmente
 - La hauteur du variogramme, pour la distance égale à un pixel (relatif à l'effet pépité), augmente par rapport au pallier.

Le point d , relatif à la variation spatiale, ainsi que les autres caractéristiques évoquées précédemment sont maintenant présentés en 3 points :

VII.2.3.2.a. La propriété d'observation et la variable observée :

La propriété d'observation fait ici référence à la surface (la végétation, l'urbain, l'eau, etc) et la variable observée est la variable utilisée pour observer cette propriété (la réflectance dans une bande, le compte numérique, un indice de végétation, un indice de sol, etc). Dans notre étude, la propriété d'observation est principalement le sol. Pour l'observation du sol comme nous verrons dans l'évolution de cette thèse nous utiliserons comme variable, représentant le sol, un indice de sol.

Les deux termes, propriété et variable, seront utilisés ici indistinctement, ainsi nous parlerons de changement de propriété en faisant référence au changement de la variable observée.

La Figure VII-9 montre les variogrammes expérimentaux pour une série de variables. Ces variables correspondent aux réflectances dans les bandes b1 (vert), b2 (rouge), b3 (PIR) et aux deux indices qui sont définis plus loin dans ce rapport. Ces indices sont : un indice de sol (l'indice de brillance), et de végétation (NDVI). Les variogrammes ont été calculés sur un extrait de l'image SPOT de mars 2002, d'étendue de 23440 m², pour une distance maximale de 8 km et par pixel (20 mètres). Les différences de la variance du variogramme entre les différentes bandes et indices, observables sur cette figure, ont déjà été remarquées par d'autres auteurs : la variance de la radiance est

dépendante de la longueur d'onde (Atkinson et Curran, 1997; Chavez, 1992). Toutefois, malgré ces différences des variances, la structure globale du variogramme – dépendant de la forme et taille des objets- est – au niveau parcellaire et non au niveau objet - la même parce que « heureusement les gros objets présents dans une images sont communs pour toutes les variables et longueurs d'onde » (Curran, 1988).

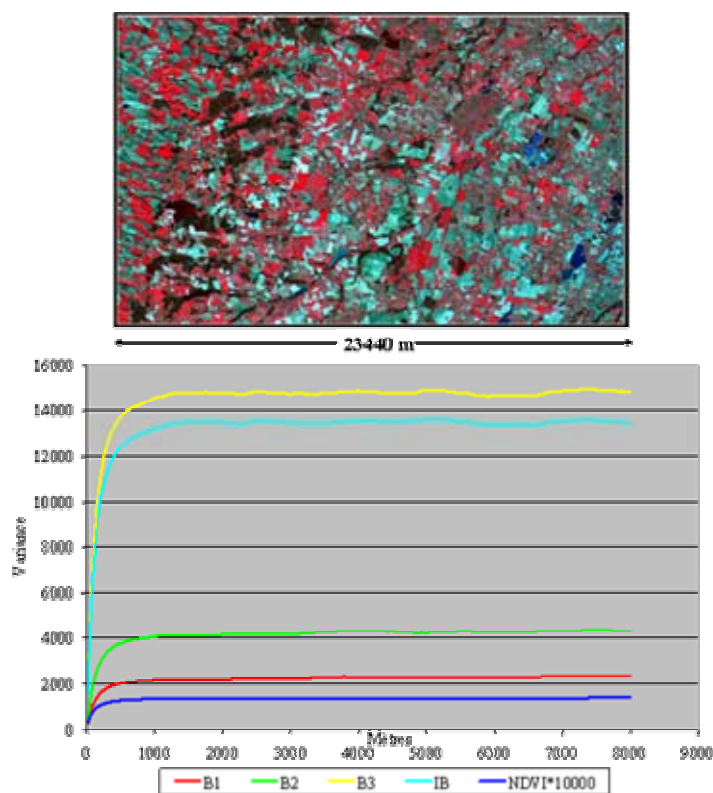


Figure VII-9- Variogramme théorique à l'échelle du paysage pour cinq variables différentes

VII.2.3.2.b. La dimension spatiale :

Les influences des échelles de support et étendue sur le variogramme doivent être comprises et prises en compte lors de l'utilisation de la géostatistique en télédétection :

- i. Taille du support – Comme nous avons dit précédemment, la taille de support, résolution ou taille de pixel est un sujet très étudié dans le domaine de la géostatistique appliquée à la télédétection. La Figure VII-10 illustre l'effet de l'agrandissement de la taille du support sur le variogramme. Cet effet se caractérise par un aplatissement du variogramme (diminution de la rapidité pour atteindre le palier et de la valeur du palier) au fur et à mesure de la dégradation de la résolution de l'image (de la taille du pixel). Cela exprime une plus faible corrélation spatiale et donc une moindre information pour des résolutions plus faibles (Ramstein, 1989)

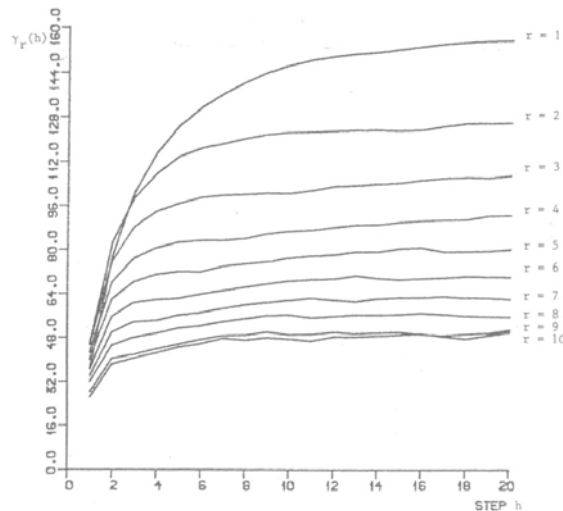


Figure VII-10 : Variogramme de $r = 1$ (30 m) à $r = 10$ (300m): effet du changement du support. D'après Ramstein et Raffy (Ramstein, 1989)

- ii. Taille de l'étendue – La différence de l'étendue sur le variogramme est due à l'utilisation d'une série de données différentes lors le calcul du variogramme. Pour une étendue plus petite, le nombre de couples lors du calcul du variogramme est inférieur. L'appréciation visuelle de cet effet a été montrée sur la Figure VII-8 par la réalisation d'un variogramme à l'échelle du paysage (grande étendue) et de la parcelle (petite étendue).

La combinaison d'un changement d'étendue (du paysage à la parcelle) et d'un changement de support (de 10 m à 20 m) sera réalisée dans la méthode d'identification du vrai *pattern* (cf. chapitre VIII). Nous aurons l'occasion de développer une réflexion sur l'ordre de réalisation de ces changements : faut-il faire d'abord un changement d'étendue suivi d'un changement du support ou l'inverse ?.

VII.2.3.2.c. La dimension temporelle :

L'observation d'une variable peut être réalisée par le suivi de l'évolution temporelle de la réflectance, ou des indices (indices de végétation, du sol, etc). A l'échelle d'une étendue (parcelle, paysage, etc), l'évolution du variogramme peut caractériser une propriété.

Ces trois aspects sont reliés entre eux, il s'agit d'étudier une propriété (le sol), via une variable (l'indice de brillance) pour une étendue (la parcelle) et un support donné (le pixel de 20 m) et pour une date ou série donnée (dates de prise des images). Il faut donc prendre en compte le fait que les résultats vont être différents selon la propriété, étendue et support observés.

VIII. Identification du « vrai *pattern* » du sol

La télédétection des sols est complexe du fait des effets des propriétés du sol et de leurs interactions. Néanmoins la variabilité spatiale et sa structure spatiale, plus que la valeur de la réflectance, peuvent être utiles pour aider à l'échantillonnage des sols ou à la définition de zones de modulation en agriculture de précision (Leon et al., 2003; Seelan et al., 2003). A l'échelle de la parcelle, l'analyse du sol, en l'absence de végétation, permet de distinguer les images présentant un *pattern* de sol « artificiel », résultat des résidus de récolte ou de l'irrigation de celle présentant un « vrai *pattern* » du sol. L'hypothèse selon laquelle le « vrai *pattern* » du sol est temporellement stable à l'échelle d'étendue de la parcelle permet sa différenciation du « *pattern* artificiel ». Cette stabilité temporelle significative a été observée précédemment (Muller et James, 1994). En conséquence, l'identification dans une analyse diachronique d'un *pattern* similaire indique la présence dans les images du « vrai *pattern* » de sol.

L'approche méthodologique est présentée dans la Figure VIII-1. Dans un premier temps il est nécessaire de différencier les parcelles en sol nu des parcelles en végétation sur l'ensemble des images. Ensuite nous présenterons la méthode d'identification du « vrai » *pattern* à l'échelle de la parcelle et les résultats obtenus sur quelques parcelles.

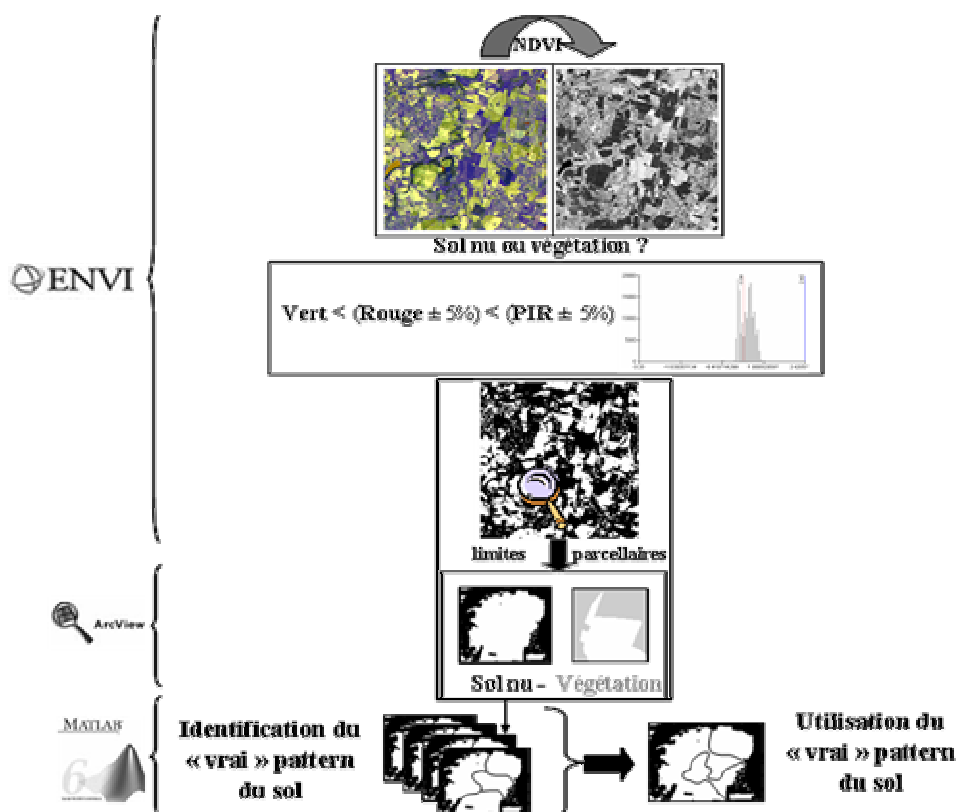


Figure VIII-1- Approche méthodologique : Différenciation du sol nu de la végétation et identification du "vrai" *pattern*.

VIII.1. Identification du sol nu

La réponse spectrale d'un couvert végétal montre une forte réflectance dans le proche infrarouge et une faible réflectance dans le rouge. Ces domaines de longueurs d'onde sont donc très utilisés car la différence de réflectance dans ces deux bandes spectrales dépend des caractéristiques chlorophylliennes de la végétation (Laporterie, 2002). Une relation entre ces deux bandes permet de calculer un indice de végétation, le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):

$$NDVI = \frac{PIR - R}{PIR + R} \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} \text{NDVI : Normalized Difference Vegetation Index} \\ \text{PIR = Bande du proche infrarouge} \\ \text{R= Bande du rouge} \end{array}$$

Les indices sont des analyses multivariées, c'est-à-dire, des traitements élaborés à partir de plusieurs canaux. Il s'agit souvent d'opérations mathématiques visant soit à réduire la somme d'informations et/ou à mettre en évidence des thèmes particuliers (végétation, sols ...). Le NDVI, comme la plupart des indices de végétation, est une fonction de la réflectance dans le rouge et le proche infrarouge (Gilabert et al., 2002).

Pour séparer le sol nu de la végétation, nous avons suivi la méthode basée sur le seuillage de l'histogramme des valeurs du NDVI (Muller et James, 1994).

Comme pour le découpage des altitudes et des pentes (Gaddas, 2001), on procède au repérage sur les histogrammes de distribution du NDVI des pics d'effectifs qui indiquent le passage vers une autre entité. La Figure VIII-2 montre l'image du NDVI d'une partie de la zone (à gauche) et l'histogramme des valeurs de NDVI (milieu). Sur cet histogramme, deux pics séparés par un creux montrent bien le point de changement entre végétation et sol nus (au milieu). Entre ces deux et impossible à associer à l'une ou l'autre classe se trouvent les pixels mixtes. L'analyse de l'histogramme permet donc de différencier les sols nus de la végétation (Muller et James, 1994). La valeur seuil de NDVI est, dans cet exemple, de 0.35 (Figure VIII-2).

Nous avons implémenté un filtre basé sur la distribution de la courbe de réflectance des sols. Cette courbe croît avec la longueur d'onde. Nous avons sélectionné les pixels de la classe sol nu qui doivent respecter la condition suivante: $\text{Vert} < (\text{Rouge} \pm 5\%) < (\text{PIR} \pm 5\%)$, soit : la valeur de la réflectance dans la bande du vert doit être inférieure à celle dans le rouge qui doit elle-même être inférieure à celle dans le PIR

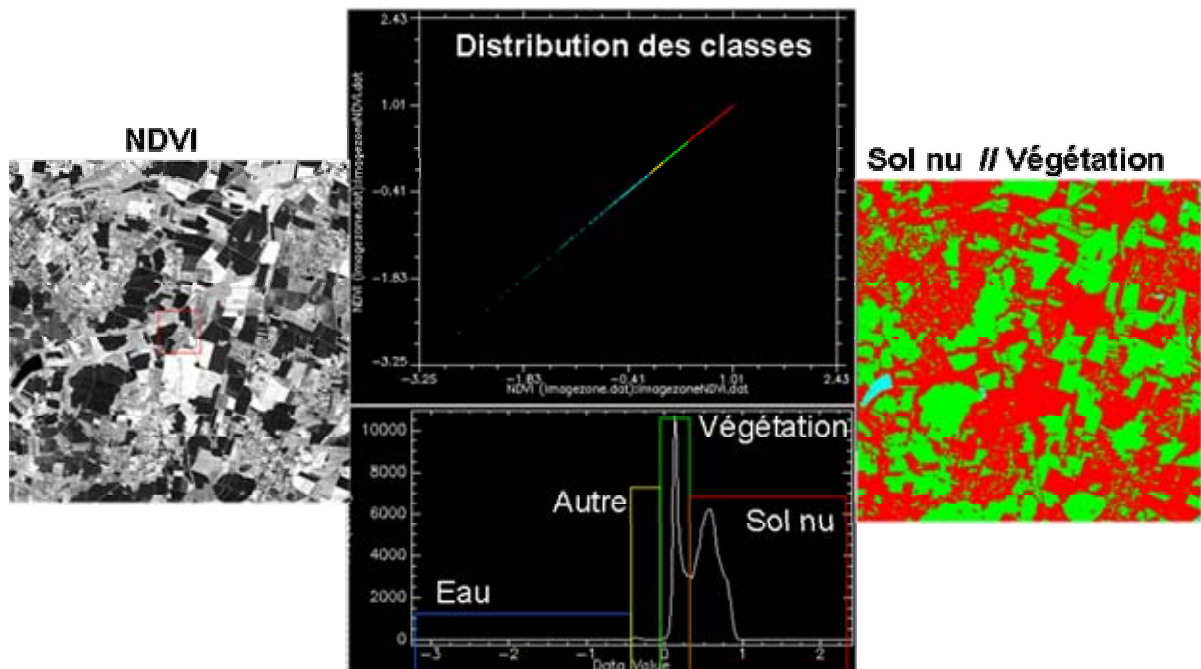
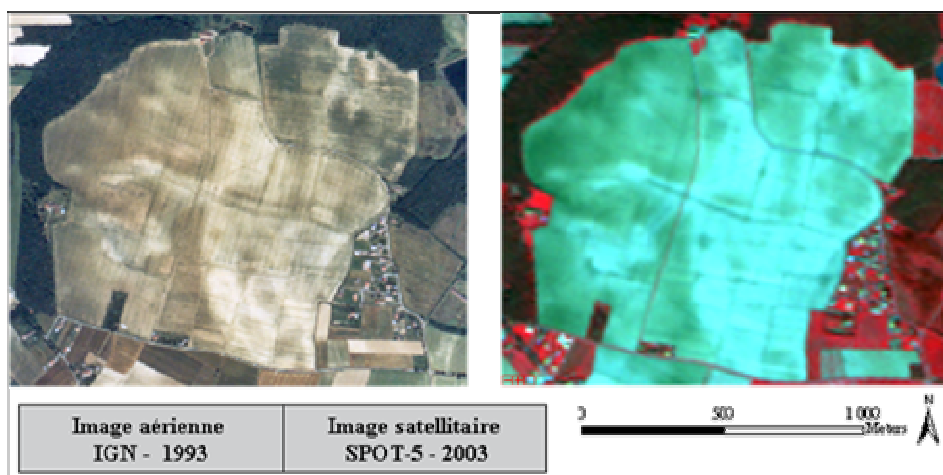


Figure VIII-2- Séparation sol nu et végétation

VIII.2. Identification du « vrai » *pattern*

VIII.2.1. Introduction

Nous pouvons observer, dans la Figure VIII-3, deux images de la parcelle du lieu dit du « Piton » en sol nu, prises à 10 ans d'intervalle. L'image de gauche est une photo aérienne (IGN) de 1993, et l'image de droite correspond à une image SPOT 5 (10 m de résolution) acquise en 2003. Sur ces images, on peut observer que l'agencement dans l'espace, le *pattern*, des zones d'ombres et des zones claires est le même sur les deux images : le *pattern* du sol nu présente une stabilité dans le temps.

Figure VIII-3- Observation de la stabilité temporelle du *pattern* d'une parcelle du bassin versant du Touch entre 1993 et 2003.

Il est donc possible de considérer que le *pattern* observé dans ces images correspond au « vrai *pattern* » du sol et non pas à un artefact. On peut alors vérifier si, dans la zone ainsi

décrite, le sol ne possède pas une propriété caractéristique ou n'induit pas un comportement particulier des plantes cultivées à cet endroit.

Le « vrai *pattern* » n'est pas systématiquement observable. La Figure VIII-4 montre deux images SPOT, à 20 mètres de résolution, d'une même parcelle en sol nu, acquises à un mois d'intervalle. Sur l'image du mois d'avril, à droite, on observe une zone très sombre, inexistante au mois de mars. Cette zone provient de l'irrigation du pivot. L'image d'avril ne présente donc pas le « vrai *pattern* », il y a un artefact dans le *pattern* observé.

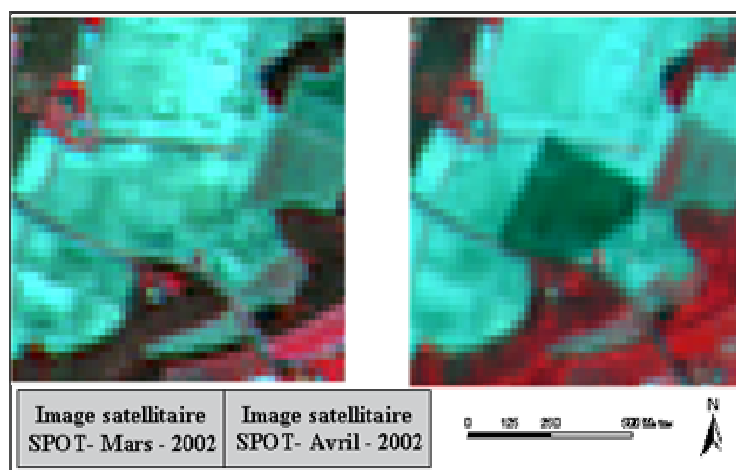


Figure VIII-4- *Pattern* « artificiel »

Il est donc nécessaire de pouvoir faire la distinction entre un *pattern* temporellement stable, défini ici comme le « vrai *pattern* » de la parcelle et un autre type de *pattern*, résultant, par exemple, de l'ombre portée d'un nuage, de l'irrigation sur une partie de la parcelle, des résidus de la récolte ou d'autres facteurs.

Nous posons comme hypothèse que, dans une parcelle, l'existence d'un *pattern* de sol stable temporellement, correspond à une caractéristique particulière du sol de cette parcelle. Notre objectif est alors de mettre au point une méthode d'identification semi-automatique de ce *pattern*, appelé ici « vrai *pattern* ».

VIII.2.2. Zone d'étude

La zone d'étude correspond au bassin versant du Touch qui a été présenté dans le chapitre V.1.2. Concrètement nous avons sélectionné un échantillon de 20 parcelles cultivées en maïs en 2002 et distribuées sur le bassin versant – à l'exception d'une parcelle - comme l'illustre la Figure VIII-5.

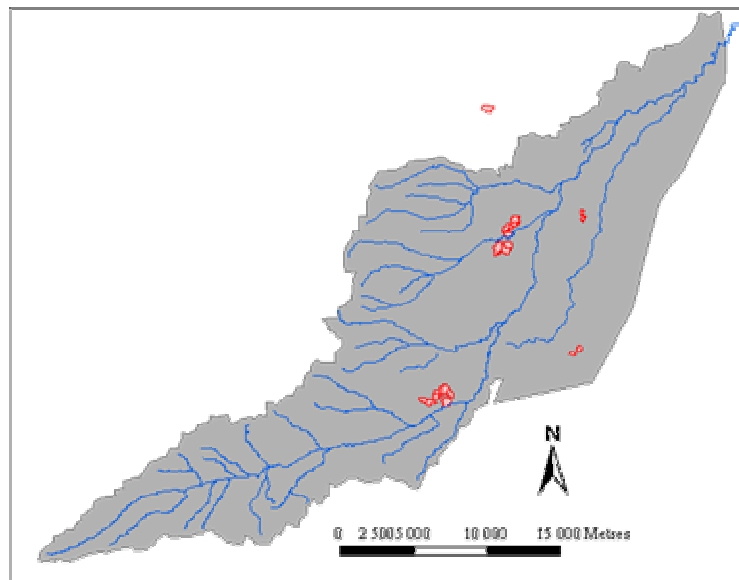


Figure VIII-5- Zone d'étude: Parcelles cartographiées

VIII.2.3. Matériel et méthodes

La

Figure VIII-6 développe l'approche retenue pour analyser la corrélation temporelle du *pattern* des parcelles, permettant d'identifier le « vrai » *pattern* du sol. La partie en filigrane correspond à la deuxième étape du processus, c'est-à-dire, la comparaison du *pattern* identifié avec le *pattern* des cartes de rendement correspondant (§ Chapitre suivant). L'approche présentée sur cette figure est placée sous les axes des échelles d'étendue et de support pour ainsi identifier les variables atteintes par le changement d'échelle.

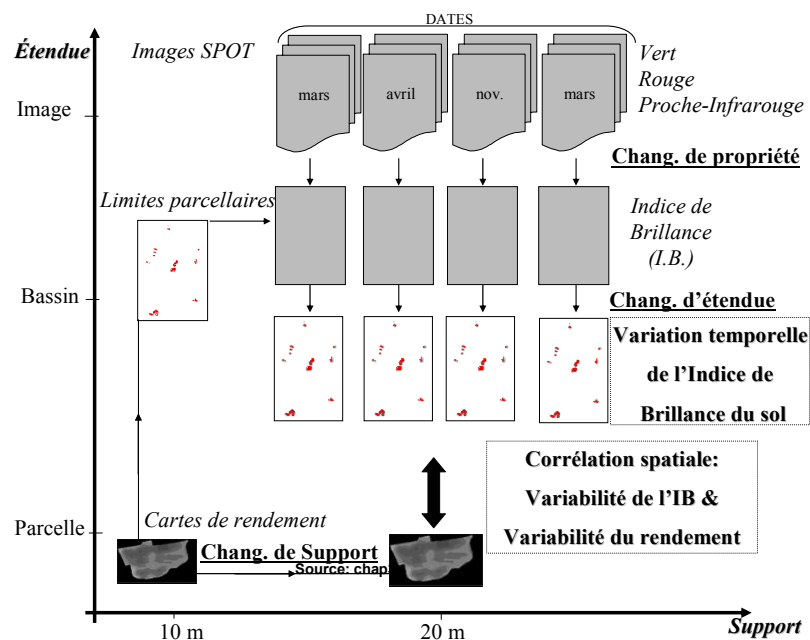


Figure VIII-6- Méthodologie- Identification du « vrai *pattern* »

VIII.2.3.1. Données

VIII.2.3.1.a. Limites parcellaires

Pour être sélectionnées les parcelles doivent remplir deux conditions :

- 1- une surface moyenne adaptée à la résolution des images (375 pixels pour la surface moyenne). Cette relation entre la résolution et la taille de la parcelle est bien adaptée lors du calcul du variogramme, qui nécessite un nombre de couples par distance suffisamment important.
- 2- d'une carte de rendement. Pour être ensuite mise en relation avec le « vrai *pattern* » identifié.

Vingt parcelles ont été sélectionnées. Ces parcelles, cultivées en maïs, et distribuées sur l'ensemble du bassin, ont été moissonnées avec une moissonneuse batteuse équipée d'un dGPS permettant la localisation des limites parcellaires.

La taille moyenne des parcelles est d'environ 15 ha ; le Tableau VIII-1 présente la taille et l'identifiant des 20 parcelles sélectionnées.

Field_ID	129	130	131	132	133	134	135	137	138	139	140	142	143	146	147	148	152	157	160	166
Surf.(ha)	20.9	38.8	29.5	27.5	17.1	7.40	9.0	13.8	20.0	19.0	35.7	14.3	19.7	13.6	9.20	19.0	23.2	8.90	7.90	13.9

Tableau VIII-1 Parcelles étudiées et leur surface en hectares

VIII.2.3.1.b. Données de télédétection

De la série temporelle disponible (Tableau VII-1), nous avons sélectionné les quatre images pour lesquelles les parcelles sont classées en sol nu. Ces images furent prises le 21 mars 2002, le 23 avril 2002, le 22 novembre 2002 et le 3 avril 2003. Elles ont été acquises par les capteurs de deux satellites différents (capteur HRVIR pour SPOT 4 et capteur HRV pour SPOT 2) nous avons donc sélectionné les bandes spectrales communes aux deux capteurs (B1 (vert: $0.50 - 0.59 \mu\text{m}$), B2 (rouge: $0.61 - 0.68 \mu\text{m}$), et B3 (proche infrarouge: $0.78 - 0.89 \mu\text{m}$). Les longueurs d'onde des trois bandes sont les mêmes pour les deux capteurs.

Les valeurs de précipitation, au cours des 10 jours précédents l'acquisition de l'image sont présentées Tableau VIII-2. Un jour avant la prise des images d'avril 2003 et de novembre 2002 6 mm de précipitations ont été enregistrés. Cela aura une influence sur la réflectance du sol nu : en effet un accroissement de l'humidité superficielle du sol provoque une diminution de la réflectance.

[illegible]

03 Avril 2003	0.0	0.0	0.0	0.0	8.6	1.2	0.0	0	2.8	6.6	0.0	19.2
---------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---	-----	-----	-----	------

Tableau VIII-2- Conditions climatiques 10 jours avant l'acquisition des images

VIII.2.3.1.c. Processus de changement d'échelle et de propriété

Trois changements ont été réalisés sur les données de télédétection afin de pouvoir mettre en place la méthode : un changement de propriété, un changement d'étendue et un changement de support.

Changement de propriété : le changement de propriété, ou de variable, consiste à convertir les réflectances en indice. Il existe un certain nombre d'indices, dits « Indices de sols » (Tableau VIII-3), pour la caractérisation des sols.

INDICE	FORMULE	SOURCES RECENTES (non exhaustives)
<i>Indice de brillance (1)</i>	$(B_2^2 + B_3^2)^{1/2}$	(Carré, 2002; Dubucq, 1989; Pouchin, 2001)
<i>Indice de brillance (2)</i>	$[(B_1^2 + B_2^2 + B_3^2)/3]^{1/2}$	(Mane et al., 1997)
<i>Indice de cuirasse</i>	$3.B_1 - B_2 - 100$	(Pouchin, 2001)
<i>Indice de couleur</i>	$(B_2 - B_1) / (B_2 + B_1)$	(Carré, 2002; Mane et al., 1997; Wassenaar, 2001)
<i>Indice de rougeur</i>	B_2^2 / B_1^3	(Mane et al., 1997; Mathieu et al., 1997)
<i>Indice de contenu en eau</i>	B_3/B_1	(Mougenot et al., 1990)

où : B_1 = canal du vert ; B_2 = canal du rouge & B_3 = canal du proche-infrarouge

Tableau VIII-3- Indices de sols

Parmi ces indices, l'indice le plus répandu est l'indice de brillance. Il traduit les changements de clarté des sols nus. Le passage de teintes sombres aux teintes claires s'accompagne d'une augmentation simultanée des valeurs radiométriques dans les deux canaux (rouge et proche infrarouge), canaux définissant la « Droite de sols » (Baret et al., 1993).

L'utilisation de cet indice de brillance présente deux avantages : i) La possibilité de passer de trois variables (les bandes) à une seule (un indice) et ii) l'IB a déjà montré de bons résultats pour les sols de la région : « l'indice de brillance est le paramètre le plus significatif déterminant du comportement hydrique des sols, selon l'hypothèse où le sol se ressuie d'autant plus que l'IB. est fort (Dubucq, 1989) ». Le Tableau VIII-4 résume les valeurs de moyenne, écart-type et coefficient de variation de l'IB sur les 20 parcelles pour les 4 images.

ID Field	21 Mars 2002			23 Avril 2002			22 Novembre 2002			03 Avril 2003		
	Moy. I.B.	E-Type I.B.	C.V. I.B.	Moy. I.B.	E-Type I.B.	C.V. I.B.	Moy. I.B.	E-Type I.B.	C.V. I.B.	Moy. I.B.	E-Type I.B.	C.V. I.B.
129	122.20	10.36	8.48	229.82	15.34	6.68	137.95	5.54	4.02	111.07	7.46	6.72
130	127.05	20.52	16.15	218.67	20.46	9.36	142.32	7.04	4.94	101.22	10.02	9.90
131	160.69	20.72	12.89	274.17	27.04	9.86	154.09	7.68	4.98	122.81	7.65	6.23
132	190.15	11.45	6.02	279.73	10.81	3.86	151.35	9.42	6.23	137.73	7.75	5.63
133	201.47	9.99	4.96	282.57	11.98	4.24	153.92	11.77	7.65	138.14	6.73	4.88
134	208.13	12.87	6.18	278.69	11.49	4.12	152.69	14.74	9.66	140.59	8.93	6.35
135	206.96	13.67	6.60	284.57	7.51	2.64	154.59	3.20	2.07	137.35	7.71	5.61
137	198.49	11.61	5.85	275.43	15.30	5.56	136.50	9.07	6.64	122.58	6.73	5.49

138	195.77	21.59	11.03	267.08	25.31	9.48	137.57	24.24	17.62	106.49	16.92	15.89
139	204.55	8.64	4.22	284.19	12.41	4.37	153.90	8.55	5.56	109.31	8.92	8.16
140	145.79	11.36	7.79	253.01	16.64	6.57	95.07	9.00	9.47	116.59	6.29	5.40
142	161.98	17.45	10.77	176.44	44.25	25.08	151.07	8.97	5.94	107.59	5.74	5.33
143	184.40	21.34	11.57	250.42	12.00	4.79	151.82	5.24	3.45	109.87	4.89	4.46
146	183.87	20.01	10.88	255.59	12.44	4.87	172.85	16.13	9.33	114.91	7.39	6.43
147	158.73	21.86	13.77	227.58	15.70	6.90	151.28	11.55	7.64	104.57	8.74	8.36
148	205.33	19.71	9.60	273.97	18.07	6.59	164.87	19.94	12.09	128.91	9.04	7.01
152	141.84	20.40	14.38	212.17	44.14	20.80	162.99	6.88	4.22	115.87	6.39	5.51
157	134.99	31.17	23.09	239.22	5.16	2.16	171.07	11.28	6.59	118.26	4.61	3.89
160	114.33	9.08	7.94	230.94	5.32	2.30	176.89	4.78	2.70	117.72	5.14	4.37
166	136.63	24.73	18.10	190.07	10.57	5.56	168.17	12.72	7.57	97.74	3.76	3.85

où Moy =moyenne ; E.Type= Ecart-type ; C.V.=Coefficient de Variation et B.I.= Indice de brillance

Tableau VIII-4- Statistique descriptive de l'indice de brillance pour les images sélectionnées.

Changement d'étendue : les limites parcellaires, en opposition aux images satellites, ne sont pas une donnée continue sur l'ensemble du bassin versant. Il est donc nécessaire de masquer la zone hors parcelle, ce simple processus de changement d'échelle est défini comme « singling out » (Bierkens et al., 2000).

Changement de support : parmi les images disponibles, l'image d'avril 2003 présente un support de 10 m par 10 m, différent de celui des autres images (20 m par 20 m). Pour établir des corrélations spatiales et/ou temporelles entre deux variables il est nécessaire que la taille du support soit identique. En conséquence un processus de « upscaling » ou agrégation sur l'image 2003 s'avère nécessaire. En télédétection le variogramme d'une variable comme l'indice de brillance, d'une réflectance ou d'un code numérique, est défini pour une taille de support donnée. Un modèle de régularisation permet ensuite de changer de taille de pixel. Le processus de régularisation est représenté par l'intégrale suivante (Atkinson 2001) :

$$Z_v(x) = \frac{1}{v} \int Z(x) dx$$
 où $Z(x)$ représente une variable spatiale, l'indice de brillance pour cette étude, observée à une échelle de support (eg 10 m) et $Z_v(x)$ est la même variable observée à une taille de support v , plus large (e.g., 20 m). La formulation de ce processus de régularisation peut être aussi :

$$Z_v^*(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i(x)$$
 ici $Z(x)$ pour le pixel v , (i.e., Z_v) est estimé par Z_v^* , une simple moyenne locale calculée à l'échelle du support v (Colombo et al., 2004).

Cette approche n'est pas complètement exacte à cause du PSF (Point Spread Function) du capteur (Garrigues, 2004), mais l'approximation est suffisante dans ce type d'analyse (Chica-Olmo et Abarca-Hernandez, 1998).

En ce qui concerne le **calcul du variogramme, l'ordre des changements** (changement d'étendue avant ou après le changement de support) doit être prise en compte. La

Figure VIII-6 représente la méthodologie abordée. Sur l'image SPOT 5 à 10 mètres de résolution, un changement de propriété est réalisé pour obtenir l'indice de sol. Ensuite deux possibilités sont envisagées :

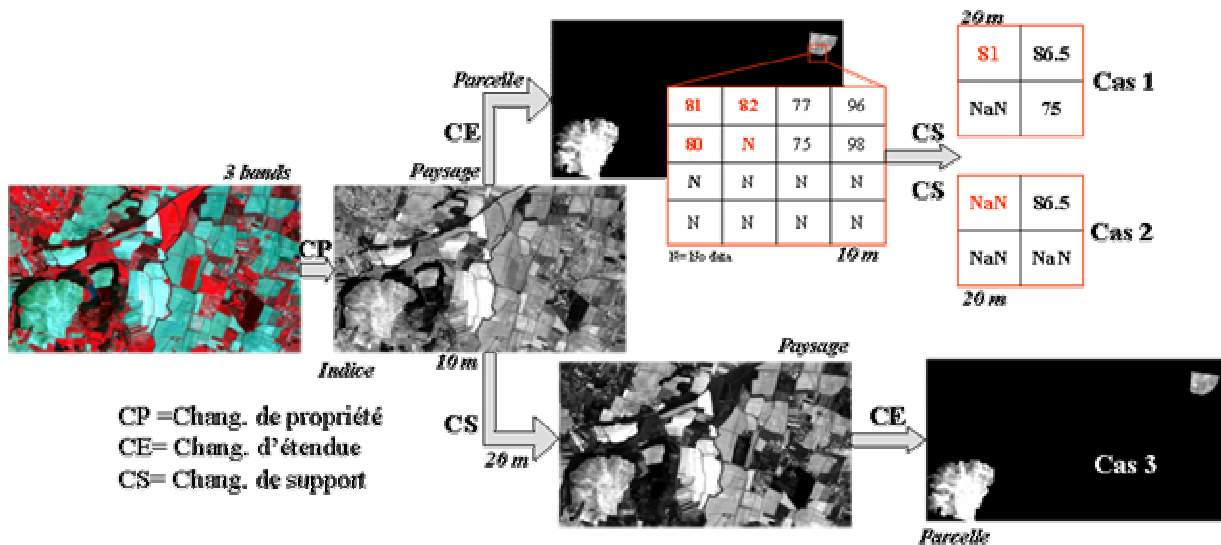


Figure VIII-7- Changement de support: Techniques

- 1- [Chemin supérieur (flèche CE) de la Figure VIII-7]. Dans un premier temps on applique un masque, un changement d'étendue, pour n'avoir que les parcelles sélectionnées. Ce masque va transformer notre donnée continue, le paysage, en donnée discrète, la parcelle. Cette discrétisation implique l'existence de « No Data » autour des parcelles. Dans le processus de régularisation (calcul de la moyenne locale sur les 4 pixels de 10 m) définissant la nouvelle taille de support (20 m), la moyenne sur de valeurs en « No Data » est « No Data » - cas 2 de la Figure VIII-7. Il est possible aussi de programmer la fonction de la moyenne pour qu'elle ne soit calculée qu'en prenant les pixels différents de « No data » - cas 1 de la Figure VIII-7. La Figure VIII-8 illustre la différence entre les deux cas : en bordure de parcelle le « cas 2 » présente un certain nombre de pixels en « No data » (NaN) ayant de valeurs dans le cas 1, ces pixels sont représentés en rouge dans la Figure VIII-8. Dans les résultats, nous verrons si cela a une répercussion sur le variogramme.

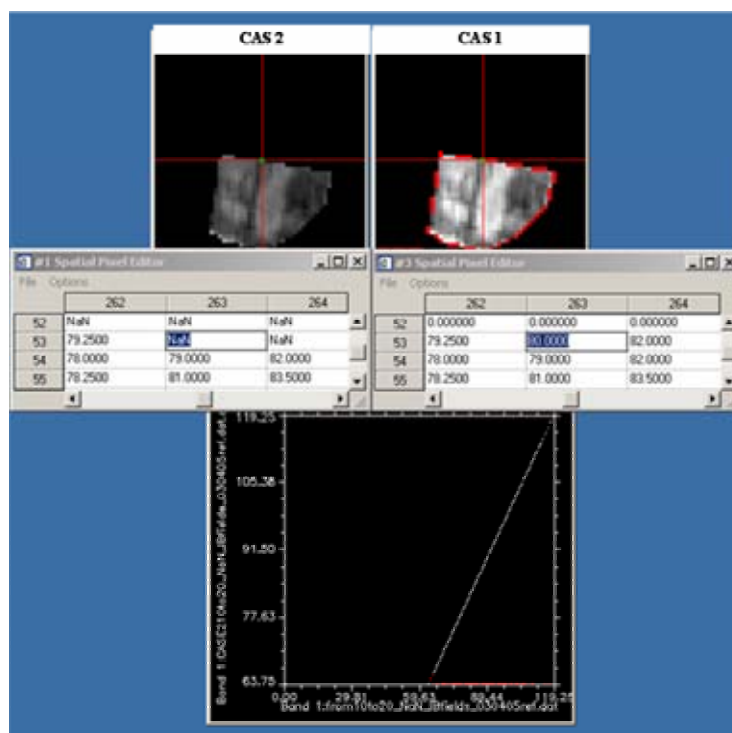


Figure VIII-8- Changement de support: Résultats

- 2- [Chemin inférieur (flèche CS) de la Figure VIII-7]. Réalisation dans un premier temps de la régularisation (changement de support) pour passer de 10 m à 20 m. Ceci implique que pour les pixels en bordure d'une parcelle de sol nu située à coté d'une forêt, la valeur du pixel régularisé (la moyenne de pixels en sol nu et de pixels en végétation) est un pixel mixte et non de sol nu.

Les résultats des variogrammes issus des trois cas possibles pour les deux parcelles sont présentés sur la Figure VIII-9. La parcelle en bas à gauche de la Figure VIII-7 correspond à la « Parcelle 1 », et la parcelle en haut à droite correspond à la « Parcelle 2 ». Le variogramme en jaune représente le cas 3, ce variogramme présente une variance plus élevée, due aux valeurs de mélange sol nu - végétation (ou eau) résultants du processus de régularisation. Concernant la forme du variogramme, les cas 1 (en bleu) et 2 (en rose) sont très similaires. Ceci est dû à la faible perte des données dans le cas 1 par rapport au cas 2. En conséquence il est déconseillé d'utiliser le cas 3 quand on ne s'intéresse qu'à une propriété d'observation (dans notre cas, le sol), car cette méthode rajoute de la variabilité.

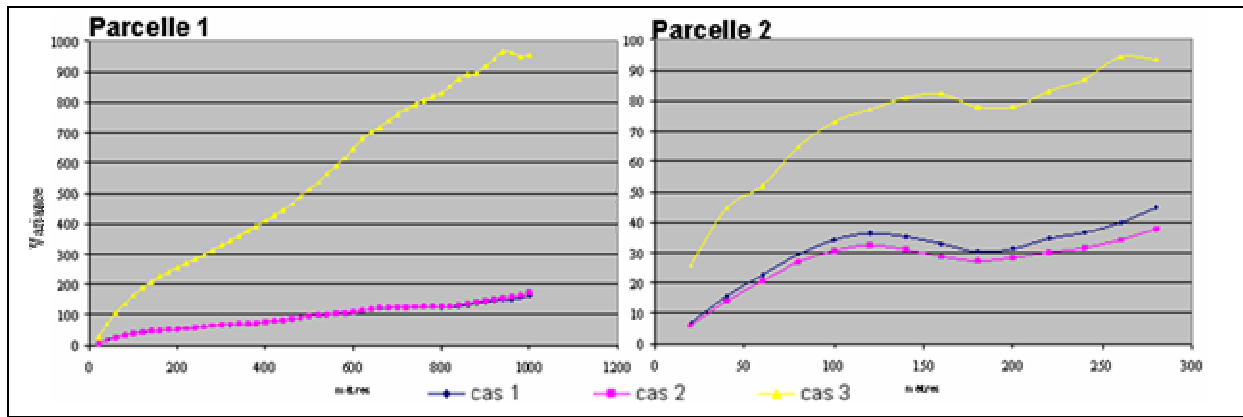


Figure VIII-9- Variogrammes des trois cas possibles de changement de support pour les deux parcelles

Dans la suite de notre étude, le processus de régularisation de l'image SPOT 5 de 10 mètres à 20 mètres a été réalisé suivant le **cas 1**, évitant ainsi la perte de données. Cette perte de données peut être significative dans le cas de petites parcelles pour le calcul du variogramme.

Normalisation : pour l'inter comparaison de *pattern* la normalisation des données assure :

- la non dépendance des *patterns* de l'échelle de mesure
- la possibilité de comparaison entre des données ayant des unités différentes, telles que l'indice de brillance en télédétection et le rendement (Stein et al., 1997).

La normalisation est obtenue ainsi :

$$ST_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}}{s} \quad \text{où } s \text{ est l'écart type et } \bar{X} \text{ la moyenne de la variable } X. \text{ Après cette}$$

transformation le *pattern* spatial n'est pas affecté (Stein et al., 1997).

La normalisation de l'IB a un sens à partir du moment où on ne s'intéresse pas à l'échelle de mesure, c'est-à-dire à la variabilité de la valeur, mais à sa distribution spatiale. Cette normalisation n'ayant pas d'impact sur le *pattern* spatial (Stein et al., 1997), elle permet de vérifier si le pattern est stable dans le temps.

VIII.2.3.2. Méthode

L'hypothèse fondamentale de l'analyse en statistique classique est l'indépendance des observations. Mais les structures spatiales (ou « patches » en anglais). rencontrées dans la nature présentent souvent des gradients Cette hypothèse d'indépendance des observations n'est donc souvent pas vérifiée à des échelles d'échantillonnage données (Gustafson, 1998). En opposition à la statistique classique, la géostatistique autorise l'analyse de données spatiales, non indépendantes. L'utilisation du coefficient de co-dispersion permet de

sélectionner, dans une série temporelle d'images, les images présentant le « vrai *pattern* » parcellaire.

VIII.2.3.2.a. Coefficient de co-dispersion

Formulation : En statistique classique pour étudier la corrélation entre deux variables le coefficient de corrélation linéaire est couramment utilisé. Pour les variables u et v le coefficient de corrélation ρ est défini :

$$\rho = \frac{C_{uv}}{\sigma_u \sigma_v} \in [-1, +1]$$

Où σ_u et σ_v sont les écarts types de u et v respectivement et C_{uv} la covariance des variables u et v :

$$C_{uv} = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (u_i - m_u) - (v_i - m_v) \quad \text{où } u_i \text{ et } v_i \text{ sont les valeurs de } u \text{ et } v \text{ pour } i \text{ et } m_u \text{ et } m_v \text{ sont les moyennes de } u \text{ et } v \text{ respectivement.}$$

Reprenant cette formulation, en statistique spatiale, à partir du variogramme γ et du variogramme croisé (« cross-variogramme » ρ (cf. I.3.1.2)), il est possible de construire le coefficient de co-dispersion :

$$\rho_{uv}(h) = \frac{\gamma_{uv}(h)}{\sqrt{\gamma_{uu}(h) \gamma_{vv}(h)}} \in [-1, +1]$$

qui peut être interprété comme un coefficient de corrélation linéaire entre des incrémentations spatiales des deux variables étudiées (Goovaerts, 1997).

Ce coefficient est symétrique ($\rho_{uv}(h) = \rho_{vu}(h)$) et il est préférable au cross-corélogramme pour décrire les corrélation croisées (Webster et Oliver, 2001).

Interprétation : Le graphique du coefficient de co-dispersion en fonction de la distance indique la corrélation de deux variables en fonction de leur distance (Goovaerts, 1997). L'interprétation de ce graphique est délicate ; les trois caractéristiques principales (forme, degré de corrélation et signe) nécessitent d'être explicitées :

- un **signe** positif indique que les deux variables varient dans le même sens. Une augmentation (diminution) d'une des variables « u » de la position « x » à « $x+h$ » est associée à une augmentation (diminution) de la variable « v ». Inversement, un signe négatif indique que les variables varient de façon opposée (Goovaerts, 1998).
- comme pour le coefficient de corrélation linéaire, une **forte corrélation** correspond aux valeurs extrêmes, 1 ou -1, tandis que les valeurs autour de 0 traduisent une absence de corrélation

- La **forme de la courbe** montre la corrélation « structurelle » entre les deux variables. Dans l'hypothèse d'un modèle de co-régionalisation linéaire, les variables sont générées par un même groupe de processus physiques aux différentes échelles (Goulard et Voltz, 1992). Cela implique que si le coefficient de co-dispersion est constant pour toute distance alors la variable ne dépend pas de l'échelle spatiale mais du processus (Lajaunie et Wackernagel, 2000; Wackernagel, 1995).

Illustration : Avant de proposer une méthode d'aide à la sélection des images présentant le vrai *pattern* parmi l'ensemble de couples d'images, nous allons illustrer le calcul du coefficient de co-dispersion. Pour cela trois parcelles présentant des situations différentes ont été sélectionnées.

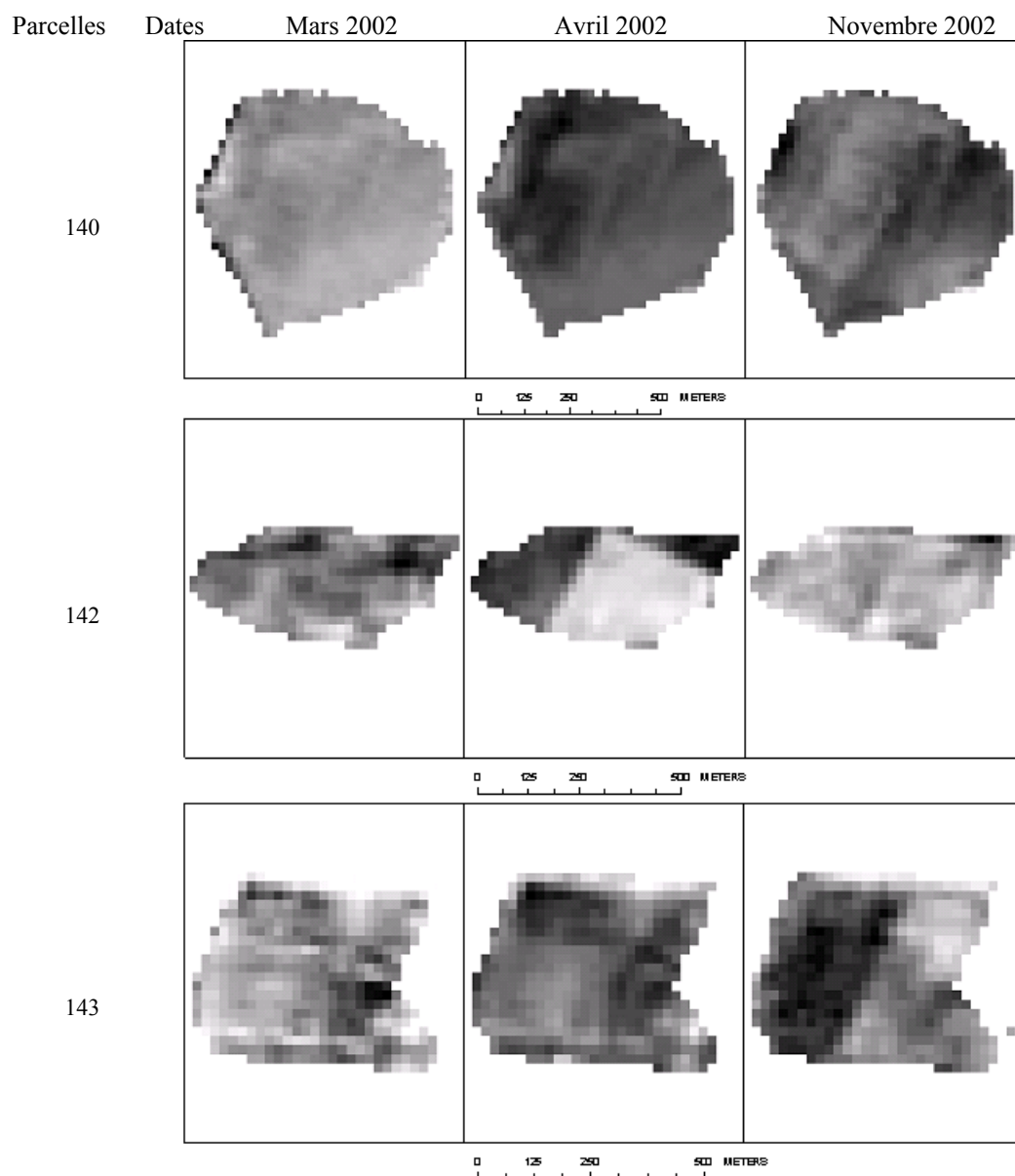


Figure VIII-10 Images de l'indice de brillance des trois parcelles sélectionnées, les parcelles 140, 142 et 143 (du haut vers le bas) pour les trois dates : mars, avril et novembre 2002 (de gauche à droite) – noir : faible valeur de l'IB / blanc : forte valeur de l'IB

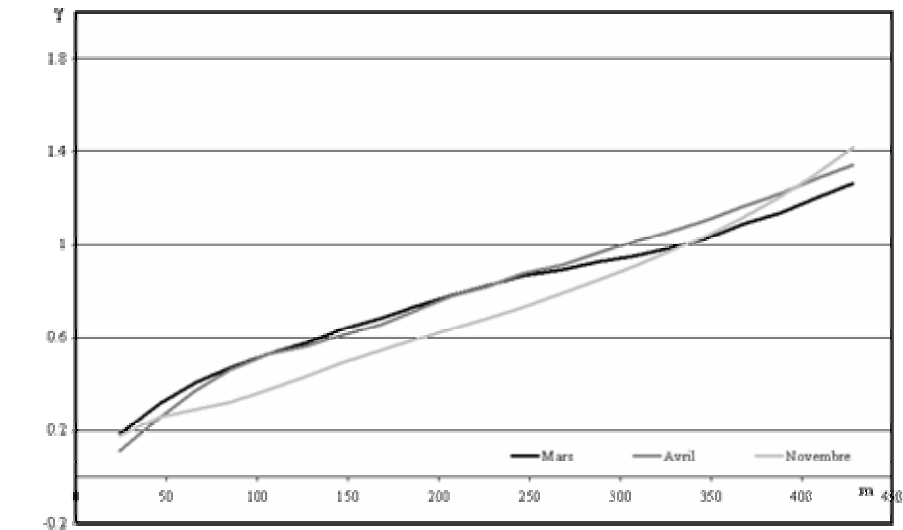
La Figure VIII-10 montre ces 3 parcelles (140, 142 et 143) pour les 3 dates (mars, avril et novembre 2002) :

- la parcelle 140, située sur la partie supérieure de l'image, présente des valeurs d'indice de brillance différentes entre mars et avril, par contre la distribution spatiale de ces valeurs (le *pattern*) pour ces deux dates est similaire, contrairement au mois d'octobre où la répartition spatiale des *patches* diffère.
- la parcelle 142 présente trois *patterns* très distincts. Le *pattern* d'avril présente notamment une zone triangulaire en son centre provoqué par le passage du pivot d'irrigation.
- la parcelle 143 présente un comportement proche de celui de la parcelle 140 : sur les deux premières dates un *pattern* similaire est observé alors qu'il diffère significativement pour la dernière date. En effet l'image de novembre (dernière date) est divisée en deux parties, partie récoltée et non récoltée.

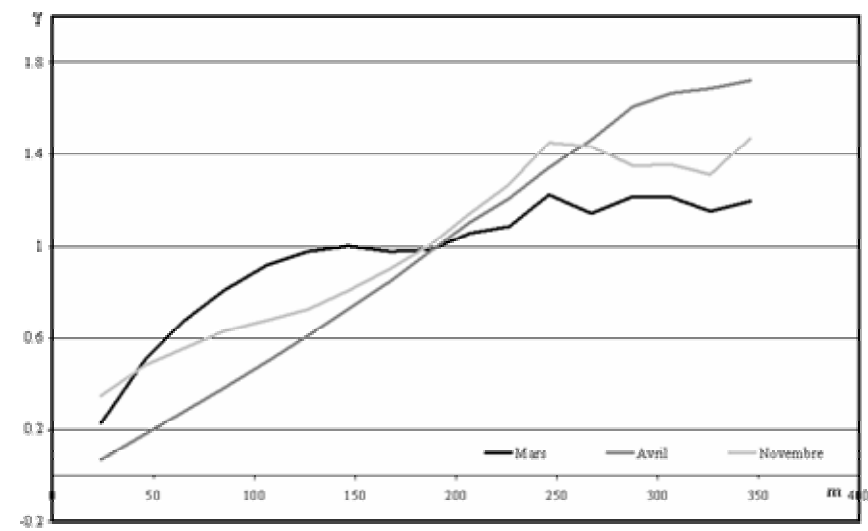
A partir de ces images, les variogrammes et variogrammes croisés par parcelle ont été calculés. La Figure VIII-11 présente les variogrammes des trois parcelles. Pour chacune, les trois courbes correspondent aux dates d'images dont nous disposons :

- Pour la parcelle 140, deux des trois variogrammes, ceux de mars et d'avril, se ressemblent beaucoup pour des distances moyennes mais présentent des valeurs différentes pour les courtes et longues distances.
- La parcelle 142 présente trois variogrammes différents.
- Pour la parcelle 143, on peut remarquer la superposition des variogrammes

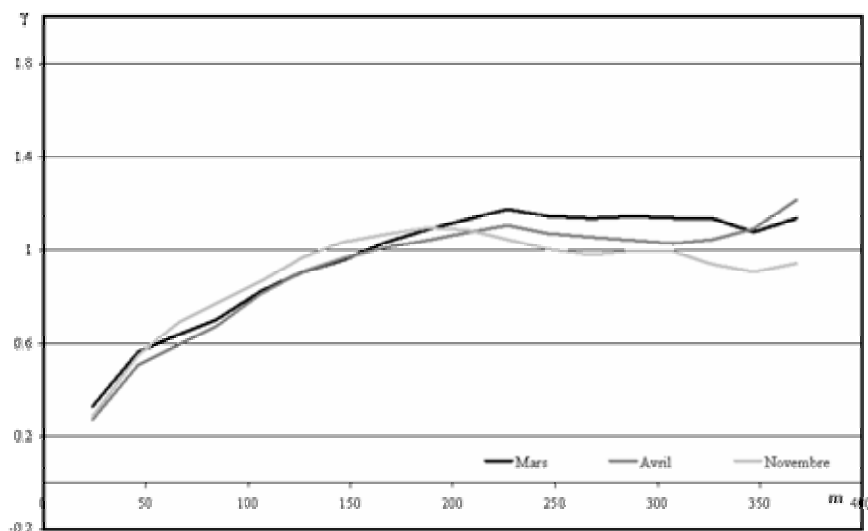
Cette superposition ou non superposition des variogrammes est en relation directe avec les remarques faites sur les images de la Figure VIII-10.



Parcelle 140



Parcelle 142



Parcelle 143

Figure VIII-11 Variogramme de l'indice de brillance de mars, avril et novembre pour les trois parcelles : 140 (haut), 142 (milieu) et 143 (inférieur)

En ce qui concerne les variogrammes croisés illustrés de la Figure VIII-12, il est intéressant de remarquer les valeurs fortement négatives du couple Mars-Novembre de la parcelle 142. Les valeurs négatives du variogramme croisé sont dues aux deux zones très différenciées en réflectance, donc aux deux *patches*, remarquables sur l'image de novembre de la parcelle 142 dans la Figure VIII-10.

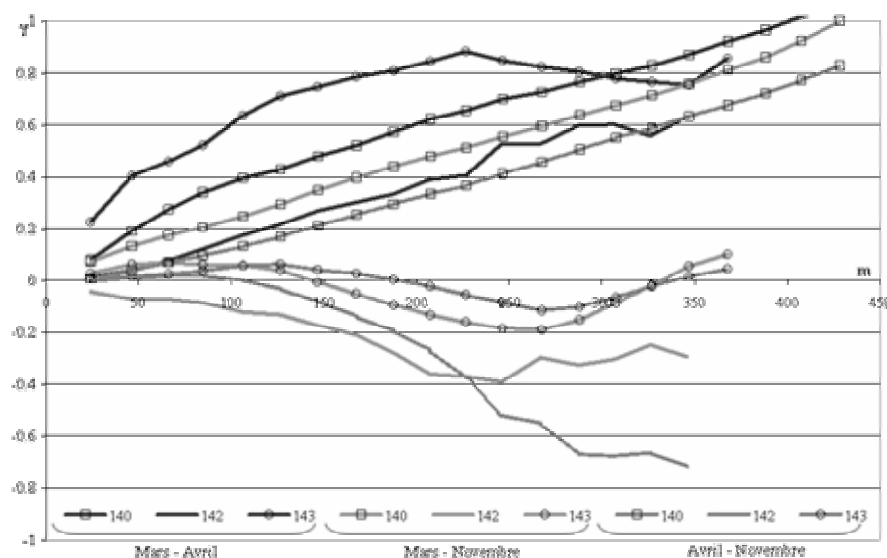


Figure VIII-12 - Variogramme croisé pour les trois parcelles illustrées

Le calcul du coefficient de co-dispersion à partir des variogrammes et variogrammes croisés donne le résultat de la Figure VIII-13

Si on compare ces résultats quantitatifs aux résultats qualitatifs résultant de la comparaison visuelle des *patterns* de la Figure VIII-10, on voit que :

- pour le couple d'images Mars-Avril de la parcelle 140, où il existait une différence des variogrammes pour les courtes et longues distances, le coefficient de co-dispersion n'est pas plat (structures pas tout à fait égales) et atteint des valeurs moyennement élevées (supérieures à 0.5)
- pour la parcelle 142, aucune bonne corrélation n'a été trouvée. Un vrai *pattern* n'a pu être identifié sur aucun couple d'images. Cela malgré la disponibilité d'une image après le semis, une image durant les premières irrigations et une troisième image après la récolte.
- le couple d'images Mars-Avril de la parcelle 143 présente une bonne corrélation, proche de 0.8, donc on peut considérer que le *pattern* présent sur ces images est le « vrai *pattern* »,
- pour le reste des couples d'images les corrélations sont variables, avec de valeurs pour la plupart autour de (+/-) 0.2.

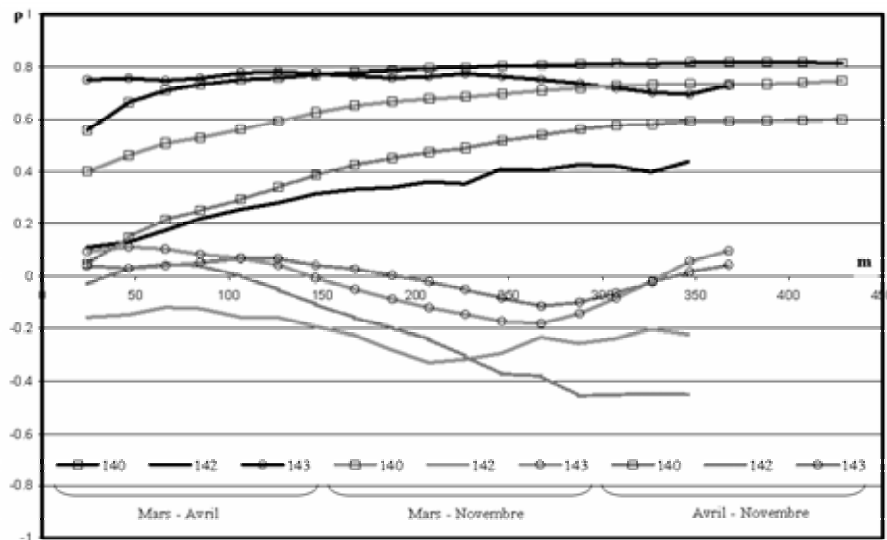


Figure VIII-13 - Coefficient de co-dispersion en fonction de la distance pour les parcelles illustrées.

La Figure VIII-13 illustre le résultat du passage, via le coefficient de co-dispersion, d'une identification visuelle des « vrais *patterns* » (Figure VIII-10) à une identification quantitative.

Ces graphiques font apparaître les difficultés d'analyse de ces corrélations spatiales en vue de l'identification des vrais *patterns* de sol. Dans les deux points suivants, nous présentons une méthode d'aide à la sélection de parcelles mise au point dans le cadre de cette thèse.

Critère de sélection : Un critère rapide, efficace et simple a été établi pour résumer le graphique du coefficient de co-dispersion. Il est basé sur l'identification des composantes mentionnées ci-dessus :

1. la moyenne arithmétique des valeurs est reliée au degré de corrélation et au signe,
2. pour identifier un *pattern* spatial stable, il est nécessaire de détecter l'aplatissement des courbes. L'écart type des valeurs de la courbe fournit cette information ; les courbes qui présentent un écart-type faible sont considérées relativement plates, c'est-à-dire, issues d'un *pattern* spatial stable

Identification : L'ACP (analyse en composantes principales) a été utilisée comme « outil d'aide à la décision » pour l'identification, à partir des critères de sélection, des images présentant le « vrai *pattern* » du sol pour une parcelle donnée. Sur le plan décrit par deux axes principaux, l'identification des parcelles présentant le vrai *pattern* est facilitée à l'aide de 4 courbes (ou réponses) dite de références. Ces 4 courbes, représentées sur la Figure VIII-14, correspondent aux comportements suivants : 1)

Fortement corrélée et plate → correspond à une parcelle avec le « vrai » *pattern* spatial -
 2) Fortement corrélé et variable → correspond à une parcelle avec différents *patterns* spatiaux - 3 et 4) Faiblement corrélé plate ou variable → aucune corrélation peut être faite entre les *patterns* observés.

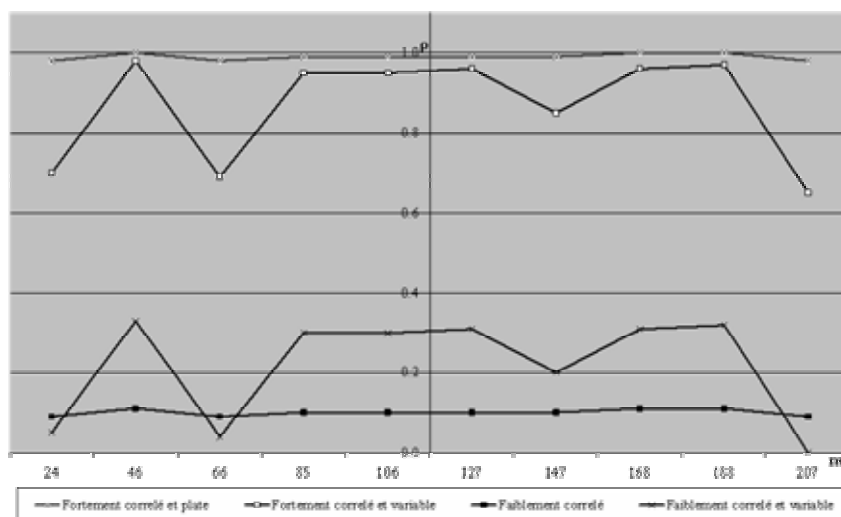


Figure VIII-14- Courbes de référence selon les deux premiers axes d'une ACP

Le choix des valeurs composant chacune des 4 courbes de référence a été arbitrairement fait, avec pour seule contrainte la représentation des 4 comportements caractéristiques.

VIII.2.3.2.b. Stabilité temporelle du pattern de l'indice de brillance

Le coefficient de co-dispersion et le graphique associé ont été calculés pour les 20 parcelles. La détection d'un signe positif, fortement corrélé et constant pour toutes les distances jusqu'à 200 mètres permet l'identification du *pattern* stable temporellement, c'est-à-dire, du « vrai *pattern* » du sol.

Pour chaque graphique les critères de sélection ont été calculés. Ces critères, moyenne et écart-type, ont été calculés en deux sections de 100 mètres ; fournissant ainsi 4 variables par courbe. L'ACP a été ensuite calculée sur les 4 variables des 20 individus représentant les parcelles et les 4 individus représentant les courbes de référence.

VIII.2.4. Résultats

La Figure VIII-15 présente le coefficient de co-dispersion, en fonction de la distance, entre l'indice de brillance pour les 6 paires d'images : Mars 2002 – Avril 2002 ; Mars 2002 – Novembre 2002 ; Mars 2002 – Mars 2003 ; Avril 2002 – Novembre 2002 ; Avril 2002 – Mars 2003 et Novembre 2002 – Mars 2003. Chaque courbe correspond à une parcelle. Une vision générale de cette figure permet de remarquer la forte corrélation (valeur proche de 1) et la stabilité (courbes plates) pour les paires d'images de Mars 2002 –Avril 2002 et Avril 2002 – Avril 2003. Inversement les paires Mars 2002 – Novembre 2002, Avril 2002 –

Novembre 2002 ; Novembre 2002 – Mars 2002 présentent de faibles corrélations et les courbes ne sont pas stables. Cette variabilité est provoquée par les données du mois de Novembre. L'image de Novembre a été classifiée en sol nu mais en fait les parcelles avaient été moissonnées quelques jours avant la prise de l'image. En conséquence le *pattern* observé ne correspond pas uniquement au sol nu mais à une mosaïque de sol nu et de résidus de récolte. Une analyse quantitative de ces ensembles de courbes reste longue et difficile. Nous leur avons appliqué la méthodologie d'aide à la décision basée sur l'ACP.

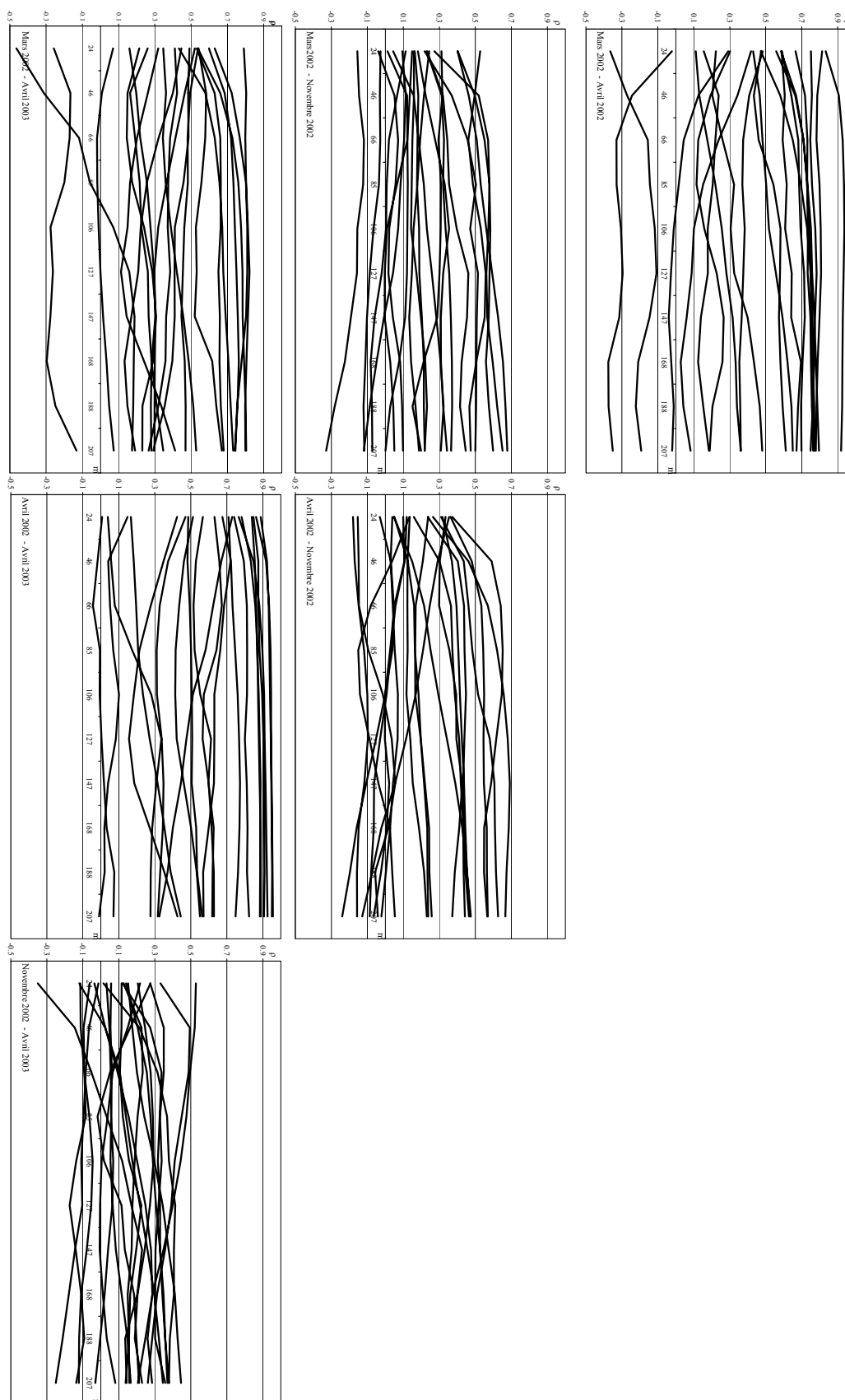


Figure VIII-15- Vision générale du coefficient de dispersion pour l'ensemble de couples d'images

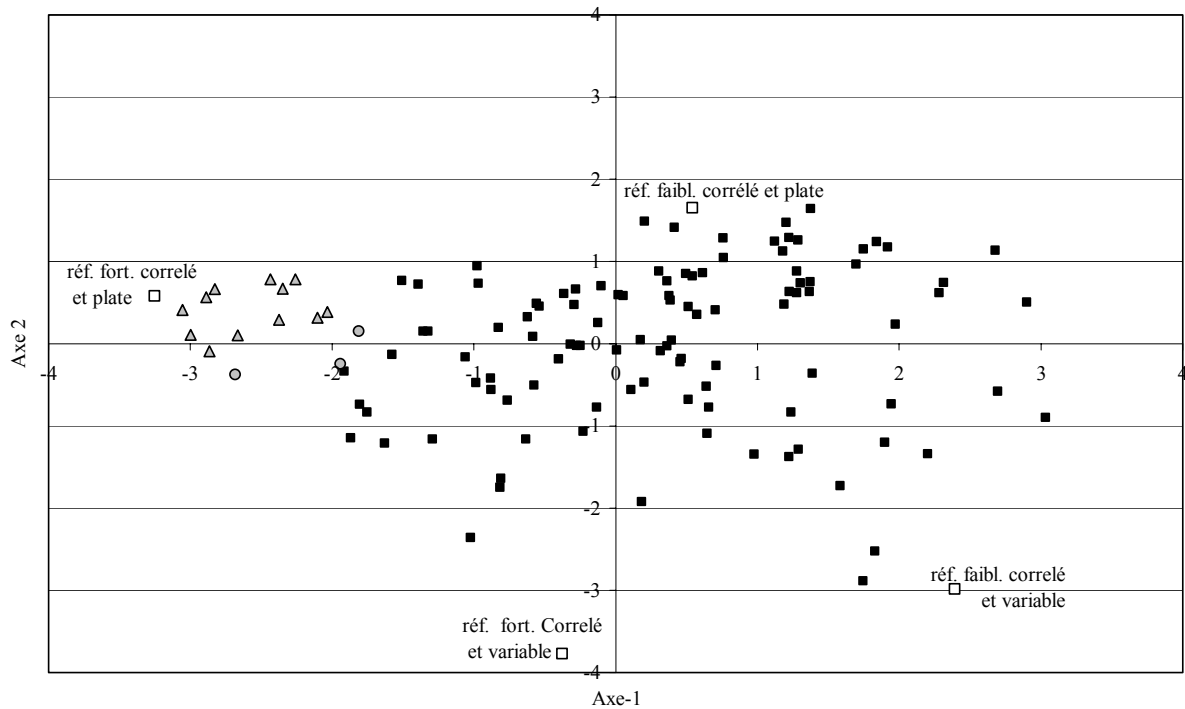


Figure VIII-16- ACP pour l'identification des images présentant le "vrai pattern" du sol.

- Ensemble de couples d'images (courbes)
- Courbes de références
- ▲ Courbes identifiées comme étant très proches de la courbe de référence d'intérêt
- Courbes identifiées comme étant proches de la courbe de référence d'intérêt

Pour aider à l'identification des images présentant le « vrai *pattern* » l'ACP a été réalisée avec les critères extraits de l'ensemble des courbes correspondant aux couples d'images et aux 4 courbes de références (Figure VIII-16). La Figure VIII-16 montre la position des individus (les courbes) sur les deux axes principaux, centrés à l'origine. Le premier axe de l'ACP explique 80% de la variance totale. La position de l'individu de la courbe de référence «fortement corrélé et plat» permet une identification aisée des individus où le *pattern* spatial doit être considéré comme temporellement stable (triangles et cercles sur la Figure VIII-16).

Le Tableau VIII-5 montre les 15 individus (triangles et cercles) sélectionnés à partir de l'ACP. Les 3 cercles, marqués par un astérisque sur le Tableau VIII-5, présentent, pour les 100 premiers mètres, un écart-type plus grand que les 12 triangles. Cette valeur élevée d'écart type provient d'un *pattern* spatial différent entre les paires d'images. Parmi les 15 individus sélectionnés, 8 correspondent au couple d'images d'Avril 2002 – Avril 2003, 4 au couple Mars 2002 – Avril 2002 et 3 au couple Avril 2002 – Avril 2003. Donc, des 4 images initialement disponibles, seul l'image de Novembre n'est pas présente comme image disposant des parcelles avec le « vrai *pattern* ». En conséquence, l'hypothèse selon laquelle la mosaïque sol nu - restes de végétation est présente sur l'image de Novembre - est ainsi

vérifiée. Les 12 individus identifiés (triangles sur la Figure VIII-16) correspondent à 10 parcelles différentes (les 2 individus restant correspondent à la même parcelle). Ainsi, pour la parcelle 143, le *pattern* stable est identifié sur les trois images, Mars 2002, Avril 2002 et Avril 2003. Vu que ces trois images présentent le vrai *pattern* du sol, le *pattern* de chacune des trois images sera comparé, dans le chapitre suivant, au *pattern* du rendement pour ainsi étudier la stabilité de la mesure.

ID Parcelle	Couples d'images	Moyenne-1**	Ecart-type-1**	Moyenne-2**	Ecart-type-2**
129	Avril 2002 - Avril 2003	92.44	2.12	94.86	0.30
130*	Avril 2002 - Avril 2003	86.02	5.69	91.84	0.61
130	Mars 2002 - Avril 2002	71.61	2.89	75.10	1.19
131	Avril 2002 - Avril 2003	84.35	3.81	88.48	0.45
131*	Mars 2002 - Avril 2003	69.56	5.90	75.34	0.82
138	Mars 2002 - Avril 2002	79.74	1.33	79.11	1.19
139	Avril 2002 - Avril 2003	72.71	3.22	76.44	0.99
140	Avril 2002 - Avril 2003	92.09	3.45	95.13	0.36
142*	Mars 2002 - Avril 2003	74.69	7.32	77.79	2.90
143	Avril 2002 - Avril 2003	87.50	1.72	90.69	0.20
143	Mars 2002 - Avril 2003	80.18	0.83	80.74	1.02
143	Mars 2002 - Avril 2002	75.77	1.10	76.90	0.95
147	Mars 2002 - Avril 2002	90.81	4.36	92.66	0.50
148	Avril 2002 - Avril 2003	86.06	1.41	88.48	0.17
166	Avril 2002 - Avril 2003	79.43	3.10	81.22	0.84

*: Individus (parcelles) autour des ind. sélectionnés.

** : valeur multiplié par 100

Tableau VIII-5- Individus sélectionnés à partir de l'ACP

Concernant le nombre d'apparition d'une image dans les couples d'images des individus sélectionnés : l'image de Mars 2002 est présente pour 5 paires d'images, Avril 2002 pour 10 images paires et Avril 2003 sur 8. En conséquence, on peut considérer que l'image d'Avril 2002, où il y a un plus grand nombre de parcelles avec le « vrai *pattern* », est l'image où la surface de sol est moins perturbée par l'action de l'homme. **Cette date peut être considérée comme la plus adéquate des dates disponibles pour étudier le sol nu sur des parcelles en maïs.** D'autre part, malgré les pluies enregistrées le jour d'avant et les 10 jours précédant l'acquisition de l'image d'avril 2003, cette image présente le « vrai *pattern* » pour un bon nombre de parcelles. Ceci peut être considéré comme un signe de robustesse de la méthode et montre aussi l'intérêt de ne pas s'intéresser à la valeur de la réflectance mais aux structures spatiales traduites par le variogramme-covariogramme via le coefficient de co-dispersion pour étudier la stabilité temporelle.

VIII.3. Discussion et conclusion

L'utilisation de la méthode proposée permet d'identifier les images où le vrai *pattern* de sol est présent. Basée sur une analyse diachronique des parcelles en sol nu (identifiées préalablement) et en utilisant la géostatistique et l'ACP comme outils d'aide à la décision, cette méthode a permis, sur 20 parcelles et avec 4 images, de sélectionner les couples

d'images présentant le vrai *pattern* pour 10 des 20 parcelles. Parmi les 4 images initialement utilisées, une des images, celle de novembre, n'a jamais présenté de bonnes corrélations spatio-temporelles. Ces mauvaises corrélations sont certainement dues à l'existence d'autres structures spatiales telles que les chaumes de maïs présents à cette époque (protection des sols contre la battance en hiver). La méthode a donc permis de différencier une image considérée initialement en sol nu des autres. Les autres avantages de la méthode sont les suivants :

- elle se base sur le variogramme mais sans ajuster de modèles variographiques. Cela permet, d'une part d'éviter la lourdeur du processus d'ajustement, et d'autre part de ne pas dépendre des décisions à prendre dans ce genre de modélisation donc de limiter la subjectivité de la méthode.
- l'utilisation de l'ACP est un bon support d'aide à la décision pour les choix des couples d'images présentant le vrai *pattern*. La représentation spatiale des couples d'images par rapport aux parcelles de référence permet de proposer une typologie du comportement des structures.
- Le fait qu'elle soit basée sur des données de télédétection implique qu'elle peut être utilisée sur un grand nombre de parcelle, dépendant seulement de l'étendue de l'image et des besoins en temps de calcul.

Néanmoins, un certain nombre de limitations existent :

- Concernant la construction du variogramme expérimental, il est nécessaire de disposer d'un nombre minimum de couple de points – pixels - pour construire un variogramme adéquat ; en général ce nombre est estimé à une centaine de pixels (Webster et Oliver, 2001). La disposition de ces valeurs, c'est-à-dire, la forme de la parcelle est aussi importante. Dans notre cas, il faut une parcelle disposant, pour une résolution de 20 mètres, d'au moins 100 mètres de chaque côté.
- En parallèle pour construire le variogramme il faut disposer des limites sur lesquelles le variogramme va être calculé. Dans notre cas, nous avons utilisé les limites provenant de la cartographie du rendement. Dans un cas plus général, il est nécessaire d'utiliser des techniques de segmentation pour retrouver les parcelles sur l'image de télédétection.

- Compte tenu du caractère diachronique de la méthode, plusieurs images sont nécessaires pour sa mise en place. Concernant le seuil du nombre d'images, le minimum est de 3 images. Un nombre d'images supérieur à 10 induirait des difficultés lors de l'interprétation de l'ACP.
- Enfin il faut tenir compte de l'intervalle de temps qui sépare les images : des images acquises à deux ou trois jours d'écart peuvent présenter un *pattern* stable dans le temps mais ne correspondant pas au « vrai *pattern* » du sol. Il faut donc un pas de temps de l'ordre de quinze jours à un mois pour que la stabilité soit considérée comme naturelle.

En guise de perspective, la méthode peut être considérée comme une méthode de détection du changement de la répartition spatiale des objets, et utilisée pour des analyses de changement de paysage ou dans d'autres domaines. Elle pourrait ainsi être couplée à d'autres méthodes de détection du changement qui n'utilisent que la valeur du pixel. L'orientation vers des systèmes d'observation de la terre, avec une répétitivité temporelle de plus en plus importante (le satellite FORMOSAT-2 ou la constellation Pléiades), nécessite ce développement des méthodes d'analyses diachroniques telle que celle proposée ici.

IX. Explication du pattern de sol identifié

IX.1. Introduction

En Europe, l'occupation humaine est très ancienne et finalement très adaptée au milieu (Legros, 1996). On peut donc considérer que les limites parcellaires dans les années précédant la mécanisation, étaient très adaptées au sol. Des années 60 à la fin des années 70, la naissance de la politique agricole commune (PAC), avec son souci de modernisation et d'accroissement de la production agricole européenne, a favorisé le remembrement et le groupement de parcelles, pour permettre d'accroître la productivité du travail. On est ainsi passé de limites parcellaires adaptées au milieu à des limites parcellaires adaptées aux engins agricoles. Cette nouvelle distribution de l'espace agricole implique une augmentation significative de la taille des parcelles, mais aussi une augmentation de la variabilité intra parcellaire des propriétés du sol. Pour réduire cette variabilité constatée, les agriculteurs ont introduit des améliorations foncières : pendant les années 70 – 80, les systèmes de drainage (§.VII.1.3.1), puis l'irrigation. Ces systèmes ont été adaptés au type de sol, à la microtopographie, etc.

Se basant sur cette observation, nous voulons vérifier si ces limites, marques de l'histoire cadastrale et du drainage parcellaire, sont actuellement reconnaissables par télédétection et si elles définissent une partie de la structure spatiale parcellaire identifiée dans le chapitre précédent.

Il s'agit donc d'une approche qualitative permettant de mettre en évidence que le vrai *pattern* de sol correspond bien à une réalité au sein de la parcelle. Une partie de cette variabilité est naturelle et une autre partie est le résultat de l'historique de la parcelle (Bocchi et al., 2000) et donc des interventions humaines. Ces variabilités, naturelle et historique, peuvent être reliées à la parcelle de la façon suivante :

- La variabilité naturelle devrait être reliée normalement à une variabilité inter parcellaire. Néanmoins les limites entre deux types naturels de sol peuvent avoir lieu au sein d'une parcelle et devenir ainsi une variabilité intra parcellaire. Mais l'échelle de variation reste celle de l'inter parcellaire.
- La variabilité « historique » est principalement le résultat de la mécanisation et de l'impact des politiques européennes dans cette région, moteur principal d'un remembrement et d'un regroupement de parcelles dans les années 60 à 70. Cet impact a donné lieu à des variations à une échelle intra parcellaire.

Nous allons analyser principalement cette variabilité historique, sans oublier l'importance de la variabilité inter parcellaire. Pour cela nous avons acquis une série d'images historiques que nous analyserons et comparerons aux images où le « vrai *pattern* » a été identifié. Cela permettra de comprendre le rôle de l'histoire de la parcelle sur le pattern télédétecté.

IX.2. Matériel et méthodes

Pour illustrer notre propos, nous sélectionnons deux parcelles, grâce aux images satellites pour lesquelles le « vrai pattern » a été identifié et une série historique de photographies aériennes permettant d'expliquer le pattern observé.

IX.2.1. Images Satellites

Les images satellites correspondent aux images de Mars 2002 et Avril 2003 (Figure VIII-3). Pour l'image d'Avril 2003 lors de mise en place de la méthode d'identification du vrai pattern, nous avons réalisé un processus de régularisation pour passer de 10 à 20 mètres. Dans cette étude nous reviendrons sur l'image de 10 mètres, puisqu'à cette résolution, la comparaison avec l'historique est plus nette.

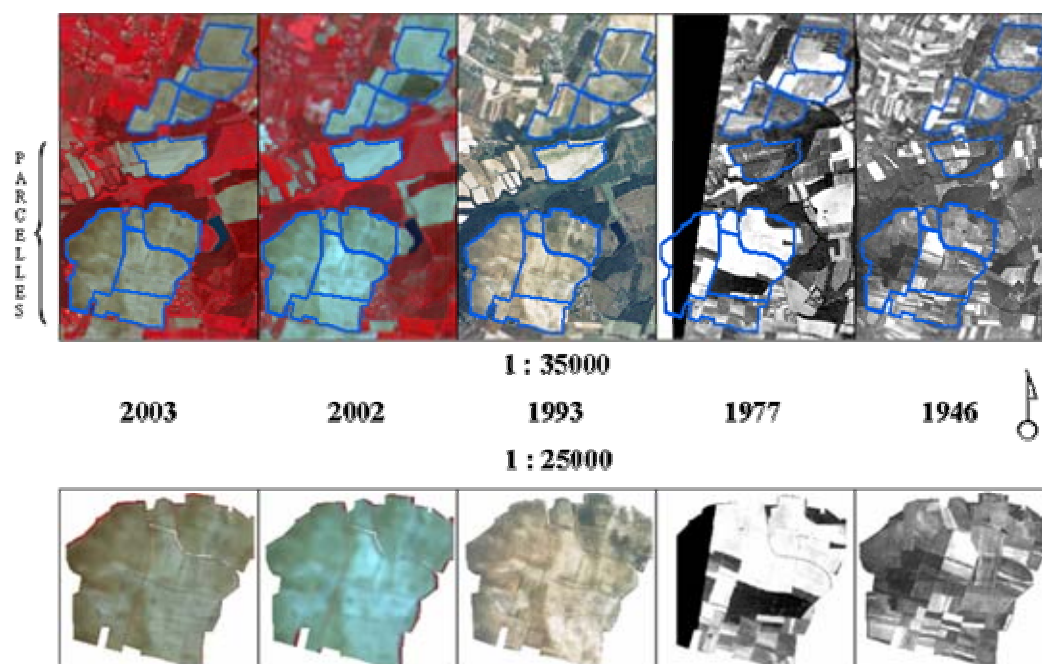


Figure IX-1- Images satellites et aériennes

IX.2.2. Images Aériennes

Les images aériennes correspondent à une série temporelle de 3 images, allant de 1946 jusqu'à en 1993 (Figure IX-1 et Tableau IX-1) :

Date (j / m / a)	Couleur N&B
05 / 06 / 1949	×
19 / 09 / 1977	×
18 / 06 / 1993	×

×= disponible

Tableau IX-1 Dates de prise de vue des images aériennes et leurs caractéristiques

IX.2.3. Les parcelles

Les limites parcellaires, affichées en bleu sur la Figure IX-1 correspondent aux limites parcellaires utilisées pour extraire les informations d'intérêt dans le processus d'identification du vrai pattern. Parmi ces parcelles, nous avons sélectionné les groupes de parcelles plus au sud, appartenant à trois exploitants, indiquées sur la Figure IX-1 par « PARCELLES ».

IX.2.4. Méthode de comparaison

L'approche de comparaison diffère selon qu'on cherche à comparer la variabilité naturelle ou la variabilité historique.

Pour la variabilité historique, l'approche est une interprétation visuelle. Après le géoréférencement des images aériennes, la comparaison peut être réalisée de deux façons :

- 1- Extractions de limites parcellaires, haies, etc. des images anciennes et comparaison, par superposition, aux nouvelles images
- 2- Par analyse visuelle.

La première des deux approches a été mise en place sur le site expérimental de Lamothe, appartenant à l'ESAP. Cette approche est beaucoup plus lourde et lente dans sa mise en place, elle n'a d'intérêt que si les couches d'information vectorisées (haies, anciennes limites, fossés, etc.) sont utilisées dans des études parallèles. Ceci a été le cas sur la parcelle de *Terrefort* où un projet du CESBio (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère) nécessitait des limites pour cibler l'échantillonnage des sols pour analyser le contenu en carbone.

La variabilité naturelle, basée sur la couleur de l'image, sera extraite automatiquement grâce aux outils type « texture » ou « segmentation » disponibles dans différents logiciels.

IX.3. Résultats

IX.3.1. Vision générale

La série d'images de la Figure IX-1 permet d'observer, sur la partie supérieure, l'évolution du parcellaire dans la zone. Les deux images de gauche correspondent aux deux images

satellite (SPOT 5 (10 mètres de résolution) et SPOT 4- (20 mètres de résolution) où le « vrai pattern » a été identifié pour les « PARCELLES ». Après ces deux images, de gauche à droite, nous avons les trois images aériennes, 1993, 1977 et 1949. Comme nous l'avons évoqué, le remembrement a eu lieu dans la région entre les années 60 et 70 (développement de la mécanisation), puis dans les années 80 avec celui de l'irrigation. Ce remembrement est visible sur cette série : les images de 2003, 2002 et 1993 présentent les mêmes patches intra parcellaire, et les deux autres images (1977 et 1949) illustrent cette évolution du parcellaire. En conséquence et comme nous pouvons l'examiner plus en détail dans la série inférieure de la Figure IX-1, la comparaison d'une des trois images de gauche avec les deux images de droite est suffisante pour illustrer le lien entre les images satellites actuelles et l'évolution du parcellaire.

IX.3.2. Vision parcellaire : intra et inter

L'historique des parcelles est nettement apparent sur les images du sol nu, aériennes ou satellites actuelles (Figure IX-2). Cet historique définit ainsi une partie de la structure spatiale du sol : les anciennes limites, deviennent maintenant de limites de variabilité intra parcellaire comme on peut l'observer sur la Figure IX-2.

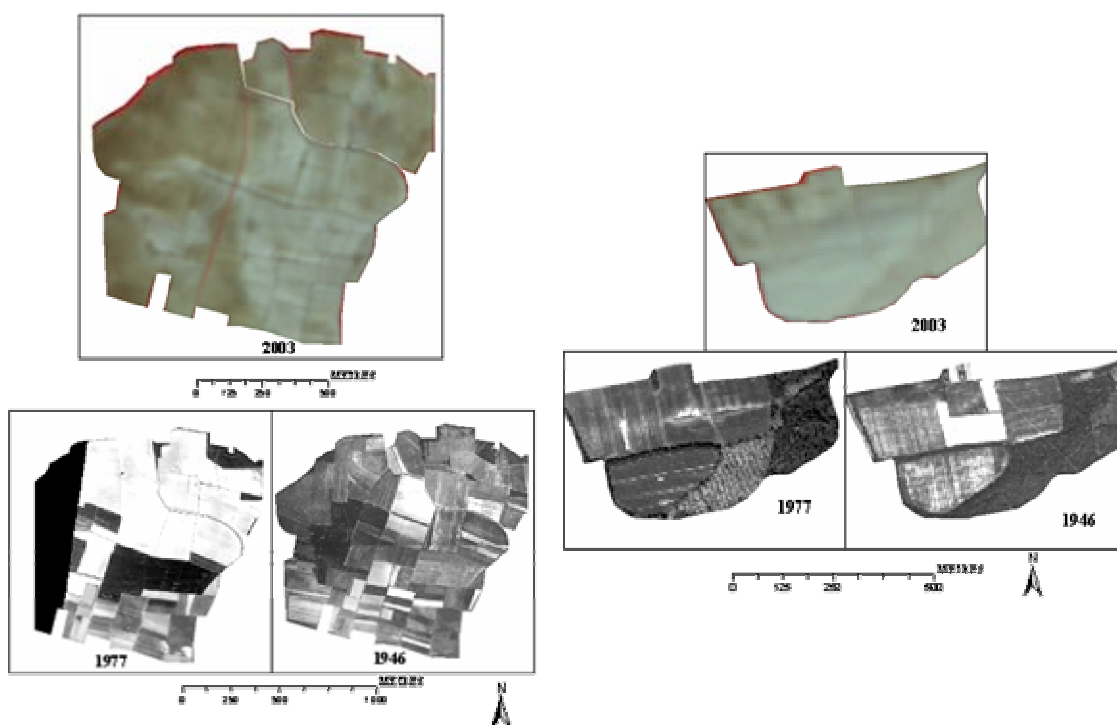


Figure IX-2- Ancien parcellaire et images SPOT-5: Origine des "patterns"

Ces limites peuvent aussi être mises en relation avec les systèmes de drainage installés. Comme nous pouvons observer sur la Figure IX-3, le système de drainage, en rouge dans l'image, peut être considéré comme la source de variation du résultat issu de la télédétection.

Il est difficile d'attribuer ces variations, sur les images actuelles de télédétection, à l'une ou l'autre source (drainage ou anciennes limites). En tout cas, une partie de la distribution actuelle des zones et des limites intra parcellaire (Figure IX-2 et Figure IX-3) ont leur origine dans l'historique parcellaire.

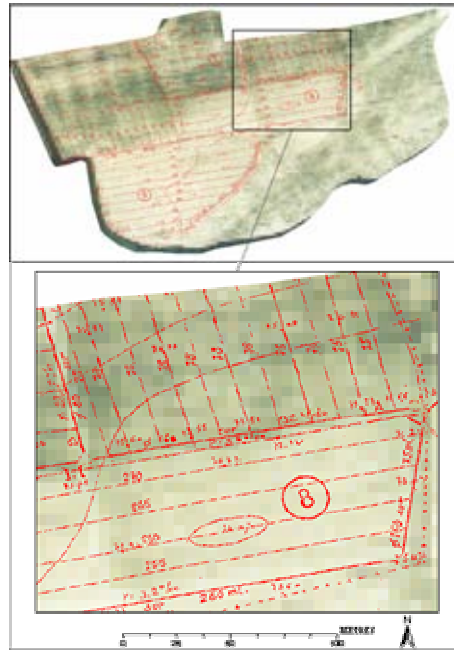


Figure IX-3- Explication du "pattern" du sol et du système de drainage

L'autre variabilité, variabilité « naturelle », peut être associée - sur l'image - à la couleur des sols. Cette couleur des sols présente une dimension inter parcellaire : (exemple) l'image située en haut à gauche de la Figure IX-4 montre 4 parcelles en sol nu, délimitées par un vecteur. Pour l'extraction des limites définies par la couleur des sols nous avons utilisé la méthode de segmentation utilisée précédemment (sous chapitre VI.2) et permettant de contrôler la taille des objets segmentés par le paramètres d'échelle (PE). La Figure IX-4 montre d'une part l'effet de la variation du PE sur le résultat de la segmentation. Dans cette exemple, la valeur du PE qui s'adapte le mieux aux zones de couleur est de 40.

Dans cette configuration (PE= 40) les zones définies par la segmentation sont à cheval entre plusieurs parcelles. Dans un contexte de modulation ceci implique que la modulation doit se réaliser sur plusieurs parcelles, sans tenir compte de l'entité parcellaire.

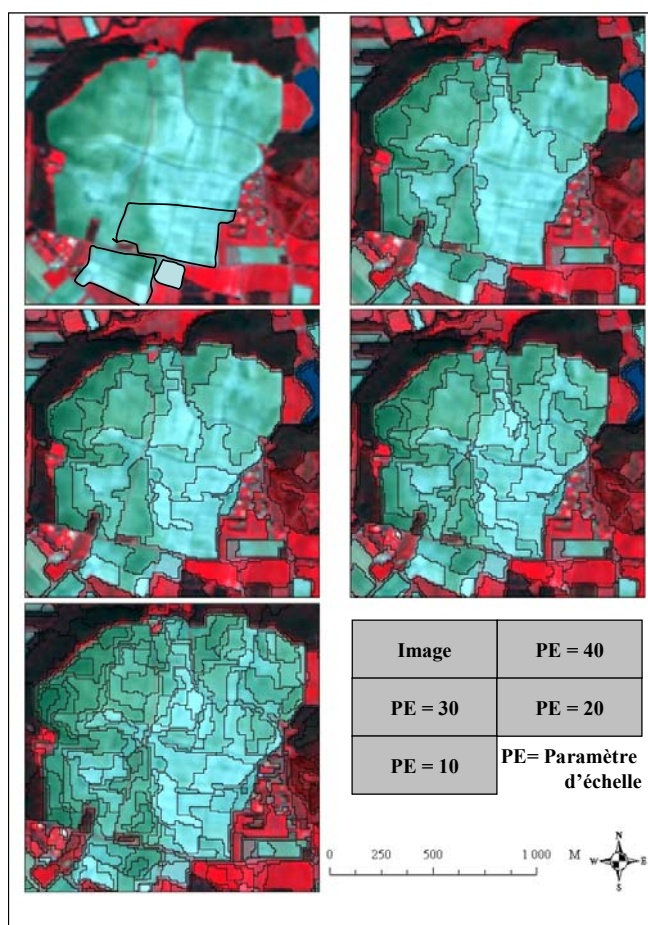


Figure IX-4 Identification automatique de la variabilité « naturelle » inter parcellaire : effet du paramètre d'échelle dans la segmentation automatique

IX.4. Conclusion

L'utilisation de la télédétection des sols et de la géostatistique ont permis d'identifier le vrai pattern des parcelles. Avant de chercher à connaître l'incidence de la distribution spatiale des sols sur le comportement du rendement et/ou de la végétation, on a cherché à expliquer le vrai pattern par l'évolution du paysage et de l'organisation du parcellaire.

Par la confrontation de données actuelles de télédétection et des anciennes photographies aériennes, nous avons pu montrer que le pattern parcellaire, observé actuellement par télédétection, est en relation avec l'histoire des parcelles cultivées (remembrement) et de l'aménagement (installation du drainage).

Ce chapitre est donc une confirmation du résultat de la méthode d'identification du pattern, et donc de l'étude de l'hétérogénéité structurelle par l'explication de ce pattern

Pour revenir à l'agriculture de précision, paradoxalement mais logiquement, on est passé d'un paysage de petites parcelles ayant un sens agro-pédologique à un paysage de parcelles

avec des *patches* définis, en partie par ces anciennes parcelles. Ces patches actuels sont connus de l'agriculteur et pris en compte dans son itinéraire technique (drainage, travail du sol, etc) pour gommer cette hétérogénéité. On constate donc à nouveau que l'itinéraire technique est, comme le sol, un facteur de variation intra parcellaire contrairement à certaines hypothèses.

Dans cette explication de la variabilité statique, outre la variabilité intra parcellaire résultant de l'historique, des zones qui dépassent les limites de la parcelle (zones inter parcellaire) ont été identifiées. Ces zones ont été attribuées à des types de sols. La dimension inter parcellaire de ces zones peut impliquer dans une démarche d'agriculture de précision, la réalisation d'une modulation intra-inter parcellaire.

Conclusion de la deuxième partie

Cette partie concernant les sols avait comme objectif **d'identifier un pattern**, statique dans le temps, pouvant servir de base à une recherche de causalité de la distribution spatiale du rendement.

La zone du bassin versant du Touch a été choisie afin de proposer une méthode d'identification et d'explication du pattern du sol. Dans cette zone, caractérisée par une structure en terrasses, les **sols de boubènes** sont prédominants. Ces sols se caractérisent par une variabilité de texture et structure (faciès) et par l'existence d'un plancher imperméable (grepp, argile, etc) à une profondeur variable. Ils présentent donc un **comportement hydrique différencié**.

Ce comportement hydrique peut être caractérisé par des **mesures de terrain**. Mais cette approche de terrain est **lourde** à mettre en œuvre, économiquement **non viable**, et elle nécessite un grand nombre d'échantillons pour être représentative de l'étendue du bassin versant.

Une autre approche de l'étude de ce comportement hydrique représentatif des sols de la zone est l'utilisation de **l'indice de brillance (IB)**, obtenu à partir de données de **télédétection**. L'indice de brillance étant relié à ce comportement hydrique pour des sols de boubènes (Dubucq, 1989), son utilisation pour l'étude des sols est justifiée. D'autre part, la télédétection joue un rôle privilégié parmi les différents moyens d'acquisition de données car elle met en évidence la variabilité intra parcellaire étudiée sur de grandes étendues. Elle présente une dimension spatiale, inhérente aux images, et une dimension temporelle de par le nombre d'images acquises. Ces dimensions permettent donc d'étudier les deux types de variabilité intra parcellaire à prendre en compte en agriculture de précision : la **variabilité statique** ou permanente qui caractérise les principales constantes du milieu et la variabilité dynamique, indicatrice de l'état actuel des cultures.

Malgré cette éventuelle relation entre l'IB et le comportement hydrique des sols, la mesure télédétektée des sols dépend d'un grand nombre de facteurs comme la rugosité du sol, la composition en matière organique, la texture, etc. Nous avons donc abordé l'étude des sols (de leur variabilité statique) par l'identification de la **distribution spatiale des sols**, les patterns, et non par la cartographie des propriétés hydriques du sol.

Dans cette étude de la distribution spatiale des sols, nous avons proposé une méthode d'analyse diachronique des images satellites appuyée sur la géostatistique permettant d'identifier le pattern représentatif (vrai pattern) de la parcelle : celui que n'est pas dû aux effets externes comme l'ombre d'un nuage, l'irrigation, les chaumes de récolte,... Cette méthode se base sur l'hypothèse que le « **vrai pattern** » du sol correspond à celui qui est temporellement stable. Elle a permis d'identifier le «vrai pattern» sur 50 % des parcelles étudiées. Il est possible que dans d'autres contextes agricoles, la stabilité temporelle du sol ne soit pas la même et que l'hypothèse de stabilité temporelle ne soit donc plus respectée. Ceci n'est pas le cas dans notre contexte.

Un fois identifié, ce « vrai pattern » parcellaire, **est expliqué**. L'origine des vrais patterns a été associée, grâce à l'interprétation d'images aériennes, à l'évolution du parcellaire. L'évolution du paysage et de la taille des parcelles, fruit du remembrement et de la mise en place du drainage est observable actuellement sur les images satellites et permet d'expliquer une part de la variabilité de l'état de surface observée par télédétection.

L'identification et l'explication du pattern de sol nous permettent d'aborder dans le point suivant une étude d'hétérogénéité fonctionnelle. Celle-ci cherche à mettre en relation le sol et le rendement (i.e. relier le sol à un processus).

Troisième partie
Variabilité du sol et variabilité du
rendement :

Introduction

En agriculture de précision, la capacité de mesurer la **variabilité spatiale du sol et d'évaluer son influence sur la variabilité du rendement**, est une étape fondamentale pour l'implémentation d'une démarche de conduite modulée (Earl et al., 2000). Dans cette partie nous cherchons à répondre à cette question. Il s'agit, après les études de l'hétérogénéité structurelle du rendement (première partie) et du sol (deuxième partie), d'étudier ici l'influence de **l'hétérogénéité fonctionnelle** du sol sur le rendement. Ceci consiste à analyser les liens spatiaux entre l'indice de brillance du sol, obtenu par télédétection, et la variabilité du rendement. Du point de vue de l'agriculture de précision, il s'agit d'étudier l'influence de la variabilité statique – le « vrai pattern » du sol - appréhendée par télédétection via l'indice de brillance (IB)– sur la variabilité du rendement – stade ultime de la variabilité dynamique et statique - d'une culture de maïs.

Dans un premier temps, nous allons utiliser la même méthode de géostatistique (le coefficient de co-dispersion) pour chercher à retrouver les relations existantes entre le pattern du sol et le pattern du rendement.

Mais parce que le rendement n'est pas uniquement expliqué par l'effet du sol, mais de la réaction de la culture à un ensemble de facteurs, il nous a semblé nécessaire d'exploiter nos données et de conduire la même analyse de pattern entre la végétation (exprimé par le NDVI) et celle du rendement, puis entre la végétation et le sol. Les différentes corrélations mises en place dans cette partie sont représentées schématiquement dans la Figure Intro-3ème Partie.

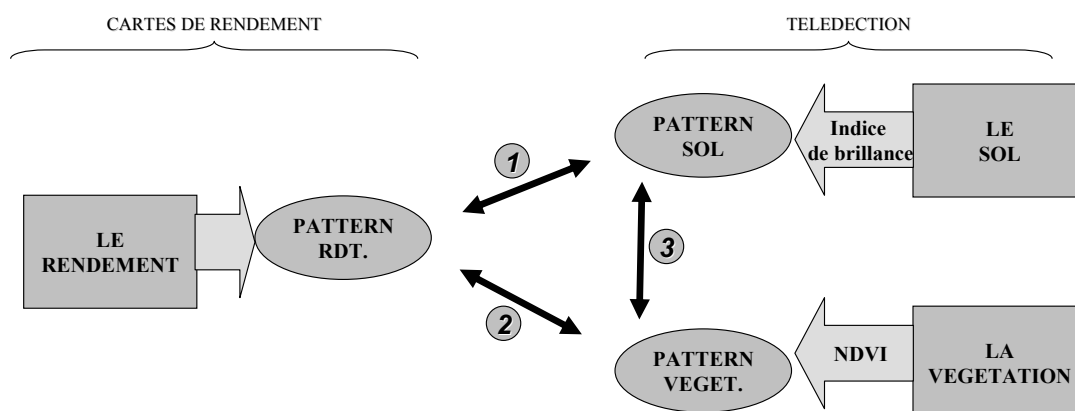


Figure Intro-3ème Partie - Schéma des relations entre les patterns des propriétés: sol, végétation et rendement

X. Relations sol, rendement et végétation

X.1. Sol et rendement

Le schéma méthodologique (

Figure VIII-6) mis en place lors de l'identification du « vrai *pattern* » du sol à l'échelle parcellaire est repris ici (Figure X-1). Dans ce chapitre il s'agit de voir si le « vrai *pattern* » du sol, précédemment identifié, est corrélé à la structure spatiale du rendement. Pour cela nous disposons de 10 paires d'images correspondant aux 10 parcelles présentant le « vrai *pattern* ».

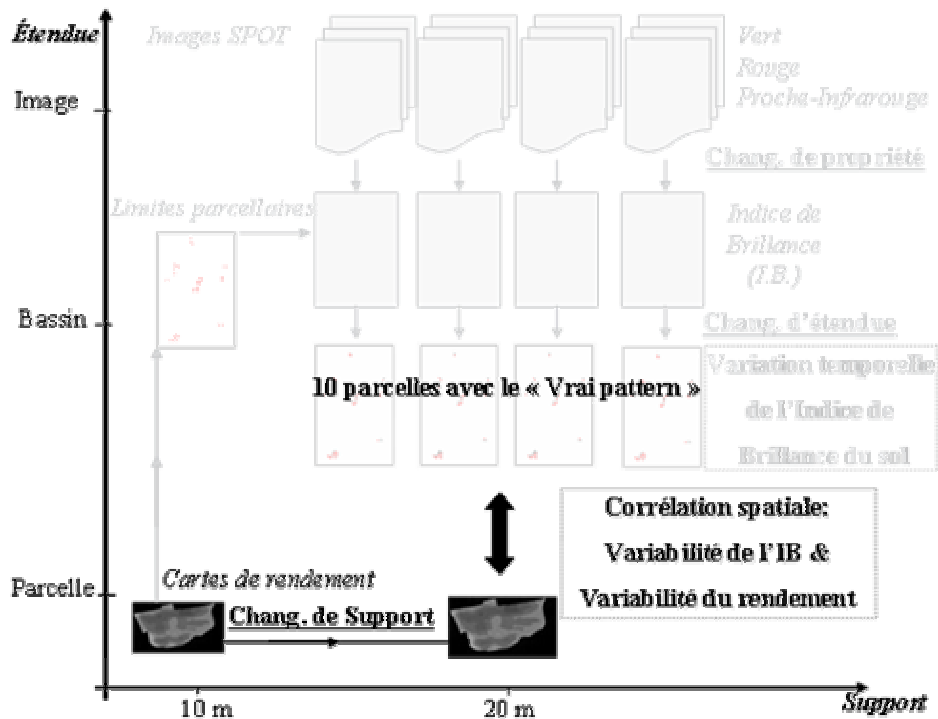


Figure X-1- Schéma méthodologique: Comparaison de l'indice de brillance et du rendement

A priori, si la méthode d'identification du « vrai *pattern* » est suffisamment robuste, la comparaison d'une des deux images d'une paire avec la carte de rendement devrait donner le même résultat qu'avec l'autre image ; cela veut dire qu'au lieu de 20 corrélations, 10 corrélations seraient suffisantes. Avant de présenter les résultats des 10 corrélations entre l'indice de brillance issue de la télédétection et les cartes de rendement, nous allons donc étudier pour une parcelle la robustesse de la sélection des paires d'images lors de la corrélation avec le rendement.

X.1.1. Robustesse de l'identification du « vrai *pattern* » pour la corrélation

La parcelle avec l'identifiant 143 se trouve 3 fois dans le Tableau VIII-5 des individus sélectionnés : cela correspond aux paires d'images suivantes : a) Avril 2002 - Avril 2003, b) Mars 2002 - Avril 2003 et c) Mars 2002 - Avril 2002. De ce fait, *a priori*, le « vrai *pattern* » doit être présent sur les trois images : Mars 2002, Avril 2002 et Avril 2003. Et donc l'analyse de la corrélation de n'importe quelle image des trois avec la carte de rendement disponible pour cette parcelle devrait donner le même résultat.

La Figure X-2 montre le coefficient de co-dispersion, en fonction de la distance, pour la parcelle 143, entre le rendement et l'IB de chacune de trois images. Des courbes très différentes signifient que ce qui était considéré comme un même *pattern* sur les images, ne l'est pas. Au contraire, des courbes similaires (ou presque superposables) sont indicatrices de la bonne identification du *pattern* du sol et donc de la non nécessité d'utiliser les trois images : dans ce cas une seule image est suffisante pour caractériser le vrai *pattern*.

La similitude entre les courbes de la Figure X-2 est une preuve de la stabilité temporelle de la méthode, de sa robustesse, et en conséquence de la possibilité d'utiliser une seule image parmi les trois pour étudier la corrélation spatiale entre l'IB et le rendement.

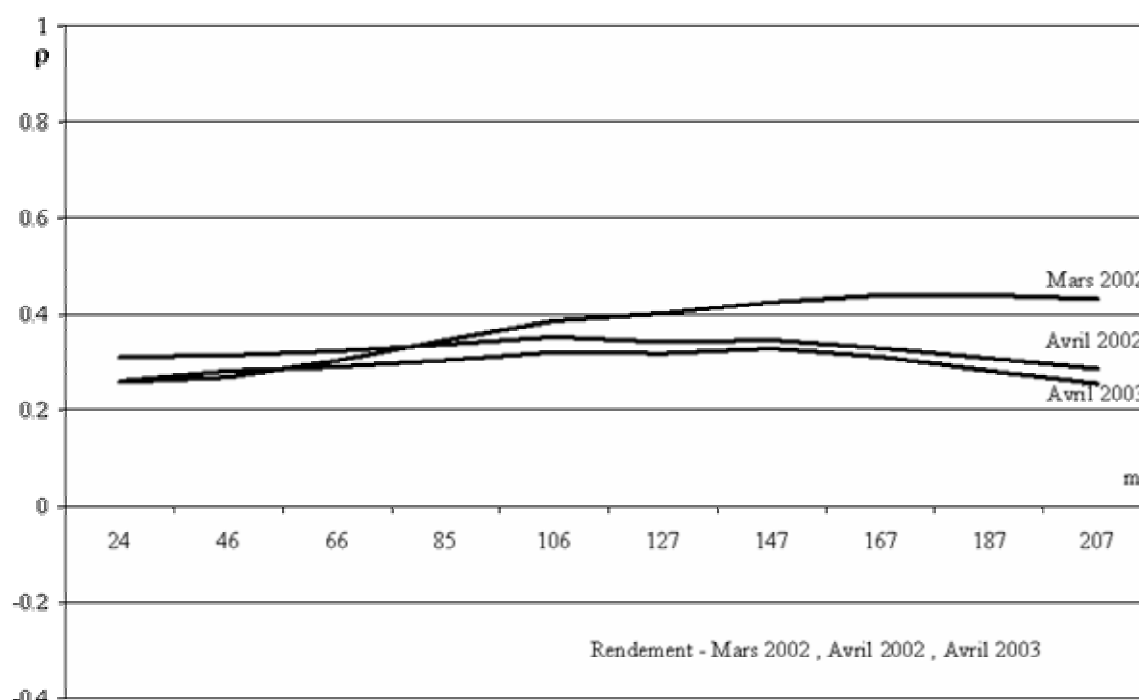


Figure X-2- Coefficient de co-dispersion, en fonction de la distance, entre le rendement et l'indice de brillance de 3 images

X.1.2. Corrélation spatiale entre l'indice de brillance et le Rendement

Dans cette partie, nous cherchons à mettre en relation la distribution spatiale d'une donnée issue de la télédétection, l'indice de brillance (qui porte l'information sur la variabilité statique de la parcelle) avec le rendement (qui est considéré comme l'état ultime de l'expression de la variabilité dynamique et statique). Comme pour les études précédents de mise en relation spatiale des variables, nous avons aussi opté ici par l'utilisation du coefficient de co-dispersion.

Les résultats du coefficient de co-dispersion, en fonction de la distance, entre l'IB et le rendement des 10 parcelles, sont présentés sur le graphique de la Figure X-3. Il montre des corrélations relativement faibles, inférieures à 0.5 : le *pattern* de l'indice de brillance diffère du *pattern* de rendement.

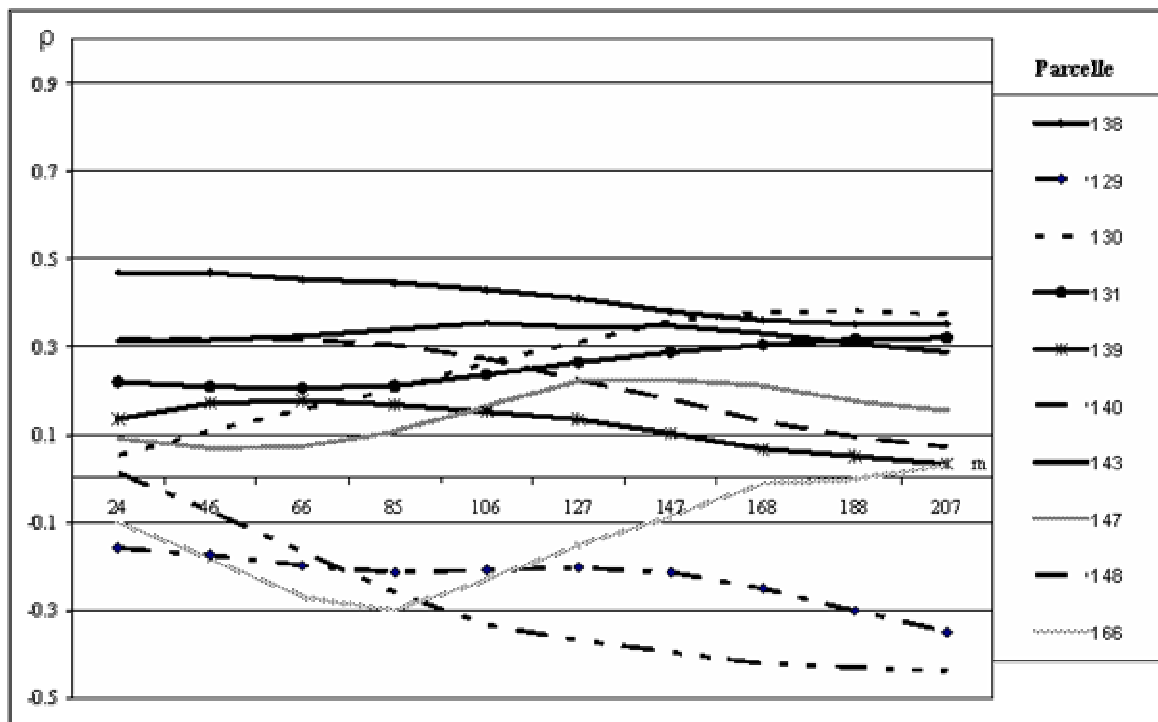


Figure X-3- Coefficient de co-dispersion, en fonction de la distance, entre l'IB et le rendement 2002 pour les 10 parcelles.

Pour approfondir cette relation entre le sol et le rendement, nous disposons du rendement de trois campagnes de récolte sur deux parcelles. Vu que le *pattern* du sol est temporellement stable, il est alors intéressant d'observer :

- si l'absence de corrélation entre le sol et le rendement se répète pour les trois années de rendement, ou

- si dans d'autres conditions climato-culturelles (les autres deux années), le *pattern* du sol est relié plus fortement, d'un point de vue spatiale, au *pattern* du rendement.

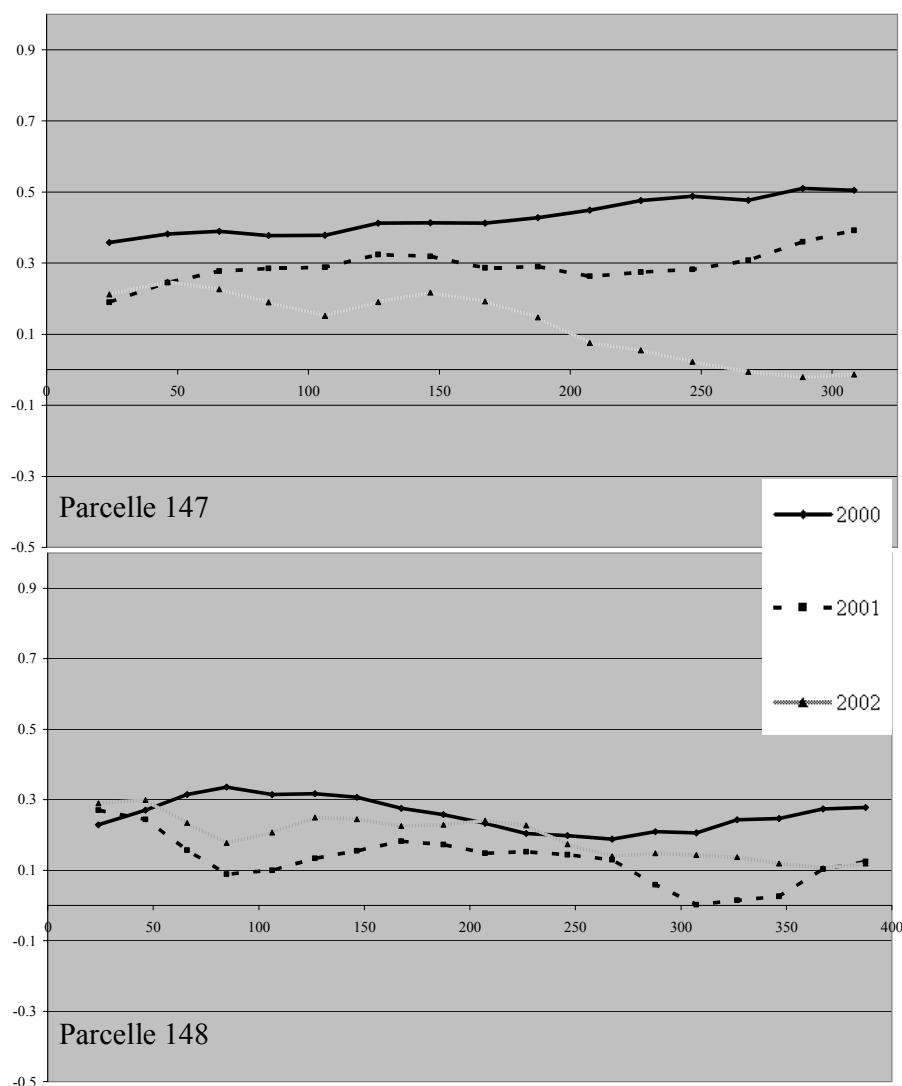


Figure X-4- Coefficient de co-dispersion entre l'IB et le rendement sur trois campagnes; pour deux parcelles

Les résultats obtenus Figure X-4 sont similaires aux précédents : les degrés de corrélation sont inférieurs à 0.5 pour les trois années étudiées (2000, 2001 et 2002). En conséquence, le *pattern* du sol observé par télédétection (*pattern* de l'état de surface) est loin d'être l'explication principale du *pattern* du rendement. Mais nous pouvions prévoir ces résultats parce que :

dans le cas où le sol est le **seul** facteur explicatif du *pattern* du rendement :

1. la télédétection des sols, comme nous avons déjà évoqué, ne permet que l'observation de l'état de surface du sol. Mais cet état de surface, peut rester insuffisant pour décrire l'influence du sol sur le rendement.

dans le cas où le sol est le **principal** facteur explicatif du *pattern* du rendement :

2. la télédétection des sols ne prend pas en compte les interactions biotiques et abiotiques qui définissent le développement d'une plante et en conséquence son rendement (la variabilité dynamique).

dans le cas où le sol **n'est pas le principal** facteur explicatif du *pattern* du rendement :

3. l'itinéraire technique se présente (comme nous avons conclu dans la première partie de cette thèse, dédiée au rendement) comme l'autre principal facteur définissant la distribution spatiale du rendement.

Dans un contexte de production agricole en vraie grandeur, le sol n'est pas le principal facteur explicatif du *pattern* du rendement (point 3). En conséquence, en plus de tenir compte des limites de l'observation du sol par télédétection (points 1 et 2), il faut tenir compte du point 3 et comprendre quelle est la distribution spatiale de l'itinéraire technique et quel peut être son impact sur la distribution spatiale du rendement.

A priori, l'impact de l'itinéraire technique et des interactions biotiques et abiotiques ont un effet cumulatif sur la croissance et le développement de la culture et donc de son rendement. En conséquence, étudier les relations spatiales existantes entre le sol et l'évolution temporelle de la culture peut nous aider à comprendre les différents comportements spatiaux entre le sol, la culture et le rendement. Dans ce cas, il faut trouver une variable indicatrice de l'évolution de la culture qui soit disponible facilement sur la zone d'étude. La variable proposée est le NDVI, issu de la télédétection et permettant de suivre l'évolution de la culture (la variabilité dynamique) sur l'ensemble de la zone d'étude.

Nous allons donc, dans un premier temps étudier la corrélation spatiale entre le NDVI et le rendement pour, dans un second temps, étudier la corrélation spatiale entre le sol et le NDVI.

X.2. NDVI et rendement

Le NDVI sera utilisé dans cette étude car malgré sa sensibilité aux effets atmosphériques ou au sol, la distribution spatiale décrite est satisfaisante (Atkinson 2001). En plus, le NDVI permet de suivre l'état de vigueur de la végétation en fonction de son stade phénologique

(Moulin et al., 1997). Enfin, il est accessible spatialement à l'échelle intra parcellaire lorsque l'on utilise la télédétection.

Pour les deux parcelles précédemment sélectionnées, nous disposons de la série d'images de 2002, montrée sur la Figure X-5. De cette série, nous avons extrait les valeurs de NDVI au long du cycle de développement. Avec les techniques d'analyse spatiale développées dans cette étude, nous allons étudier la distribution spatio-temporelle du NDVI et analyser sa stabilité au cours du développement et croissance de la culture.

Cette étude de la relation spatiale dans le temps du NDVI, permet de voir à quel moment il existe une différenciation importante de la structure spatiale de la culture.

Ensuite et dans une logique d'agriculture de précision où le rendement est l'objectif ultime, il est pertinent d'observer et d'analyser si le *pattern* de NDVI est relié au rendement.

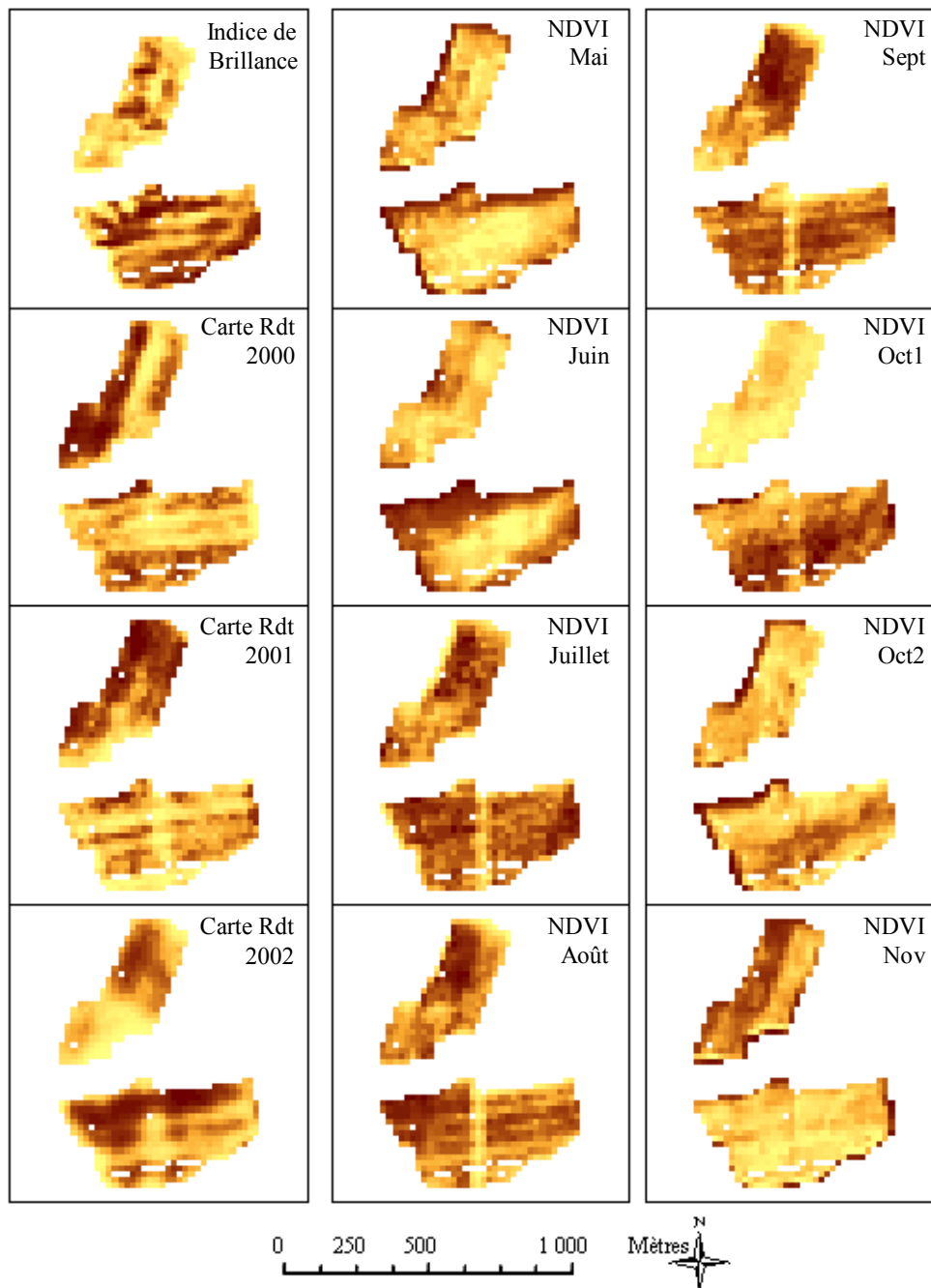


Figure X-5- Aperçu de l'IB, rendement et série d'images satellite pour les deux parcelles

X.2.1. Evolution de la corrélation du NDVI

Les graphiques du coefficient de corrélation (Figure X-6), en fonction de la distance, pour les images de NDVI, deux à deux et à des dates consécutives, présentent une bonne corrélation, entre 0.5 et 0.9, pour les couples suivants : Mai - Juin ; Juillet - Août et Août - Septembre, avec des courbes relativement plates, indicatrices d'une même structure spatiale (Figure X-6).

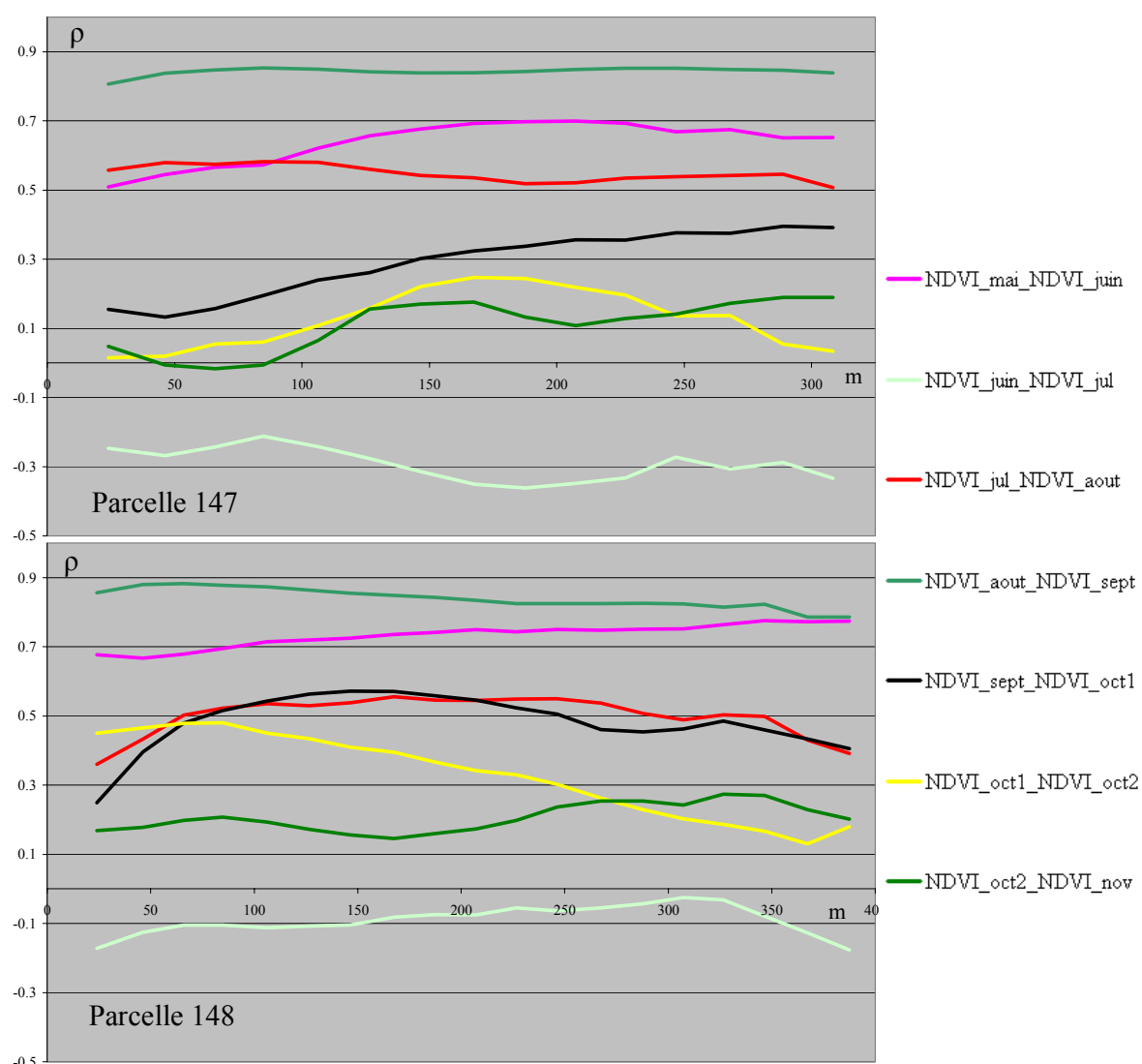


Figure X-6- Coefficient de co-dispersion de l'évolution du NDVI

Ces ressemblances peuvent être aussi observées visuellement sur la Figure X-5. On remarque donc une bonne corrélation pour certaines dates. Il s'agit maintenant de trouver une explication à ces corrélations à l'aide des profils temporels du NDVI.

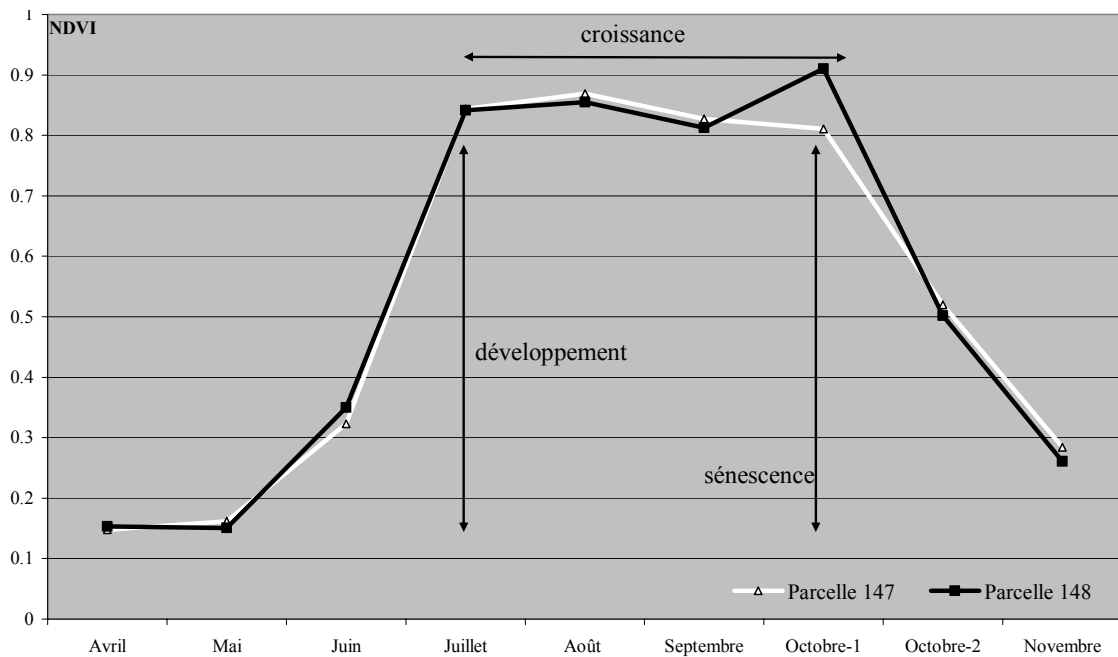


Figure X-7- Profil temporel du NDVI sur les deux parcelles

Les deux profils de la Figure X-7 correspondent à l'évolution temporelle du NDVI pour un pixel de chacune des deux parcelles. Les deux profils se ressemblent très fortement et ils correspondent à l'évolution du maïs dans la région : semis en mars ou avril, levée en mai, avec un développement maximal en juin – juillet, atteignant le plateau correspondant à la période de croissance de la culture, pendant les mois de juillet à octobre. A partir de cette date, la sénescence prend place jusqu'à la récolte, en novembre. Les points où la pente est plus accentuée, c'est-à-dire, là où les changements de NDVI sont plus brusques (développement et sénescence), on observe une absence de corrélation sur les courbes de la Figure X-6. A l'opposé là où les pentes sont moins accentuées (plateau, de juillet à octobre), le *pattern* temporel du NDVI (Figure X-6) à ces dates présente une stabilité due à une absence de changement ou à une évolution constante.

On voit donc qu'au moment du changement brusque (pente très forte) de juin à juillet, les corrélations spatiales sont très faibles avec des valeurs autour de zéro. La situation est inversée lors du plateau du mois d'août à septembre, là où la plante est déjà fixée dans son développement : les corrélations spatio-temporelles sont aux alentours de 0.8. On pourrait alors penser que les fortes corrélations sont dues à la saturation du capteur pour la réflectance du proche infrarouge. Ceci n'est pas le cas parce que, comme on peut observer sur les images d'Août et Septembre de la Figure X-5, la mesure de NDVI se trouve spatialement distribuée au sein de la parcelle, sans que les valeurs soient toutes au maximum (+1) ; il existe donc une variabilité. Néanmoins, cette limite sur la saturation des valeurs du

NDVI, doit être prise en compte lors de l'interprétation des données d'autres parcelles ou situations.

En relation à cette explication du profil temporel et donc du degré d'évolution de la culture se trouve cachée une seconde explication sur la variabilité intra parcellaire. Pour chacune des 3 phases du profil une explication de l'évolution est donnée ci-après :

- Pendant le développement, la distribution spatiale du rendement va être fortement influencée par la relation « sol et itinéraire technique » : Une zone commencera à pousser plus tard parce qu'elle a été semée quelques jours après, ou une zone de la parcelle semée dans un sol plus argileux et avec une réserve en eau plus élevée aura moins de mal à pousser au début.
- Lorsque le plateau de croissance est atteint, les zones intra parcellaires vont être définies en fonction des facteurs prédominants ; le sol et l'itinéraire technique principalement, mais aussi les ravageurs, les mauvaises herbes, etc. Cela est perceptible sur nos images. La parcelle 148, (Figure X-5) présente à partir du mois de juin - juillet un *pattern* bien particulier marqué par une bande à faible NDVI (jaune clair sur les images de la Figure X-5) au centre de la parcelle et en direction Nord-Sud. Cette bande correspond au passage du système utilisé pour l'irrigation (canon sur enrouleur). Celui-ci est l'effet indirect de l'itinéraire technique - l'existence d'une bande sans végétation pour le passage des engins d'irrigation – qui est très visible sur l'image. Pour ces trois dates, l'itinéraire technique va donc définir la structure de la distribution spatiale de la parcelle. Au contraire, sur la parcelle 147, cet effet de l'itinéraire technique est moins perceptible, la distribution spatiale est « plus naturelle ».
- Finalement la phase de sénescence : cette phase n'est pas vraiment reliée au rendement. En conséquence, elle présente un moindre intérêt dans la mise en relation entre le *pattern* de l'évolution de la culture et celui du rendement.

Cette étude nous a permis aussi de vérifier que la méthode du coefficient de co-dispersion donne des résultats logiques avec une autre variable (le NDVI) et qu'elle pourrait donc être utilisée dans des études de détection du changement.

X.2.2. Corrélation entre le *pattern* du NDVI et le *pattern* du rendement

L'image ci-dessus (Figure X-8) montre les corrélations spatiales entre le rendement et le NDVI, du mois de mai, moment où le maïs commence à pousser et la parcelle n'est plus en sol nu, jusqu'au mois de novembre (la récolte). Il montre une faible corrélation spatiale, inférieure à 0.5, entre le NDVI et le rendement de la même année. Une explication de ce comportement pourrait être, entre autres, le fait que le NDVI n'est pas forcément relié au rendement : un excès d'azote va provoquer un fort développement de la canopée, traduit par de valeurs élevées de NDVI qui ne vont pas se traduire par une augmentation du rendement. En conséquence, les zones avec un excès d'engrais vont avoir un NDVI plus fort. Par contre, la conséquence sur le rendement ne sera pas perceptible.

L'autre point à remarquer sur ce graphique est en terme relatif : les corrélations de juillet, août et septembre présentent la plus forte valeur parmi l'ensemble des dates disponibles. Ces dates correspondent au plateau, qui est, comme nous l'avons évoqué dans le point précédemment, la phase indicatrice du facteur prédominant (sol, itinéraire technique, etc) dans la distribution spatiale de la végétation. Nous avons aussi observé dans le point précédent (concernant l'évolution du NDVI) que pour les trois dates en question (juillet, août et septembre), le pattern de la végétation de la parcelle 147 était plus naturel que celui de la parcelle 148. Ce dernier semble plus dépendant de l'itinéraire technique. Nous avons remarqué sur la Figure VII-7 que la plus forte corrélation spatiale entre le NDVI et le rendement se produit à ces mêmes dates. Cela a donc un sens, c'est bien à ces dates de stabilisation du développement (phase de croissance) que le facteur prédominant va marquer la distribution spatiale du rendement. Etant donné ce résultat, en ce qui concerne la distribution spatiale du rendement, l'acquisition – pour le maïs - d'une image en juin, juillet ou août présente plus d'intérêt que pour les autres dates.

Celui-ci est aussi un résultat remarquable dans l'utilisation de la télédétection en agriculture de précision, où une des questions la plus souvent posée est à quel moment il faut acquérir une image pour obtenir une information significative en terme de rendement.

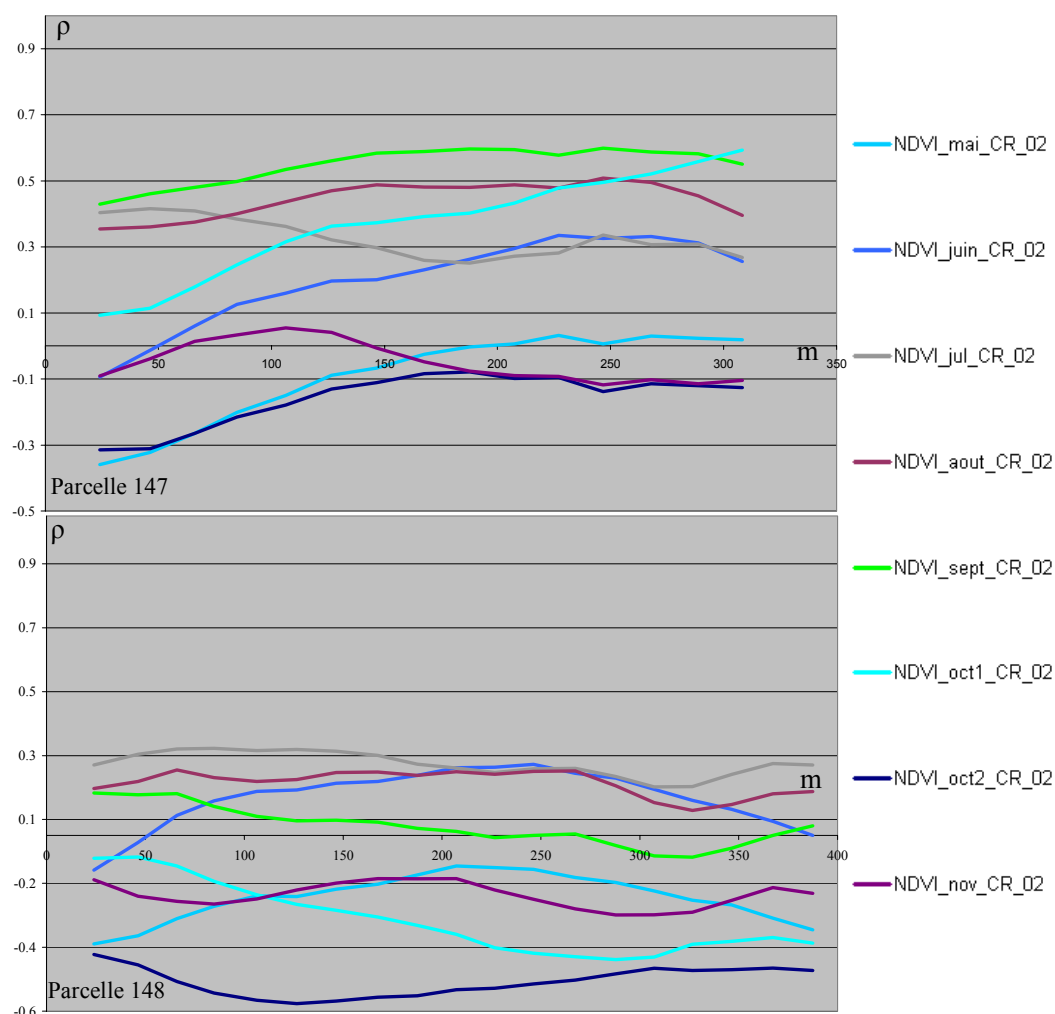


Figure X-8- Coef. de co-dispersion entre la série de NDVI et la carte de rendement

X.3. Sol et NDVI

La relation sol et NDVI présente un intérêt dans l'étude des relations entre la variabilité statique (sol) et la variabilité dynamique (culture). Comme pour les relations entre sol et rendement, la relation sol - NDVI ne présente pas de fortes corrélations. Les valeurs sont, à nouveau, inférieures à 0.5.

L'explication de cette faible corrélation est due, d'une part, aux limites de la télédétection telles que nous les avons évoquées précédemment (cf. corrélation spatiale entre le sol et rendement). D'autre part, à la composante anthropique définissant le pattern de la végétation. Concernant cette composition du pattern de la végétation, elle peut être divisée en :

- 1- une composante naturelle : caricaturant les choses ; un maïs va pousser plus vigoureusement dans une zone où la disponibilité en eau est plus élevée que dans une

zone sèche ; ou un blé dans un sol gorgé d'eau va avoir des problèmes d'anoxie et des chances de ne pas se développer.

- 2- une composante anthropique : le tour de pivot ou le canon à eau (pour le maïs) ou le passage des apports en azote (pour le blé) ou l'orientation des rangs au moment du semis vont forcer une distribution spatiale du rendement au sein de la parcelle.

Cela rejoint l'idée de deux classes de variabilité : intrinsèque et extrinsèque (Cambardella et al., 1994; Phillips, 2001). L'élément 1) peut être associé à une variabilité intrinsèque provoquée par des variations naturelles, par contre, l'élément 2) peut être associé à une variabilité extrinsèque imposée dans la parcelle comme le résultat des pratiques culturales. On retrouve donc ici les deux facteurs principaux d'influence remarquée en début de thèse : le sol et l'itinéraire technique.

Ces composantes vont avoir une plus ou moins forte influence sur le pattern observé par télédétection. En récapitulant, pour les deux parcelles, l'information des graphiques précédents (Figure VII-5 et Figure VII-7)

- Parcelle 147 :

La phase du plateau correspondant à la période juillet-septembre définit le facteur prédominant de l'évolution de la végétation comme étant de nature abiotique (sol).

Le NDVI aux dates du plateau est plus corrélé au rendement que les autres dates, toutefois cette corrélation n'est pas très élevée

- Parcelle 148 :

La phase du plateau à la période juillet-septembre définit le facteur prédominant de l'évolution de la végétation comme étant de nature anthropique (itinéraire technique).

Le NDVI aux dates du plateau est globalement plus corrélé au rendement que pour les autres dates, avec des corrélations néanmoins assez faibles.

Et dans la corrélation entre le sol (l'IB) et le NDVI par date, nous trouvons (Figure X-9) :

- Parcelle 147 :

Les trois courbes, correspondant aux corrélations de l'indice de sol avec le NDVI des mois de juillet, août et septembre, sont plus corrélées que les corrélations de l'IB et les autres dates.

Ce résultat confirme que la structure spatiale du NDVI de cette parcelle aux dates du plateau (juillet, août et septembre) est plus naturelle et donc dépendante en bonne partie du sol.

- Parcelle 148 :

Pour cette parcelle il n'y pas de corrélation caractéristiquement plus forte entre l'IB et le sol.

Cela confirme que ce n'est pas le sol le facteur prédominant et que, par contre, l'hypothèse de l'importance de l'itinéraire technique n'est pas ici refusée.

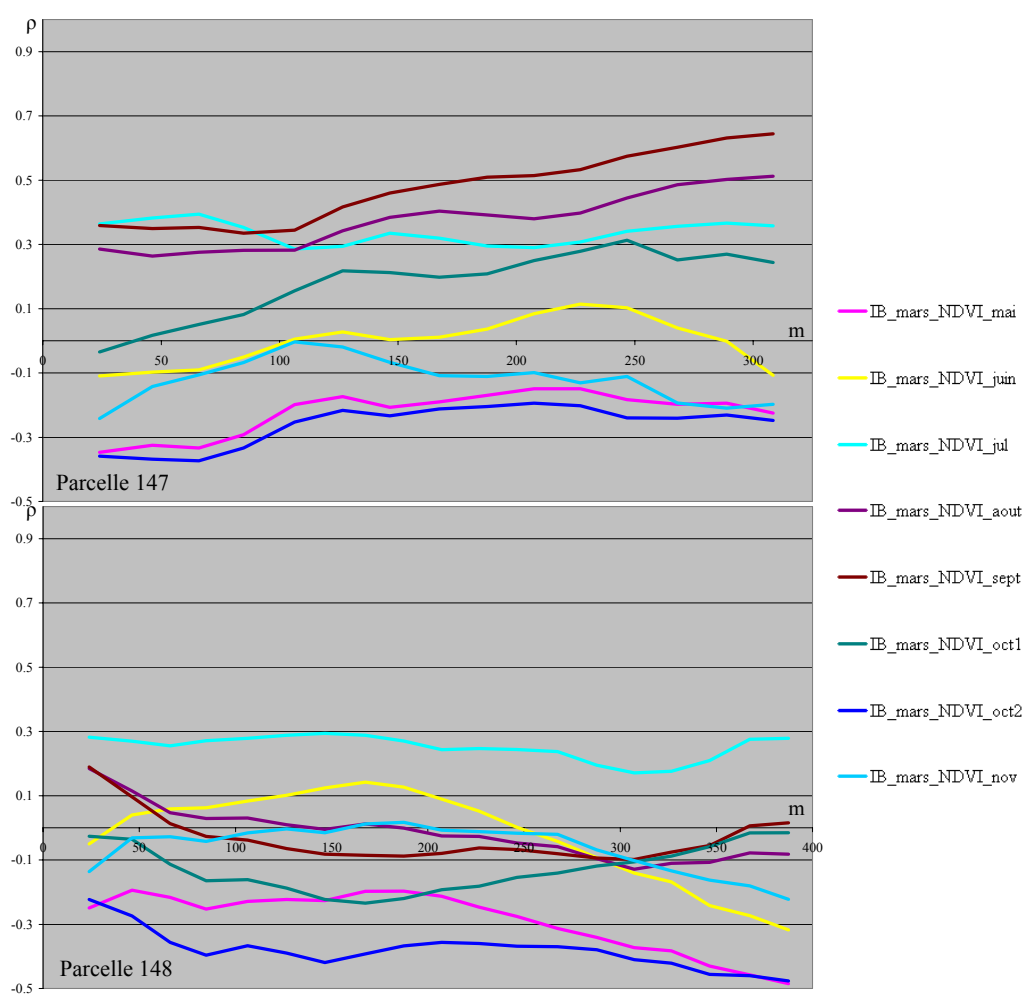


Figure X-9 Coefficient de co-dispersion entre l'indice de brillance et la série de NDVI

Conclusion de la troisième partie

Sur les dix parcelles étudiées, il n'existe que deux cas où la valeur du coefficient de co-dispersion, entre l'indice de brillance et le rendement, dépasse la valeur de 0.3. Cela veut dire que la distribution de la variabilité au niveau de l'indice de brillance n'est pas une variable explicative suffisante de la structure spatiale du rendement.

Dans une certaine mesure cela corrobore les résultats obtenus au niveau de l'analyse multi annuelle des cartes de rendement. La variabilité statique n'est pas, dans nos conditions expérimentales, un facteur explicatif suffisant.

En fait, essayer de mettre en relation une structure spatiale intra parcellaire à forte composante naturelle, comme celle de l'état de surface du sol, avec une composante très anthropisée et sujette à l'action d'un grand nombre de facteurs externes, comme le rendement, est extrêmement difficile. La compréhension de cette corrélation doit se réaliser parcelle par parcelle et il est nécessaire de disposer de données auxiliaires comme les images satellites et des connaissances de la variabilité intra parcellaire, non seulement du sol mais aussi de l'itinéraire technique, pour comprendre ces corrélations.

C'est pour cela qu'en utilisant une série d'image de télédétection nous avons effectué la même démarche d'analyse entre les deux variables, NDVI et rendement, pour deux parcelles. Le niveau d'explication de la distribution spatiale du rendement par la distribution spatiale d'une variable caractérisant le comportement de la végétation est sensiblement meilleur. En particulier pour certaines dates du cycle végétatif, lorsque l'on n'est plus dans une phase de développement ou sénescence mais de croissance (plateau de la courbe du NDVI).

On met alors en évidence que la variabilité dynamique est plus explicative que la variabilité statique.

Pour essayer de compléter notre étude, nous avons fait la même analyse entre les variables IB et NDVI. Quoique un peu supérieur, le coefficient de co-dispersion reste inférieur à 0.5. Des deux parcelles illustrées, la parcelle présentant la meilleure corrélation entre l'IB et le rendement présente aussi les meilleures corrélations entre NDVI et rendement ou IB et NDVI.

Quatrième partie
Stratification du bassin versant

Introduction

Cette partie est composée d'un seul chapitre cherchant à répondre au deuxième objectif demandé par le partenaire industriel, le GCO. Il consiste à identifier les zones au sein d'une grande étendue où une démarche d'agriculture de précision présente un plus grand potentiel. Cela se traduit par la proposition d'une méthode de spatialisation d'un indice de potentiel pérenne, basé sur le sol.

Pour des raisons de disponibilité d'images, indisponibles à l'heure actuelle sur le bassin d'action de Castelnaudary, la méthode proposée a été conçue et mise en place dans le bassin versant du Touch.

Dans le cas de la stratification, le bassin versant sera divisé en zones homogènes et hétérogènes. Cette stratification est faite en prenant en compte la dépendance spectrale existante entre un pixel et ses voisins, c'est à dire, l'autocorrélation spatiale. Il s'agit du calcul des indices de texture et de sa classification.

L'objectif de cette stratification dans le contexte de l'agriculture de précision est de cibler les mesures en évitant, dans un premier temps, d'attirer l'attention vers les zones avec une trop forte variabilité locale difficilement modulable. Pour mettre en place cette démarche, nous présenterons une synthèse bibliographique sur la texture en imagerie. Cette bibliographie est suivie du choix d'un parmi les cinq descripteurs texturaux proposés. La dernière étape consiste à une analyse de cette stratification avec l'information spatiale (MNT, aquifère, géomorphologie, sols) disponible à l'échelle du bassin versant.

XI. La stratification

En faisant allusion au terme de stratification, fortement répandu dans le domaine de la photogrammétrie en foresterie pour désigner le découpage de la forêt en type de peuplements homogènes ou strates (Gouv.Québec, 2004), nous l'associons ici au découpage du bassin versant en classes d'homogénéité – hétérogénéité. Mais l'étude de l'hétérogénéité, comme nous avons vu précédemment (§II.1), est composée de deux termes : 1) la propriété étudiée et 2) la variabilité qui est un descripteur quantitatif de cette propriété.

1) Concernant la propriété étudiée, nous avons choisi de continuer à utiliser l'indice de brillance, propriété considérée dans cette thèse comme traduisant la variabilité statique des sols. La stratification basée sur la variabilité statique est temporellement plus valable et plus sensée qu'une stratification basée sur les données exprimant la variabilité dynamique.

2) Concernant le descripteur quantitatif, celui-ci doit être *spatialisable* pour ainsi stratifier entièrement le bassin versant sans perdre de l'information. Si nous considérons le bassin versant comme une entité sans tenir compte du parcellaire, l'approche la plus adaptée et ayant un sens agronomique, est celle d'un descripteur de la variabilité locale. Si les valeurs varient fortement à l'échelle d'opérabilité des matériels, les pratiques agricoles sur cette zone seront difficilement modulables. Si par contre elle est homogène, des pratiques agricoles peuvent être envisagées : définition des itinéraires techniques particuliers sur cette zone de variabilité homogène. Cette approche spatiale a ses fondements dans l'autocorrélation spatiale qui peut être vue comme la ressemblance des valeurs d'une variable régionalisée en fonction de la position de leurs supports (Aubry, 2000; Aubry et Piégay, 2001; Chica-Olmo et Abarca-Hernandez, 2000; Legendre, 1993). L'analyse de cette autocorrélation spatiale en imagerie est réalisée via la texture.

Le concept de texture est défini selon deux approches (Garrigues, 2004) :

- La vision macroscopique (macrotecture) de la texture fait référence à une répétition de motifs de base - primitives, objets, etc., dans différentes directions de l'espace.
- La vision microscopique (microtexture) définit la texture par les variations spatiales des valeurs de l'image. Dans cette approche, l'image n'est pas vue comme un arrangement spatial d'objets mais comme la distribution spatiale d'une variable continue, à travers le support (pixel).

Pour ces approches, ils existent différents descripteurs texturaux, qui sont couramment divisés en trois grandes catégories : structurelle, spectrale et statistique. Les deux premiers

sont proches de la vision macroscopique et le dernier de l'approche microscopique. L'analyse structurelle se base sous la répétition d'une primitive, la spectrale sur la fréquence spatiale : la fonction de corrélation évalue la relation linéaire spatiale entre les primitives de l'image. La troisième utilise de méthodes statistiques.

Les deux premiers groupes de descripteurs sont reliés à la structure et à l'approche orientée objets en classification. Le troisième, le **statistique**, est celui que nous intéressons dans ce chapitre, pour caractériser le bassin versant en terme d'hétérogénéité. Pour « les images utilisées, étant des champs continus de variables radiométriques, l'approche microtexturale est plus adaptée » (Garrigues, 2004).

XI.1. Descripteurs texturaux statistiques

Nous avons divisé les descripteurs texturaux statistiques en quatre grands groupes :

XI.1.1. Statistique simple (statistique empirique du 1^{ère} ordre)

Ils décrivent l'histogramme des valeurs de l'image : moyenne, variance, symétrie, aplatissement, etc. Ils ne prennent pas en compte la relation spatiale de proximité entre les pixels. Ils s'abstraient donc de l'autocorrélation spatiale. Puisque la texture est définie en prenant en compte la dimension spatiale, ce type de descripteur est souvent considéré comme un filtre.

XI.1.2. Texture GLCM (Gray-level co-occurrence matrices)

Cela consiste à construire des matrices de co-occurrence pour représenter les relations entre les pixels d'une image. La matrice représente la probabilité conjointe pour que deux niveaux de gris i et j soient dans une relation spatiale donnée. Cette relation est définie en terme de distance et d'angle entre ces deux pixels. L'angle permet d'évaluer la direction de texture. L'application de plusieurs valeurs de distance peut donner une description significative de la taille de la périodicité de la texture (Haralick, 1973). Ses principaux problèmes sont d'une part le temps de calcul, et d'autre part, sa sensibilité au bruit dans l'image.

XI.1.3. Fractales

La dimension fractale proposée par Mandelbrot permet, par des mesures fractales, de décrire la complexité spatiale des objets à différentes échelles (Eghball et al., 1995; Eghball et al., 1999; Mynt, 2003). Par exemple, la complexité d'une ligne aura une dimension fractale entre 1 et 2, celle d'une surface sera entre 2 et 3, etc. Il y a différents types de mesures fractales appliquées comme descripteurs texturaux. Ainsi Mynt (Mynt,

2003) a comparé différentes mesures fractales comme l'isarithme, le prisme triangulaire ou le variogramme (ce dernier n'est pas classé ici comme fractal) à d'autres mesures pour analyser la texture des images.

XI.1.4. Géostatistique

Comme nous avons cité dans les méthodes fractales, certains auteurs placent le variogramme (le log-log) dans les méthodes fractales (Mynt, 2003) et créent un nouveau groupe « techniques d'autocorrélation spatiale », intégrant les indices de Moran's et Geary. Dans cet aperçu bibliographique, nous avons voulu différencier le fractal du groupe d'autocorrélation spatiale, appelé ici géostatistique, pour le différencier des méthodes des GLCM qui ont aussi une approche d'autocorrélation.

Dans ce groupe de géostatistique, il est possible de distinguer :

- Les mesures purement géostatistiques : appliquées à une seule bande comme le variogramme direct ou le madogramme et des méthodes pour extraire l'information sur des couples d'images comme le cross-variogram ou le pseudo-variogram (Chica-Olmo et Abarca-Hernandez, 2000).
- Les mesures dites d'autocorrélation spatiale qui sont indirectement reliées au variogramme. Ces mesures d'autocorrélation sont l'indice de Geary et de Moran très répandues dans le domaine de l'écologie. La relation entre ces indices et le variogramme est présentée par Aubry et Piégay (Aubry et Piégay, 2001)

XI.2. L'image de la texture

Comme nous l'avons évoqué dans l'introduction de ce chapitre, la méthode utilisée doit être *spatialisable*. Pour cela, une image de texture est issue du calcul du descripteur de texture dans une fenêtre glissante, dite fenêtre de kernel (3 par 3). La valeur du descripteur est attribuée au pixel central de la fenêtre de l'image résultante. Cette approche de fenêtre glissante portant l'information de la texture est très répandue en classification pour intégrer l'information spatiale à l'information spectrale et ainsi améliorer la classification des images (Arai, 1993; De Jong et al., 2001; Hornstra et al., 2000). Elle est utilisée aussi pour améliorer la fusion multirésolution (Beauchemin et al., 2002) ou pour analyser le pattern spatial (Coops et Culvenor, 2000).

Cette fenêtre permet donc de calculer une hétérogénéité locale sur la surface la plus petite possible (60 m par 60 m donc 3 600 m²) à partir des images de SPOT à 20 m de

résolution. L'utilisation d'une fenêtre plus grande, de taille 5 par 5 ou 7 par 7, a moins d'intérêt dans une démarche d'agriculture de précision dans laquelle une variabilité sur une telle surface (>10000 m²) pourrait être modulée malgré de valeurs de variabilité très fortes.

XI.2.1. Mise en oeuvre

Lors d'une comparaison des méthodes fractales, indices de Geary, indice de Moran et statistiques descriptives (moyenne et écart-type) pour l'amélioration en classification, la méthode fractale a présenté les résultats les moins satisfaisants parce que les données n'étaient pas fractales (Mynt, 2003). Compte tenu des résultats (la nécessité de disposer de données fractales), nous avons codé les algorithmes du variogramme, du madogramme et les indices de Geary et Moran pour l'ensemble du bassin versant, abandonnant ainsi le groupe des fractales.

Pour l'analyse des sols nus au sein du bassin versant, la spatialisation discrète et non continue des parcelles et donc des pixels donne lieu à des valeurs nulles ou en « No Data » en bordure de parcelles (Figure XI-1). Normalement, la fonction calculée dans la fenêtre kernel va être réalisée comme dans le cas 1 (pour un masque à 0) ou le cas 2 (masque avec No Data). Nous avons programmé chaque descripteur ci-dessous en tenant compte de cet effet de bordure. Le cas 3 l'illustre ; la fonction (ici la moyenne) est calculée sur le nombre de pixels non masqués (7 dans cet exemple) au lieu de le faire sur les 9 qui compose la fenêtre de kernel (Figure XI-1).

0/NaN	122	120	0/NaN	125	$cas_1 = \frac{0+122+120+0+142+156+128+126+145}{9} = 104.33$
0/NaN	142	156	123	129	
128	126	145	156	142	$cas_2 = \frac{NaN+122+120+NaN+142+156+128+126+145}{9} = NaN$
159	143	175	156	0/NaN	
135	148	169	146	0/NaN	$cas_3 = \frac{122+120+142+156+128+126+145}{7} = 134.14$

Figure XI-1 Prise en compte de l'effet bordure dans le calcul des descripteurs : exemple du calcul de la moyenne.

Les descripteurs sont les suivants :

Statistique descriptive : La variance qui se définit comme la moyenne des écarts à la moyenne :

$$Var = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)$$

Géostatistique : Le variogramme (cf. chapitre I.3.1.2) et le madogramme. Ce dernier est construit comme le variogramme mais les valeurs ne sont pas au carré sinon en valeur absolu (Chica-Olmo et Abarca-Hernandez, 2000) :

$$\gamma_{mad}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} |Z_u(x_i) - Z_u(x_i + h)|$$

Où :
 x_i et x_i+h sont les localisations des échantillons de la variable Z_u .

La sommation est étendue à tous les couples de points (x_i , x_i+h) distants de h . $N(h)$ représente le nombre de tels couples de points.

Autocorrélation spatiale : L'indice de Moran et l'indice de Geary

L'indice de Moran se définit ainsi :

$$\text{Moran's I} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} C_{ij}}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Où :
 $C_{ij} = (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})$
 x_i = la valeur de x à la position i ,
 x_j = la valeur de x en j .
 $\bar{x}$ = la valeur moyenne de x .

Et w_{ij} est la matrice binaire du produit croisé, tel quel $w_{ij}=1$ si i et j sont adjacents et zéro pour les autres cellules de la matrices, par convention $w_{ii}=0$ (une cellule n'est pas adjacente à elle-même).

L'indice présente de valeurs comprises entre -1 et +1. Une valeur de -1 indique que les valeurs sont très différentes, zéro indique une absence de relation spatiale et +1 indique un fort arrangement spatial. La déviation par rapport à la moyenne est calculée pour tous les couples de paires et pondéré par la matrice W .

L'indice de Geary :

$$C = \frac{(n-1) \sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} C_{ij} (x_i - x_j)^2}{2 \left[\sum_{i=1}^{i=n} \sum_{j=1}^{j=n} C_{ij} \right] \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2}$$

Où :

$$C_{ij} = (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})$$

x_i = la valeur de x à la position i ,
 x_j = la valeur de x en j .
 $\bar{x}$ = la valeur moyenne de x .

$1 < C < 2$. Une autocorrélation positive est exprimée par des valeurs comprises entre 0 et 1 et une autocorrélation négative pour des valeurs entre 1 et 2.

XI.2.2. Interprétation

Pour ces 6 descripteurs calculés, nous ne mesurons pas tout à fait les mêmes choses. Les trois premiers (variance, variogramme et madogramme) permettent d'illustrer la variabilité locale. Cette variabilité locale est spatiale pour les variogrammes et madogrammes par le calcul du degré de variabilité entre le pixel du centre de la fenêtre et les pixels qui l'entourent. Par contre pour la variance, la dimension spatiale est « perdue ». Il s'agit du calcul de la variance à l'intérieur de la fenêtre kernel (3 * 3) et ensuite de l'attribution de cette variance à la valeur du pixel du milieu de la fenêtre kernel.

Parallèlement à ceux indices, les deux indices d'autocorrélation traitent à la fois des attributs des objets et de leur position dans l'espace. Le niveau d'interdépendance entre les variables ainsi que la nature et la force de cette interdépendance sont étudiés. L'autocorrélation spatiale peut être positive ou négative :

- dans le cas de l'autocorrélation spatiale positive, les valeurs similaires de la variable sont regroupées dans l'espace.
- dans le cas d'une autocorrélation négative, les valeurs les plus dissemblables de la variable sont regroupées dans l'espace.

L'absence d'autocorrélation spatiale indique une répartition aléatoire. On peut interpréter ces descripteurs texturaux d'autocorrélation comme des indices descriptifs, mesurant la manière dont les objets sont distribués dans l'espace à des courtes distances (dans le cas de la fenêtre kernel 3 * 3).

XI.3. Résultats

Dans la Figure XI-2, les 5 descripteurs sont illustrés ainsi que l'indice de brillance à partir duquel ils ont été calculés. Cette figure permet de voir la répartition spatiale des valeurs au sein du bassin versant. Concernant le code de couleurs, les rouges sont homogènes, suivi d'orange, vert, bleu clair et le plus hétérogène, le bleu foncé. A partir de ces figures, nous devons choisir un des descripteurs. Pour cela nous avons décidé d'essayer de relier cette information d'hétérogénéité locale à une information globale. Cette démarche nous

permettra donc l'identification d'un indicateur d'hétérogénéité locale ayant un sens global (à l'échelle du bassin versant) et de délimiter ainsi des zones d'hétérogénéité - homogénéité ayant un sens agro et pédologique.

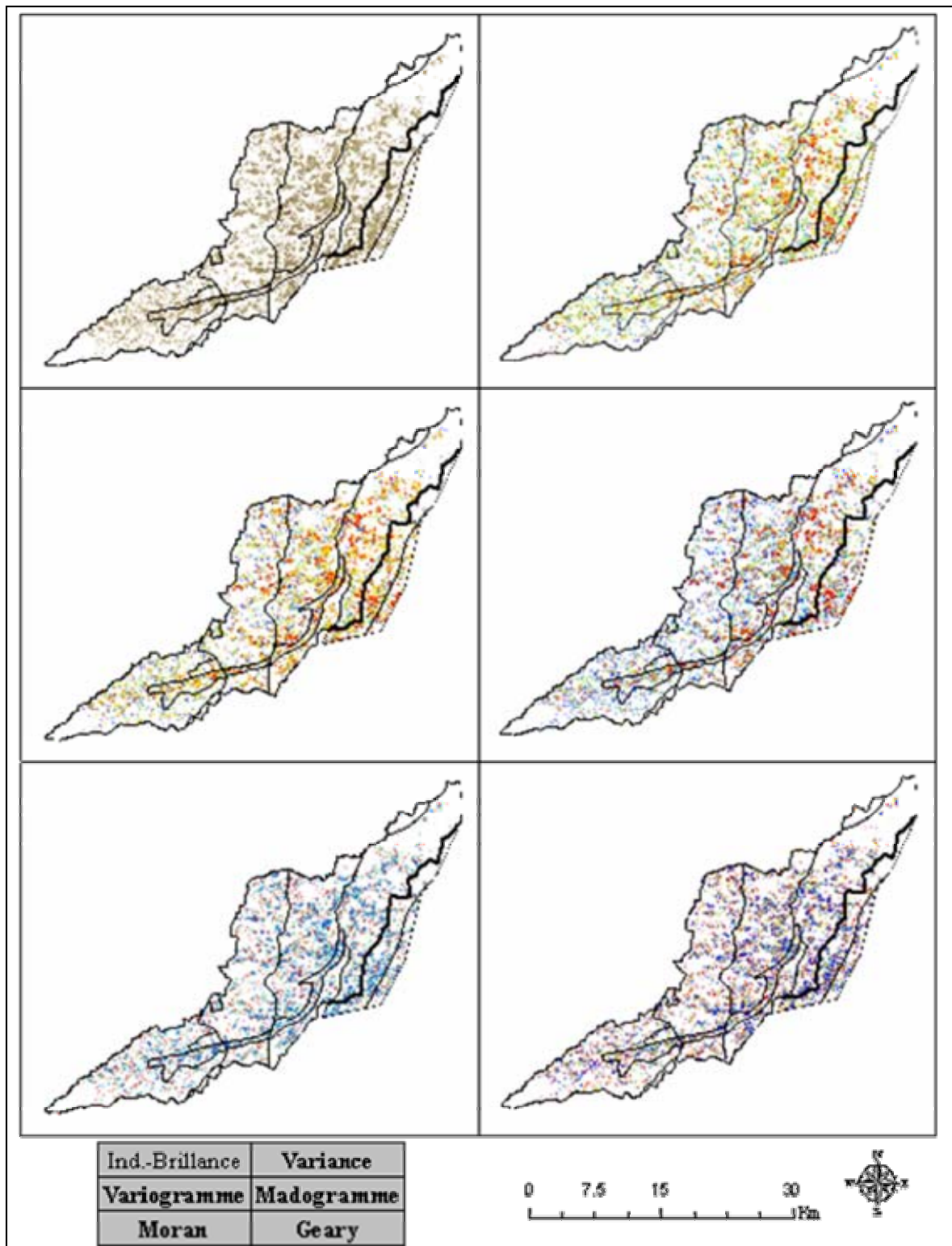


Figure XI-2 Indice de brillance et descripteurs texturaux dans le BV

Premièrement et de façon visuelle (Figure XI-2), il est remarquable de constater que les codes couleurs suivent assez bien les limites des vecteurs affichés (limites des sols et

aquifères). Cela se produit principalement pour les trois premiers descripteurs, surtout pour le madogramme. Les descripteurs d'autocorrélation (Moran et Geary), comme nous avons dit précédemment, expriment deux informations, d'une part le signe de l'autocorrélation et d'autre part le degré. Cette double réponse donne lieu à une mesure assez bruitée spatialement, pour laquelle on ne trouve pas de relations avec les informations spatiales disponibles sur le bassin versant.

Deuxièmement et de façon statistique, le choix du descripteur a été fait en utilisant la méthode de l'analyse de variance (comparaison des moyennes). L'analyse de variance en géographie est particulièrement répandue pour tester des hypothèses sur les répartitions spatiales. Elle permet de chercher s'il existe une relation entre un caractère quantitatif et un caractère qualitatif (Groupe_Chadule, 1994). Cette méthode a déjà été utilisée dans des contextes pédologiques et de télédétection. En télédétection, il a été utilisé pour, par exemple choisir parmi un certain nombre de bandes spectrales, celles permettant de discriminer au mieux 6 catégories de sol (Muller et James, 1994). En pédologie il a été utilisé pour, par exemple, étudier la stratification de la variabilité des propriétés du sol par des cartographies à différentes échelles (Leenhardt, 1991).

Dans ce travail nous voulons savoir si les valeurs des descripteurs texturaux s'ordonnent selon les modalités des classes de sols. Pour cela, nous avons pris un échantillonnage aléatoire stratifié, comme indiqué sur la Figure XI-3, pour appliquer à la population choisie la méthode de l'analyse de variance. Mais l'analyse de variance suppose certaines hypothèses comme l'égalité des variances et la normalité des populations d'origine (Legendre et Borcard, (Submitted)).

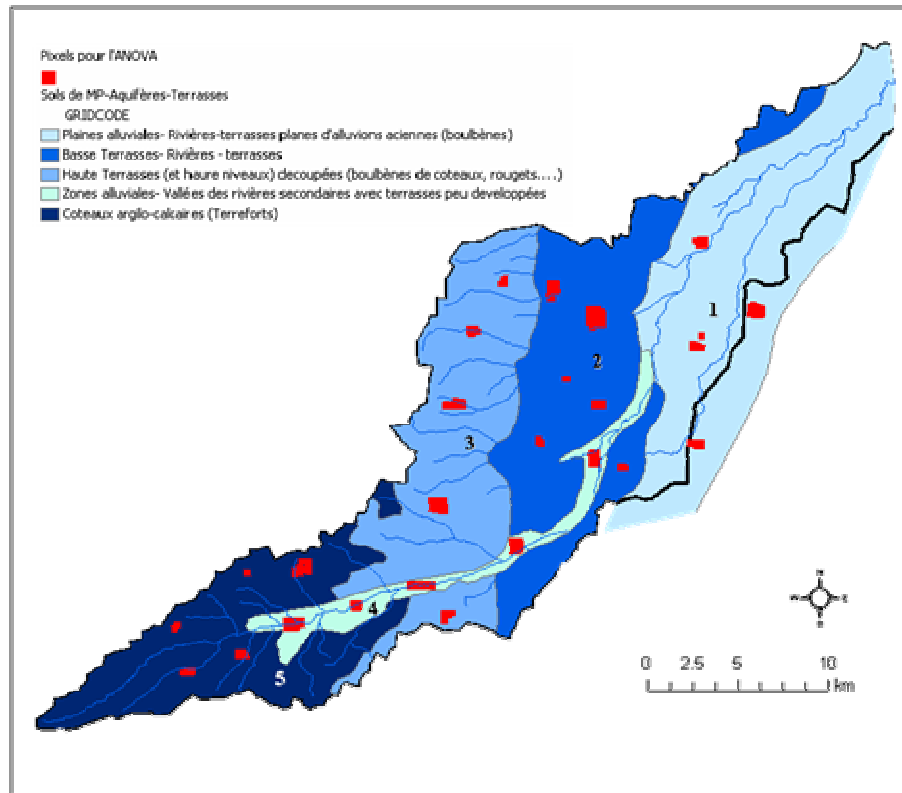


Figure XI-3 Zones pedo-geo-morphologique et population - en rouge - pour l'analyse de variance

Le Tableau XI-1 montre les différents tests paramétriques et non paramétriques pour comparer deux ou plusieurs groupes. Dans notre cas, nous disposons de plus de 2 groupes, 5 au total. Ensuite, il s'agit de voir si nos données suivent une loi normale pour ainsi pouvoir utiliser les tests paramétriques ou, au contraire, s'orienter vers les tests non paramétriques. La normalité des groupes (pour les 5 groupes et les 5 descripteurs) a été vérifiée en utilisant le test de Shapiro. La distribution de ces groupes n'étant pas normale, différentes transformations pour essayer de normaliser les données (log, racine carrée, etc) ont été réalisées. Aucune de ces transformations n'a permis d'améliorer la normalité de la distribution. En conséquence, nous nous sommes orientés vers des tests non paramétriques – test de Fligner- pour étudier l'égalité de variances (Tableau IX-1). Ensuite le test de Kruskal-Wallis(Tableau XI-1)., équivalent à l'ANOVA mais dans le groupe des tests non paramétriques, a été calculé pour vérifier si les groupes étaient significativement différents.

	Tests Paramétriques	Tests non paramétriques
<i>Comparaison de 2 moyennes</i>	T Student	Test U – Wilcow-Mann-Whitney
<i><u>Comparaison de plus de 2 moyennes</u></i>	Analyse de Variance (ANOVA)	Test de Kruskal-Wallis
<i>Comparaison de 2 variances</i>	Tests F de Fisher	Test d'Ansari-Bardley / Test de Mood
<i><u>Comparaison de plus de 2 variances</u></i>	Test de Bartlett	Test de Fligner

Tableau XI-1 Analyses statistiques paramétriques et non paramétriques

Le Tableau XI-2 présente les résultats de la « p-value » pour ce test. La p-value indique la probabilité que l'hypothèse H_0 (ou hypothèse nulle) soit vraie. En conséquence, des valeurs de p proches de zéro (<0.05) indiquent que l'hypothèse nulle, H_0 , est fausse. Dans notre cas, nous avons sélectionné la valeur de p la plus faible. La plus faible valeur de p indique la probabilité que nos classes de sol ne soient pas différenciées par les descripteurs en question. En conséquence, pour une très faible valeur de p, il aura une très bonne différenciation des classes de sol.

Descripteur	Pr(>F)	Ordre	Signification
Variance	0.001046	2	***
Variogramme	0.001209	3	***
Madogramme	3.614E-08	1	***
Moran	0.3859	5	
Geary	0.03246	4	*

Tableau XI-2 Résultats du Test de Kruskal-Wallis

Les valeurs du tableau montrent que le madogramme est le descripteur de texture avec la p-value plus faible, donc l'hypothèse nulle H_0 est le plus fortement refusée : on est plus sûr avec le madogramme de disposer de groupes différenciés.

La Figure XI-4 montre la carte du madogramme ; sur cette carte il est bien perceptible que la zone la moins variable correspond au lit du Touch, et à la basse plaine. La plus grande variabilité se trouve sur les hautes terrasses.

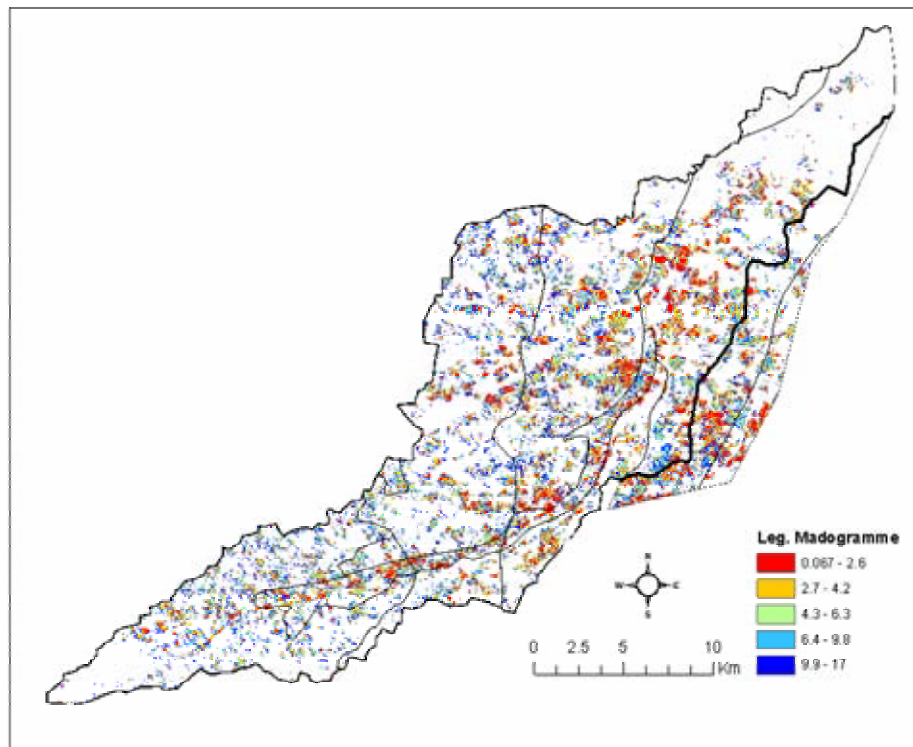


Figure XI-4 Valeur du madogramme "textural" sur l'ensemble du bassin versant

On peut donc dire que ces résultats sont explicables par la distribution du bassin versant, en terrasses, caractérisée par une géo-morphologie très marquée. Le terrain plus abrupt sur les hauts niveaux, que sur la basse plaine (voir le MNT de la Figure VII-2) est une des explications de la plus forte variabilité sur les hauts niveaux. On observe aussi sur la moyenne terrasse les deux zones, à l'ouest et l'est, remarquées déjà lors de la bibliographie, qui caractérise les zones à présence et absence de grepp. Ici, pour la variabilité locale, la zone Ouest est plus variable (dominante de couleur bleu) que la zone Est de la terrasse (dominante de rouge).

Conclusion de la quatrième partie

En réponse à la demande du GCO (Groupe Coopératif Occitan) de concevoir une carte de potentiel de mise en place d'une démarche d'agriculture de précision, une cartographie basée sur la variabilité locale a été mise en place. La variabilité locale permet de discriminer des zones fortement variables localement et donc difficilement modulables, des zones moyennement ou faiblement variables, ayant donc un potentiel de mise en place d'une démarche modulée. Cette variabilité locale a été calculée en utilisant une fonction dans une fenêtre kernel de taille 3 par 3 adaptée à la caractéristique spatiale discrète de la donnée. Parmi cinq fonctions (descripteurs texturaux) proposées, le madogramme a été le descripteur pour lequel la distribution spatiale de la variabilité locale discrimine le mieux les types de sols. Ce descripteur a été donc retenu comme pré indicateur à l'échelle du bassin versant d'un potentiel de mise en place d'une démarche d'agriculture de précision.

Cela veut dire que préalablement à l'investissement de matériel de recherche en agriculture de précision dans une zone, on peut mettre en place cette technique pour conseiller de ne pas investir dans des zones trop variables parce qu'elles ne seront pas modulables.

En parallèle à cette carte, l'utilisation de ces descripteurs texturaux peut servir à une amélioration en classification (pour la détermination de l'occupation des sols). Ce type d'approche, conjuguant l'approche spectrale et spatiale (variabilité locale), est de plus en plus répandue en classification d'image satellite (De Jong et al., 2001; Hornstra et al., 2000).

Conclusion et perspectives

Afin de mettre en place une démarche d'agriculture de précision sur l'ensemble de son bassin d'action en valorisant les cartes de rendement acquises, le Groupe Coopératif Occitan a fait appel au LTGT de l'ESAP. Pour répondre à cette attente, nous avons construit une logique agronomique de recherche permettant de :

- mettre en valeur et trouver les limites d'utilisation des cartes de rendement ;
- proposer une méthode de découpage (stratification) du bassin versant en zones plus ou moins propices à la mise en place d'une démarche d'Agriculture de Précision. Ainsi, la coopérative peut focaliser ses démarches d'aide technique dans les zones les plus adaptées.

Pour atteindre nos objectifs, nous nous sommes appuyés sur l'utilisation de données spatialisées comme les cartes de rendement, les images satellites, etc. et sur des outils d'analyse spatiale comme la géomatique et la géostatistique.

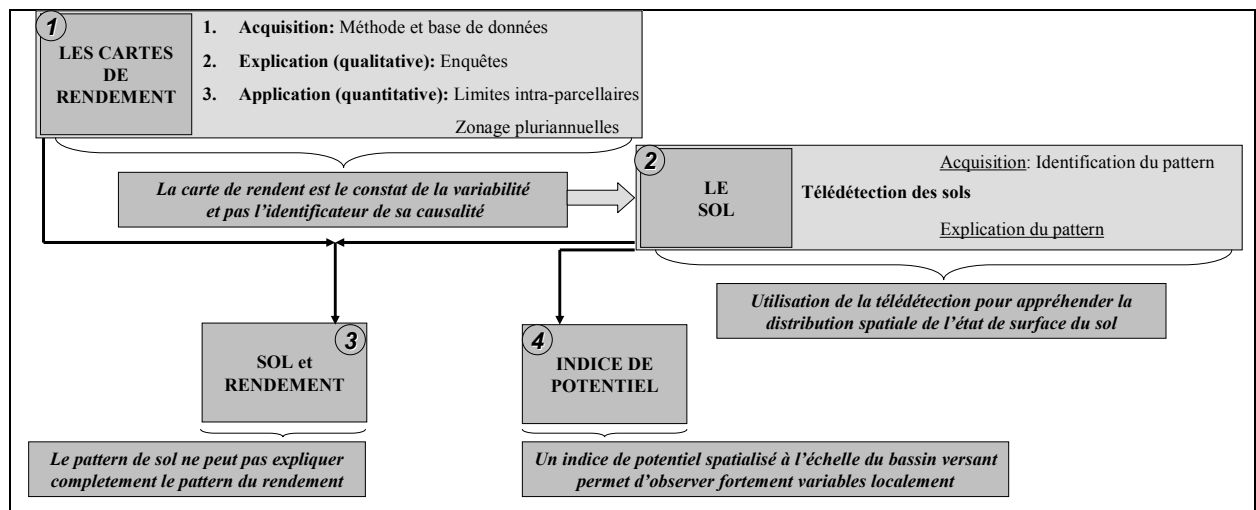


Figure Conclusion et perspectives - Logique de recherche

Cette logique (Figure) peut être découpée en 4 grandes étapes correspondantes aux 4 parties de la thèse. Récapitulons les principaux résultats de ces étapes successives

Dans la **première partie (1)** du travail, nous exploitons uniquement les cartes de rendement. Ces cartes de rendement se présentent comme l'outil le plus accessible (techniquement et économiquement) à l'agriculteur pour mettre en évidence l'existence d'une variabilité du rendement dans ses parcelles. La question qui était posée à ce stade est la suivante : quelle utilisation optimale des cartes de rendement peut-on proposer ?

Pour répondre à cette question, le premier pas est l'acquisition de la donnée. Cette donnée acquise a été traitée selon une méthode basée sur la méthode du Potentiel Mapping. Cette méthode assure i) des valeurs de rendement exactes et précises à condition d'un étalonnage

des valeurs et ii) des valeurs précises mais inexactes quand l'étalonnage n'est pas réalisé. Dans ce dernier cas, on dispose seulement d'une bonne distribution spatiale des valeurs du rendement.

L'acquisition des données a été réalisée en conditions réelles, avec différentes machines (4 machines), en différents lieux (bassin versant du Touch et Castelnaudary) et sur une grande étendue (autour de 3500 ha).

Sur une telle surface, un suivi constant des parcelles n'est pas envisageable dans le cadre de notre étude. Nous avons fait le choix de privilégier le travail en conditions réelles sur une grande surface à la précision et à l'exactitude des valeurs recueillies. L'ambition d'une telle représentation spatiale nous a permis de couvrir un grand nombre de situations très différentes. Ainsi, un large spectre de situations est disponible pour la recherche d'éléments d'explication des cartes de rendement. Cette recherche qualitative des sources de variation a été réalisée grâce aux enquêtes faites auprès des agriculteurs. Ce travail a permis de trouver deux sources principales d'explication : une source pédoclimatique (pente, sol, etc) et une source anthropique (itinéraire technique, historique de parcelle, etc).

Suite à l'identification des sources de variations, une méthode quantitative appliquée a été proposée. Cette méthode permet de délimiter automatiquement les zones expliquées par l'agriculteur lors des enquêtes. Ainsi, l'agriculteur insère directement ces zones dans sa console de modulation. Cette méthode consiste en une segmentation qui utilise un paramètre d'échelle contrôlant la taille des éléments segmentés. Elle est donc adaptable à la taille de la parcelle et aux limites proposées par l'agriculteur. Cependant, la méthode est limitée par la donnée d'entrée : les cartes de rendement. En effet, un travail pluriannuel sur les cartes de rendement et une analyse des références scientifiques récentes démontre que la carte de rendement n'est pas la donnée la plus adaptée à l'établissement d'un zonage pour la modulation. Ceci est dû aux variations temporelles de la distribution spatiale du rendement.

La carte de rendement est le constat de la variabilité et non l'identificateur de sa causalité. Parmi les deux sources principales de variabilité identifiées lors des enquêtes (pédoclimatiques et itinéraires techniques) seule celle due au sol présente, *a priori*, un caractère pérenne. *A priori* car dans certaines situations, l'itinéraire technique peut avoir un effet pérenne sur la distribution spatiale du rendement. Un des exemples les plus flagrants de cette variabilité due à l'itinéraire technique, est l'irrigation. Réalisée afin d'homogénéiser le

rendement en supprimant le stress hydrique, elle rajoute en fait une variabilité au sein de la parcelle par son implantation.

De ce fait, il est indispensable d'identifier lequel des deux, sol ou itinéraire technique, est le groupe déterminant pour l'élaboration du rendement ou, en ce qui nous concerne, sa distribution spatiale.

Au départ, le travail sur les sols (2) a été abordé par des mesures de terrain (Annexe IV : Terrain). La lourdeur de ces mesures et leur inadaptation au transfert technologique et aux objectifs d'échelle (bassin versant comme étendue et intra parcelle comme échelle décisionnelle), nous ont orientés vers l'utilisation de la télédétection satellitale. La télédétection a été très souvent utilisée dans l'étude des sols. Etant donné le caractère spatial et temporel des relations entre les propriétés du sol et la mesure télédéteectée, très dépendant d'un grand nombre de facteurs (humidité, matière organique, etc), nous avons décidé d'approcher la télédétection des sols par l'étude de leur distribution spatiale. Cette approche nous permet d'une part de contourner les problèmes dus au caractère intégrateur de la mesure de télédétection, et d'autre part, d'avoir une cohérence avec la donnée du rendement, déjà abordée en terme de distribution spatiale.

Les étapes sont les mêmes que dans l'étude de l'hétérogénéité structurale du rendement à savoir une étape d'acquisition de la donnée suivie d'une étape d'explication de la donnée acquise.

Concernant l'acquisition, nous disposons d'une série temporelle d'images et nous avons cherché à extraire le pattern représentatif de la parcelle, appelé tout au long de cette thèse « le vrai pattern ». Pour cela une méthode basée sur la donnée de la télédétection et sur la géostatistique a permis de trouver, à partir de 3 images (une quatrième s'étant avérée ne pas être en sol nu) le vrai pattern sur 10 des 20 parcelles analysées. Les deux volets de cette méthode, télédétection et géostatistique sont discutés :

En ce qui concerne la télédétection, la propriété choisie a été l'indice de brillance, traduisant l'état de surface des sols. Le choix de cet indice est critiquable, il a été principalement basé sur les observations de Dubucq (Dubucq, 1989). Lors de ces observations une relation entre cet indice et le comportement hydrique des sols a été trouvée. Il serait intéressant, pour approfondir ce travail, de mener un travail de terrain afin de vérifier cette hypothèse. La mise au point d'un autre indice pourrait être également envisagée ainsi qu'une comparaison des différents indices exploités.

En ce qui concerne la géostatistique, le choix de la méthode d'identification du vrai pattern a été guidé par notre souci de ne pas s'investir dans des développements méthodologiques lourds d'ajustement de variogramme et de comparaison de modèles ou paramètres variographiques. Nous avons donc proposé et évalué l'utilisation du coefficient de co-dispersion pour identifier lors d'une analyse diachronique les images où le vrai pattern est présent. Cette méthode se base sur l'hypothèse que le vrai pattern de l'état de surface du sol est stable dans le temps. D'après les observations et les résultats obtenus dans notre contexte, cette hypothèse est acceptable. La méthode présente néanmoins un certain nombre de limites associées au besoin de calculer le variogramme : besoin des limites des parcelles, besoin d'un nombre minimum de pixels, etc.

Une fois le vrai pattern identifié, son explication est donnée, pour un certain nombre de parcelles, à l'aide d'une série temporelle historique d'images aériennes. Ces images ont permis d'illustrer l'influence du remembrement et/ou de l'installation du drainage dans les années 60-70 sur le pattern du sol observable actuellement. Outre ces limites dites historiques, des *patches* de sols intra parcellaires et inter parcellaires ont été identifiés et leurs limites extraites à l'aide des outils de segmentation. Ces limites de zones ont été attribuées directement au sol.

D'un point de vue pédologique, il est intéressant d'étudier, s'il existe, le lien entre ces limites établies par télédétection (donc basées sur l'observation de l'état de surface du sol) et des unités de sols différenciées sur le terrain.

Ce travail n'a pas été réalisé car dans notre démarche, nous nous sommes intéressés en priorité à l'étude de la relation entre cette distribution du sol et la distribution du rendement.

La relation entre le sol et le rendement (3). Cette partie a pour objectif d'étudier la part de l'explication du pattern du rendement par le pattern du sol. Compte tenu de l'intérêt du coefficient de co-dispersion pour comparer les patterns, ce coefficient a été utilisé pour comparer le pattern du sol et celui du rendement.

Nos résultats suggèrent que la distribution spatiale des sols n'est que rarement suffisamment importante pour induire une distribution spatiale du rendement. On peut penser que l'histoire des parcelles, les compétences agronomiques des agriculteurs, ont progressivement fait disparaître les éléments majeurs de causalité liés seulement au sol soit par des corrections (apport d'amendement calcaire pour corriger le pH, utilisation de l'irrigation pour

compenser une insuffisance de la réserve en eau du sol pendant la période estivale), soit par un abandon de la culture sur une partie de la parcelle (sol trop peu profond).

Le travail de l'agriculteur, qui cherche à gommer la variabilité, est donc une des explications de ces résultats. Comme nous l'avons dit précédemment, l'itinéraire technique peut jouer un rôle important dans la distribution spatiale du rendement.

Pour étudier ces relations spatiales, il est nécessaire d'aborder l'analyse au cas par cas et de bien connaître la distribution spatiale des deux facteurs principaux : le sol et l'itinéraire technique. Cette analyse, au cas par cas, a été réalisée pour deux parcelles où les vrais patterns de sol, de rendement et de la végétation étaient disponibles. Avec ces données et la connaissance de l'itinéraire technique pratiqué sur les parcelles, nous avons pu attribuer et expliquer le pattern des différentes variables.

Concernant les relations entre le NDVI (indice représentatif de l'état de la végétation) et le rendement, malgré de faibles corrélations, nous avons observé que les images prises pendant la période du plateau de développement de la culture (de juillet à septembre) étaient les plus adaptées pour caractériser la distribution spatiale représentative et en corrélation avec le rendement.

Une approche similaire, de comparaison des patterns et non des valeurs peut être intéressante, en comparant le pattern de la carte de rendement avec le pattern issu des modèles. En modélisation, on peut globalement maîtriser ou étudier l'apport de chaque variable sur la distribution spatiale du rendement, ainsi que leurs interactions. Suivant cette logique, Houlès (Houlès, 2004) a comparé les résultats de simulation d'un certain nombre de variables avec les résultats des observations en appelant cela : « caractérisation de la qualité de la spatialisation des simulations ».

Méthode de stratification (4). La méthode de stratification doit aboutir à un découpage du bassin versant en zones présentant un potentiel de mise en place d'une démarche d'agriculture de précision. Cela implique de trouver une méthode « spatialisable » et de savoir expliquer (en termes agronomique et pédologique) les zones. La spatialisation a été réalisée par le calcul de la variabilité locale (fenêtre 3×3) d'un certain nombre de descripteurs. L'utilisation d'une fenêtre kernel permet d'apprécier la variabilité locale et, de l'associer à un potentiel de modulation des pratiques agricoles. Une très forte variabilité locale est difficilement gérable par l'agriculteur (trop faible échelle d'opérationnalité) d'où un faible potentiel de mise en place d'une démarche d'agriculture de précision. Outre le sens

agronomique lors du choix de la méthode (possibilité de modulation liée au degré de variabilité locale), lors du choix du descripteur de variabilité locale (parmi les 5 descripteurs proposés) un sens pédo-géomorphologique a été associé au descripteur retenu.

Comme pour toute méthode basée sur des indices, elle nécessite l'établissement de seuils (forte ou faible variabilité) ayant une signification. Dans notre cas, ces seuils n'ont pas été établis, un approfondissement basé sur la connaissance d'expert doit être réalisé. Face à cette absence d'expertise, nous avons vérifié si les valeurs avaient un sens geomorphologique. Pour cela, nous avons vérifié si la distribution spatiale des valeurs (donc de la variabilité locale) correspondait aux structures pédo-géomorphologiques du bassin versant. Cette correspondance étant significative, nous estimons que le descripteur utilisé a un sens.

Une fois le potentiel défini à l'échelle du bassin versant, il est nécessaire de s'interroger sur la valeur du potentiel à une échelle plus fine : la parcelle. En effet, les agriculteurs intéressés ont besoin de connaître l'indice de potentiel parcellaire de leurs terrains afin de savoir si une démarche de modulation est envisageable ou non au sein de leur exploitation. Cet indice doit être basé sur la distribution spatiale et le degré de variabilité. Pour réaliser ce travail, nous envisageons deux approches :

- Approche de Pringle (Pringle et al., 2003) modifiée

Cette approche est basée sur la géostatistique. Après le calcul et l'ajustement du variogramme, deux composantes sont calculées. Une des composantes exprime le degré de variabilité et l'autre composante la distribution spatiale du rendement. La même logique a été utilisée par Garrigues (Garrigues, 2004) pour classer des paysages de différentes parties du globe en terme d'hétérogénéité.

Dans l'application que nous voulons en faire (potentiel parcellaire), la difficulté de la méthode se trouve dans l'association à établir entre les valeurs de l'indice calculé et une signification agronomique, dans un contexte d'agriculture de précision.

Il sera donc intéressant d'appliquer ces méthodes géostatistiques à l'indice de brillance obtenu par télédétection. La difficulté sera ensuite l'établissement du lien entre les valeurs de l'indice et une signification agronomique, dans un contexte d'agriculture de précision.

- Approche des indices de paysage

Suite à une segmentation basée sur la variabilité locale, nous disposons d'un certain nombre de polygones. A partir de ces polygones, des indices de paysages basés sur la

forme et la densité et ayant un sens agronomique peuvent être calculés. Par exemple ; une parcelle très longue (indice de forme) avec un grand nombre de patches variables (indice de densité relié à l'information de la stratification) a un potentiel de 2 sur 10. Cette logique, en arborescence, permettrait comme pour la méthode précédente de tenir compte de la variabilité et de la distribution des patterns sans passer par une modélisation du variogramme. Cette méthode nécessite également une expertise agronomique pour établir la relation entre les indices de paysage et l'agriculture de précision.

Ce travail de comparaison d'approches devrait être la continuation d'une partie de ce travail de thèse dans le cadre d'une collaboration entre le LTGT et Arvalis – Institut du végétal.

Bibliographie

Références bibliographiques

- ACPA, 2003. Australian centre for precision agriculture, <http://www.usyd.edu.au/agric/acpa/precis.htm>.
- ARAI, K., 1993. A classification method with a spatial-spectral variability. *int. j. remote sensing*, **14**(4): pp. 699-709.
- ARMSTRONG, M. et CARIGNAN, J., 1997. *Géostatistique linéaire : application au domaine minier*. Les cours - École des mines de Paris. pp. 112. (Paris: Ecole de Mines de Paris).
- ATKINSON, P. M., 2001. Geostatistical Regularization in Remote Sensing. In, *Modelling Scale in Geographical Information Science*. Atkinson, P. M. (Ed.), pp.237 - 260. Jhon Wiley & Sons, LTD).
- ATKINSON, P. M. et APLIN, P., 2004. Spatial variation in land cover and choice of spatial resolution for remote sensing. *Int. J. Remote Sensing*, **25**(18): pp. 3687 - 3702.
- ATKINSON, P. M. et CURRAN, P. J., 1997. Choosing an Appropriate Spatial Resolution for Remote Sensing Investigations. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING*, **63**(12): pp. 1345 - 1351.
- AUBRY, P., 2000. Le traitement des variables régionalisées en écologie apports de la géomatique et de la géostatistique, Lyon 1, Lyon
- AUBRY, P. et PIÉGAY, H., 2001. Pratique de l'analyse de l'autocorrélation spatiale en géomorphologie: définitions opératoires et tests. *Géographie physique et quaternaire*, **55**(2): pp. 11-129.
- AUERNHAMMER, H., 2001. Precision farming - the environmental challenge. *Computers and Electronics in Agriculture*, **30**(1-3): pp. 31-43.
- BAATZ, M., BENZ, U., DEGHANI, S., HEYNEN, M., HÖLTJE, A., HOFMANN, P., LINGENFELDER, I., MIMLER, M., SOHLBACH, M., WEBER, M. et WILLHAUCK, G., 2004. eCognition USER GUIDE 4, Definiens Imaging, Germany.
- BALAS, B., LACROIX, J. M. et DEUMIER, J. M., 1990. L'irrigation du maïs grain en sol de boubènes. In: S.O., A. (ed.), *Les sols de boubènes*, Toulouse.
- BARET, F., 1999. Potentiel de la télédétection pour l'agriculture de précision, L'enjeu français de l'agriculture de précision: Hétérogénéité parcellaire et gestion des intrants. INRA, Cemagref, ITCF, pp. 8-11.
- BARET, F., JACQUEMOUD, D. et HANOCQ, J. F., 1993. The soil line concept in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, **7**: pp. 65 - 82.
- BARNES, E. M. et BAKER, M. G., 2000. Multispectral data for mapping soil texture: Possibilities and limitations. *Applied Engineering in Agriculture*, **16**(6): pp. 731-741.

- BARNES, E. M., SUDDUTH, K. A., HUMMEL, J., W., LESCH, S. M., CORWIN, D. L., YANG, C., DAUGHTRY, G. S. T. et BAUSCH, W. C., 2003. Remote and Ground-Based Sensor Techniques to Map soil Properties. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **69**(6): pp. 619-630.
- BASSO, B., 2001. Perspectives of precision agriculture in conservation agriculture, I World Congress on Conservation Agriculture, Madrid.
- BEAUCHEMIN, M., FUNG, K. B. et GENG, X., 2002. A method on local variance for quality assessment of multiresolution image fusion, Photogrammetric Computer Vision-ISPRS Commission III, Symposium 2002, Graz, Austria.
- BEGON, J. C., 1990. Les sols de boubènes du Toulousain. In: S.O., A. (ed.), Les sols de boubènes, Toulouse.
- BEN-DOR, E., GOLDSHLEGER, N., BENYAMINI, Y., AGASSI, M. et BLUMBERG, D. G., 2003. The Spectral Reflectance Properties of Soil Structural Crusts in the 1.2- to 2.5- μ m Spectral Region. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **67**: pp. 289-299.
- BEN-DOR, E., GOLDSHLEGER, N., BENYAMINI, Y., BLUMBERG, D. et AGASSI, M., 1995. Near-Infrared Analysis as a Rapid Method to Simultaneously Evaluate Several Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **59**: pp. 364-372.
- BIERKENS, M. F. P., FINKE, P. A. et DE WILLIGEN, P., 2000. *Upscaling and Downscaling Methods for Environmental Research*. pp. 204. (Hardbound: Kluwer Academic Publishers).
- BIRREL, S. J., SUDDUTH, K. A. et BORGELT, S. C., 1996. Comparaison of sensors and techniques for crop yield mapping. *Computers and electronics in Agriculture*, **14**: pp. 215 - 233.
- BLACKMORE, B. S., 1999a. Developing the principles of precision farming, Agrotech 99. Barretos Institute of Technology, Barretos, Brazil.
- BLACKMORE, S., 1999b. Developing the principles of precision farming, Agrotech 99. Barretos Institute of Technology, Barretos - Brazil, pp. 4.
- BLACKMORE, S., 2000. The interpretation of trends from multiple yield maps. *Computers and Electronics in Agriculture*, **26**(1): pp. 37-51.
- BLACKMORE, S., GODWIN, R. J. et FOUNTAS, S., 2003. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. *Biosystems Engineering*, **84**(4): pp. 455-466.
- BLACKMORE, S. et MARSHALL, C., 1996. Yield Mapping; Errors and Algorithms. In: Institute, P. a. P. (ed.), 3rd International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, pp. 10.
- BOCCHI, S., CASTRIGNANO, A., FORNARO, F. et MAGGIORE, T., 2000. Application of factorial kriging for mapping soil variation at field scales. *Europ. J. Agronomy*, **13**: pp. 295 - 308.

- BOISGONTIER, D., 1997. Conduite de parcelles. Prendre en compte l'hétérogénéité des parcelles, Perspectives agricoles, pp. 20 - 21.
- BOISGONTIER, D. et ARIAUX, B., 1998. Agriculture de précision: Comment la pratiquer dès aujourd'hui, Perspectives agricoles, pp. 28-32.
- BOURENNANE, H., NICOULLAUD, B., COUTURIER, A. et KING, A. J., 2001. Spatial distribution of the temporal variance and effects of soil types and grain varieties on the wheat yield variability. In: Blackmore, G. G. S. (ed.), ECPA 2001, Proceedings of the 3rd European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, France.
- BOUZIGUES, R. et CHOSSAT, J. C., 1990. Le drainage en sol de brousses. Apports de la méthode secteurs de référence - drainage. In: S.O., A. (ed.), Les sols de brousses, Toulouse.
- BRISCO, B., BROWN, R. J., HIROSE, T., MCNAIRN, H. et STAENZ, K., 1998. Precision agriculture and the role of remote sensing: A review. *Canadian Journal of Remote sensing*, **24**(3): pp. 315 - 327.
- BROOS, B., MISSOTTEN, B., REYBROUCK, S. et BAERDEMAEKER, J. D., 1999. Mapping and interpretation of sugar beet yield differences, 4th International Conference on Precision Agriculture, pp. 171 - 178.
- BURROUGH, P. A., 2001. GIS and geostatistics: Essential partners for spatial analysis. *Environmental and Ecological Statistics*, **8**: pp. 361 - 377.
- C.R.A.M.P., 1995. Les grands ensembles morpho-pédologiques de la région Midi-Pyrénées, Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées.
- CABRIÈRES, B., 2001. SPOT4-CNES. CNES.
- CABROL, F., 2002. Les cartes de rendement: Sources d'erreurs, Extraction d'informations, ESAP, Toulouse.
- CAMBARDELLA, C. A., MOORMAN, T. B., NOVAK, J. M., PARKIN, T. B., KARLEN, D. L., TURCO, R. F. et KONOPKA, A. E., 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **58**: pp. 1501-1511.
- CARRÉ, F., 2002. Cartogénèse des sols et changements d'échelle : application dans la région de La Rochelle sur une base de données pédologiques de plusieurs milliers d'observations, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris
- CEMAGREF (ed.), 1988. Guide technique du forestier méditerranéen français. pp.
- CERON, J., 2003. Cartes de rendement: Procédures d'élaboration et éventuelles améliorations. Rapport d'études Thesis, ESAP, Toulouse
- CHANG, C.-W., LAIRD, D. A., MAUSBACH, M. J. et HURBURGH, J. C. R., 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy-Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **65**: pp. 1027 - 1034.

- CHAVEZ, P. S., 1992. Comparison of spatial variability in visible and near-infrared spectral images. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING & REMOTE SENSING*, **58**: pp. 957 - 964.
- CHEN, F., KISSEL, D. E., WEST, L. T. et ADKINS, W., 2000. Field-Scale Mapping of Surface Soil Organic Carbon Using Remotely Sensed Imagery. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **64**: pp. 746 - 753.
- CHICA-OLMO, M. et ABARCA-HERNANDEZ, F., 1998. Radiometric coregionalization of landsat TM and SPOT HRV images. *Int. J. Remote Sensing*, **19**: pp. 997-1005.
- CHICA-OLMO, M. et ABARCA-HERNANDEZ, F., 2000. Computing geostatistical image texture for remotely sensed data classification. *Computers and Geosciences*, **26**: pp. 373-383.
- CHUVIECO, E., 1996. *Fundamentos de la télédétection*. pp. 568. (Madrid: RIALP).
- COLOMBO, S., CHICA-OLMO, M., ABARCA, F. et EVA, H., 2004. Variographic analysis of tropical forest cover from multi-scale remotely sensed imagery. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **58**(5-6): pp. 330-341.
- COOPS, N. et CULVENOR, D., 2000. Utilizing local variance of simulated high spatial resolution imagery to predict spatial pattern of forest stands. *Remote Sensing of Environment*, **71**(3): pp. 248-260.
- CRESSIE, N. A. C., 1991. *Statistics for spatial data*. pp. 900. (New York: Wiley).
- CURRAN, P. J., 1988. The semivariogram in remote sensing an introduction. *Remote Sens Environ*, **24**: pp. 493-507.
- CURRAN, P. J. et ATKINSON, P. M., 1998. Geostatistics and remote sensing. *Progress in Physical Geography*, **22**(1): pp. 61 - 78.
- DABAS, M., ROUILLER, D. et TABBAGH, J., 2000. Caractérisation de la variabilité spatiale intraparcélaire des sols agricoles par mesure en continu de leur résistivité (méthode MUCEP), Agriculture de précision: Avancées de la recherche technologiques et industrielle. ENESAD, Dijon (Fr).
- DABAS, M., TABBAGH, J. et BOISGONTIER, D., 2001. Multi-depth continuous electrical profiling (MuCEP) for characterization of in-field variability, 3rd European Conference on Precision Agriculture, Montpellier (Fr).
- DE JONG, S. M., HORNSTRA, T. et MAAS, H.-G., 2001. An integrated spatial and spectral approach to the classification of Mediterranean land cover types: the SSC method. *Journal of applied geosciences*, **3**(2): pp. 176 - 183.
- DEMATTE, J. A. et GARCIA, G. J., 1999. Alteration of Soil Properties through a Weathering Sequence as Evaluated by Spectral Reflectance. *Soil Soc. Am. J.*, **63**: pp. 327-342.
- DENUX, J., 2004. Projet ADAM: Elaboration des cartes de rendement et organisation des données pour la validation des résultats de modélisation, LTGT - CNES, Toulouse.

- DRUCBERT, J.-G., 2002. Mise en évidence de la variabilité intra parcellaire par l'utilisation de cartes de rendement sur une période de trois ans. Mémoire fin d'études Thesis, ISAB - ESAP
- DUBUCQ, M., 1989. Identification et cartographie par télédétection des sols érodés: Application au Lauragais Toulousain, Université Paul Sabatier, Toulouse
- DUNGAN, J. L., 2001. Scaling up and Scaling Down: The relevance of the support effect on Remote sensing of vegetation. In, *Modelling Scale in Geographical Information Science*. Atkinson, P. M. (Ed.), pp.221-236. Jhon Wiley & Sons, LTD).
- DUTILLEUL, P. et LEGENDRE, P., 1993. Spatial heterogeneity against heteroscedasticity: an ecological paradigm versus a statistical concept. *Oikos*, **66**: pp. 152-167.
- DWIVEDI, R. S., 2001. Soil resources mapping: A remote sensing perspective. *Remote Sensing Reviews*, **20**: pp. 89- 122.
- EARL, R., P.N., W., B.S., B. et R.J., G., 1996. Precision farming - The management of variability. *Landwards*, **51**(No 4): pp. 18-23.
- EARL, R., TAYLOR, J. C., WOOD, G. A., BRADLEY, I., JAMES, I. T., WAINE, T., WELSH, J. P., GODWIN, R. J. et KNIGHT, S. M., 2003. Soil factors and their influence on within-field crop variability, part 1: Field observation of soil variation. *Biosystems Engineering*, **84**(4): pp. 425-440.
- EARL, R., THOMAS, G. et BLACKMORE, B. S., 2000. The potential role of GIS in autonomous field operations. *Computers and electronics in agriculture*, **25**: pp. 107 - 120.
- EGHBALL, B., BINFORD, G. D., POWER, J. F., BALTENSPERGER, D. D. et ANDERSON, F. N., 1995. Maize temporal yield variability under long-term manure and fertiliser application: fractal analysis. *Soil Sci. Soc. Am.J*, **59**: pp. 1360-1364.
- EGHBALL, B., HERGERT, G. W., LESOING, G. W. et FERGUSON, R. B., 1999. Fractal analysis of spatial and temporal variability. *Geoderma*, **88**(3-4): pp. 349-362.
- ENSAM, 2002. Sols et Paysages. ENSAM.
- ESCADAFAL, R., 1989. Caractérisation de la surface des sols arides par observation de terrain et par télédétection, Paris VI, Paris
- ESCADAFAL, R., 1993. Remote sensing of soil color: principles and applications. *Remote Sensing Reviews*, **7**: pp. 261 - 279.
- ESCADAFAL, R., GIRARD, M. C. et COURAULT, D., 1988a. La couleur des sols: appréciation, mesure et relations avec les propriétés spectrales. *Agronomie*, **8**(2): pp. 147 - 154.
- ESCADAFAL, R., GIRARD, M. C. et COURAULT, D., 1988b. Modeling the relationships between munsell soil color and soil spectral properties. *International Agrophysics*, **4**(3): pp. 249 - 261.

- FAVROT, J., BOUZIGUES, R., LONGUEVAL, C., CHOSSAT, J. C. et BOURGEAT, F., 1990. Rôle de la structure du sol sur le fonctionnement hydraulique d'une réseau de drainage en sol lessivé hydromorphie du bassin aquitain. In: S.O., A. (ed.), Les sols de boubènes, Toulouse.
- FÉRET, S. et DOUGUET, J.-M., 2001. Agriculture durable et agriculture raisonnée. Quelles principes et quelles pratiques pour la soutenabilité du développement en agriculture? *Natures Sciences Sociétés*, **9**(1): pp. 58 - 64.
- FORSHAW, M. R. B., AND AL, 1983. Spatial resolution of remotely sensed imagery. *international Journal of remote sensing*, **4**(3): pp. 497-520.
- FRAISSE, C. W., SUDDUTH, K. A., KITCHEN, N. R. et FRIDGEN, J. J., 1999. Use of unsupervised clustering algorithms for delineating within-field management zones, ASAE International Meeting, Toronto, Ontario Canada.
- FRIDGEN, J. J., 2000. Delineation and analysis of site-specific management zones, Second international conference on geospatial information in agriculture and forestry, Lake Buena Vista, Florida.
- FROGBROOK, Z. L. et OLIVER, M. A., 2000. The effects of sampling on the accuracy of predictions of soil properties in precision agriculture, 4th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Ressources and Environmental Sciences, Amsterdam, pp. 225-232.
- GADDAS, F., 2001. Proposition d'une methode de cartographie des pedopaysages - Application à "la moyenne vallée du Rhone", Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris
- GARRIGUES, S., 2004. Hétérogénéité spatiale des surfaces terrestres en télédétection : caractérisation et influence sur l'estimation des variables biophysiques, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes, Avignon
- GAY, M. et CHÉRET, V., 1999. Anayse de la variabilité statique intraparcellaire au moyen de données de télédétection satellitale, Colloque ICTA VII, Florence (Italy).
- GAY, M. et DENUX, J.-P., 2000. La télédétection satellitale, une donnée pour l'agriculture de precision. In: Zwaenepoel, P. (ed.), Dijon, pp. 197 - 213.
- GILABERT, M. A., GONZALEZ-PIQUERAS, J., GARCIA-HARO, F. J. et MELIA, J., 2002. A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, **82**(2-3): pp. 303-310.
- GIRARD, M. C. et GIRARD, C. M., 1999. *Traitement de données de télédétection*. pp. 560. (Paris: Dunod).
- GOLD, M., V., 1999. Sustainable agriculture: Definitions and Terms. (Special Reference Briefs Series no. SRB 99-02), National Agricultural Library - Agriculture Research Service, Beltsville.
- GOOVAERTS, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation.*, pp. 483. (New-York: Oxford Univ. Press).

- GOOVAERTS, P., 1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility of Soils*, **27**(4): pp. 315-334.
- GOULARD, M. et VOLTZ, M., 1992. Linear Coregionalization Model: Tools for Estimation and Choice of Cross-Variogram Matrix. *Mathematical Geology*, **24**(3): pp. 269- 286.
- GOUV.QUÉBEC, 2004. Rapport du Comité Scientifique chargé d'examiner le calcul de la possibilité forestière, Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs - Direction de la recherche forestière, Qué.
- GRENZDÖRFFER, G. J. et GEBBERS, R. I. B., 2001. Seven years of yield mapping - Analysis and possibilities of multi year yield mapping data. In: Grenier, G. (ed.), Third European Conference on Precision Agriculture. Agro-Montpellier, Montpellier, Fr, pp. 31- 36.
- GROUPE_CHADULE, 1994. *Initiation aux pratiques statistiques en géographie*. pp. 203. (Paris, New York, Barcelone: Masson).
- GUIRESSE, A. M., 1989. Drainage en sols de boubènes: relation entre les caractéristiques morphologiques et les propriétés hydrodynamiques des sols, Institut national polytechnique, Toulouse
- GUIRESSE, A. M. et BOURGEAT, F., 1990. Expérimentation en sols de boubènes : efficacité d'un réseau de drainage et caractéristiques des sols. In: S.O., A. (ed.), Les sols de boubènes, Toulouse.
- GUSTAFSON, E. J., 1998. Quantifying Landscape Spatial Pattern: What Is the State of the Art? *Ecosystems*, **1**: pp. 143-156.
- HARALICK, R. M., 1973. textural feautres for image classification. *IEEE Trans.Syst. Man, Cybernetics, SMC*, **3**: pp. 610-621.
- HORNSTRA, T., MAAS, H. G. et DE JONG, S. M., 2000. Classification of Spectroscopical Imagery by Combining Spectral and Spatial Information: the SSC Method, 19th ISPRS Congres, Amsterdam, pp. 347-354.
- HOULÈS, V., 2004. Mise au point d'un outil de modulation intra parcellaire de la fertilisation azotée du blé d'hiver basé sur la télédétection et un modèle de culture, INA-PG, Paris
- HUBSCHMAN, J., 1975. Morphogenèse et pédogenèses quaternaires dans le piémont des Pyrénées garonnaises et ariégeoises, Univ. Toulouse Mirail, Toulouse
- HUBSCHMAN, J., 1990. Eléments pour une histoire géologique des boubènes. In: S.O., A. (ed.), Les sols de boubènes, Toulouse.
- HUETE, A. R. et ESCADAFAL, R., 1991. Assessment of Biophysical Soil Properties Through Spectral Decomposition Techniques. *Remote Sensing Environement*, **35**: pp. 149 - 159.

- ISAAKS, E. H. et SRIVASTAVA, R. M., 1989. *An introduction to applied geostatistics*. pp. 561. (New York: Oxford Univ. Press).
- JOERNSGAARD, B. et HALMOE, S., 2003. Intra-field yield variation over crops and years. *Europ. J. Agronomy*, **19**: pp. 23 -33.
- KERRY, R. et OLIVER, M. A., 2003. Variogram of ancillary data to aid sampling for soil surveys. *Precision agriculture*, **4**: pp. 253 - 270.
- KITCHEN, N. R., SUDDUTH, K. A. et DRUMMOND, S. T., 1998. An evaluation of methods of determining Site-Specific Management Zones. In: Institute, P. P. (ed.), *Proceedings of the North Central Extension-Industry soil fertility conferences*, St Louis, Missouri, pp. 133 139.
- LACAZE, B., RAMBAL, S. et WINKEL, T., 1994. Identifying spatial patterns of mediterranean landscapes from geostatistical analysis of remotely-sensed data. *Int. J. Remote Sens.*, **15**(12): pp. 2437 - 2450.
- LAJAUNIE, C. et WACKERNAGEL, H., 2000. Geostatistical Normalization - Theoretical Framework, ENSMP - ARMINES, Fontainebleau.
- LAPORTERIE, F., 2002. Représentations hiérarchiques d'images avec des pyramides morphologiques. Application à l'analyse et à la fusion spatio-temporelle de données en observation de la Terre, Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse
- LARK, R. M. et STAFFORD, J. V., 1997. Classification as a first step in the interpretation temporal and spatial variation of crop yield. *Ann. appl Biol.*, **130**: pp. 111 - 121.
- LARSCHEID, G. et BLACKMORE, B. S., 1996. Interactions between farm managers and information systems with respect to yield mapping. In: Institute, P. a. P. (ed.), *3rd International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, pp. 10.
- LAUNAY, M., 2002. Diagnostic et prévision de l'état des cultures à l'échelle régionale: couplage entre modèle de croissance et télédétection - Application à la betterave sucrière en Picardie, INA-PG, Paris
- LAUNAY, M., GUÉRIF, M. et DEDIEU, G., 1999. Utilisation d'un modèle de correction atmosphérique (SMAC) pour le calcul de réflectances au sol à partir d'images SPOT. *Photo-interprétation*, **37**: pp. 3-27.
- LAYROL, L., FRANCOIS, O. et LEPOUTRE, D., 2001. Multi-temporal yield, 3th international conference of geospatial information in agriculture and forestry.
- LAYROL, L., HEDOIN, E. et LEPOUTRE, D., 2000. Matching multitemporal yield and images data. In: al., P. C. R. e. (ed.), *5 th International conference on Precision agriculture*. ASA Misc., Madison.
- LEENHARDT, D., 1991. Spatialisation du bilan hydrique. Propagation des erreurs d'estimation des caractéristiques du sol au travers des modèles de bilan hydrique. Cas du blé dur d'hiver., ENSA- Montpellier, Montpellier

- LEGENDRE, P., 1993. Spatial autocorrelation: Trouble or new paradigm? *Ecology*, **74**(1659 - 1673): pp.
- LEGENDRE, P. et BORCARD, D., (Submitted). Statistical comparison of univariate test of homogeneity of variances. *Journal of Statistical Computation and Simulation*: pp.
- LEGENDRE, P. et LEGENDRE, L., 1998. *Numerical Ecology*. pp. 853. (Amsterdam:
- LEGROS, J.-P., 1996. *Cartographie des sols- De l'analyse spatiale à la gestion des territoires*. Collection Gérer l'environnement. pp. 370
- LEIVA, F. R., MORRIS, J. et BLACKMORE, B. S., 1997. Precision Farming Techniques for sustainable agriculture, 1st European Conference on Precision Agriculture, Warwick UK.
- LEON, C. T., SHAW, D. R., COX, M. S., MELINDA J. ABSHIRE, WARD, B., WARDLAW III, M. C. et WATSON, CLARENCE, 2003. Utility of Remote Sensing in Predicting Crop and Soil Characteristics. *Precision agriculture*, **4**: pp. 359 - 384.
- LI, H. et REYNOLDS, J. F., 1994. A simulation experiment to quantify spatial heterogeneity in categorical maps. *Ecology*, **75**(8): pp. 2446 - 2455.
- LI, H. et REYNOLDS, J. F., 1995. On definition and quantification of heterogeneity. *Oikos*, **73**(2): pp. 280 - 284.
- MALLARINO, A. P., OYARZABAL, E. S. et P.N., H., 1999. Interpreting within-field relationships between crop yields and soil and plant variables using factor analysis. *Precision Agriculture*, **1**: pp. 15 - 25.
- MALLEY, D. F., YESMIN, L., WRAY, D. et EDWARDS, A. S., 1999. Application of Near - Infrared Spectroscopy in Analysis of Soil Mineral Nutrients. *Commun. Soil sci. plant anal*, **30**(7): pp. 999-1012.
- MANE, L., BOIVIN, P., RICHARD, J.-F. et HAMMECKER, C., 1997. Analyse des relations entre les constituants des sols, la dynamique de la surface et les réflectances simulées ou mesurées par télédétection satellitaire. Exemple de la vallée du fleuve Sénégal. In: BRGM, I., ORSTOM, UPMC (ed.), GEOFCAN -Géophysique des sols et des formations superf i c i e l l e s, Bondy, France.
- MARTY, J. R., 1969. Caractères et Propriétés physiques. Conséquences agronomiques, INRA, Toulouse.
- MATHIEU, R., KING, C. et BISSONNAIS, L., 1997. Contribution of multi-temporal SPOT data to the mapping of a soil erosion index. The case of loamy plateaux of nothern France. *Soil Technology*, **10**: pp. 99 - 110.
- MAZIERES, C., 1990. L'évolution des systèmes d'exploitation agricole sur les boubènes. In: S.O., A. (ed.), Les sols de boubènes, Toulouse.
- MCBRATNEY, A. B. et PRINGLE, M. J., 1997. Spatial variability in soil - implications for precision agriculture. In, *Precision Agriculture 1997*. Stafford, J. V. (Ed.), pp.pp 3-32. (Oxford, England: Bios).

- MELITA, K. et KOPP, S., 2002. Comprendre les projections, ESRI, Redlands (USA).
- MEROUR, X., 2001. Etude de la chaîne de traitement des données de rendement issues de capteur de rendement pour l'agriculture de précision., ESA-Angers, Angers
- MICHOT, D., 2003. Intérêt de la géophysique de subsurface et de télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire, Université Paris 6, Paris
- MILLEVILLE, P., 1972. Approche agronomique de la notion de parcelle en milieu traditionnel africain: la parcelle d'arachnide en moyenne-Casamance. *Cahiers ORSTOM, série Biologie*, **17**: pp. 23 - 37.
- MORAN, M. S., INOUE, Y. et BARNES, E. M., 1997. Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management. *Remote Sensing Environment*: pp. 319 - 346.
- MOUGENOT, B., 1993. Effets des sels sur la réflectance et télédétection des sols salés. *Cahiers ORSTOM, série Pédologie*, **28**(1): pp. 45-54.
- MOUGENOT, B., EPEMA, G. F. et POUGET, M., 1993. Remote sensing of salt affected soils. *Remote sensing Review*, **7**: pp. 241-259.
- MOUGENOT, B., ZANTE, P. et MONTOROI, J. P., 1990. Détection et évolution saisonnière des sols alés et acidifiés du domaine fluvio-marin de basse Casamance au Sénégal par imagerie atellitaire. In, *Télédétection et Sécheresse*. AUPELF-UREF (Ed.), pp.173-179. (Paris: John Libbey Eurotext).
- MOULIN, S., DEDIEU, G. et FISCHER, A., 1997. Assimilation of optical satellite data into a crop process model: interannual study. In, *Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*. Phulpin, G. a. (Ed.), pp.767-771. (Courchevel, France:
- MULLER, E. et JAMES, M., 1994. Seasonal variation and stability of soil spectral patterns in a fluvial landscape. *Int. J. Remote Sensing*, **15**(9): pp. 1885 - 1900.
- MYNT, S. W., 2003. Fractal approaches in texture analysis and classification of remotely sensed data: comparisons with spatial autocorrelation techniques and simple descriptive statistics. *Int. J. Remote Sens.*, **24**(9): pp. 1925-1947.
- NOLAN, S. C., HAVERLAND, G. W., GODDARD, T. W., GREEN, M., PENNEY, D. C., HENRIKSEN, J. A. et LACHAPPELLE, J. A., 1996. Building a yield map form geo-referenced harvest measurements, Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, Minneapolis, pp. 884 - 892.
- OLIVER, M. A., 2001. Determining the spatial scale of variation in environmental properties using the variogram. In, *Modelling Scale in Geographical Information Science*. Atkinson , P. M. (Ed.), pp.193 - 219. Jhon Wiley & Sons, LTD).
- OMNIS.T.A.R., 2005. How it works. OmniS.T.A.R.
- PANNETON, B., BROUILLARD, M. et PIEKUTOWSKI, T., 2001. Integration of yield data form several years into a single map. In: Grenier, G. (ed.), Third European Conference on Precision Agriculture. Agro-Montpellier, Montpellier, Fr, pp. 73 - 78.

- PENALVER, F., BOHE, P. et LONGUEVAL, C., 1990. L'expérience de la CACG en matière de drainage des sols de boubènes. In: S.O., A. (ed.), Les sols de boubènes, Toulouse.
- PETTYGROVE, S., MILLER, R. O., PLANT, R. E., JACKSON, L. F., CAHN, M. D., KEARNEY, T. E., DENISON, R. F., YOUNG, J., UPADHYAYA, S. et USTIN, S., 1997. Developing Site-Specific Farming Information for Cropping Systems in California, Proceedings of the 25th Anniversary California Plant and Soil Conference, Visalia, pp. 125-129.
- PHILLIPS, J. D., 2001. The relative importance of intrinsic and extrinsic factors in pedodiversity. *Annals of Association of American Geographers*, **91**(4): pp. 609 - 621.
- PIERCE, F. J., ANDERSON, N. W., COLVIN, T. S., SCHUELLER, J. K., HUMBURG, D. S. et MCLAUGHLIN, N. B., 1997. Yield Mapping. In, *The state of Site-Specific Management for Agriculture*. Sadler, E. J. (Madison (USA): ASA-CSSA-SSSA).
- PLANT, R. E., 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*, **30**(1-3): pp. 9-29.
- POUCHIN, T., 2001. Élaboration d'un observatoire paysager : application à l'estuaire de la Seine, Université du Havre, Le Haver
- PRINGLE, H. C., SASSENATH-COLE, G. F. et THOMSON, S. J., 2001. Exploring the feasibility of remote sensing for detection of variability in soil water, crop vigor and yield with tillage, irrigation and soil type.
- PRINGLE, M. J., MCBRATNEY, A. B., WHELAN, B. M. et TAYLOR, J. A., 2003. A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using yield monitor data. *Agricultural Systems*, **76**(1): pp. 273-292.
- RAMSTEIN, G., AND M. RAFFY, 1989. Analysis of the structure of remotely-sensed images. *International Journal of remote sensing*, **10**: pp. 1019-1073.
- REYNERS, M., MAERTENS, K. et BAERDEMAEKER, D., 2001. Management of combine harvester precision farming data to make usefull maps. In: Grenier, G. (ed.), Third European Conference on Precision Agriculture. Agro-Montpellier, Montpellier, Fr.
- ROBERT, P. C., 2002. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. *Plant and Soil*, **247**(1): pp. 143-149.
- ROEL, A., PLANT, R. E., YOUNG, J. A., PETTYGROVE, G. S., DENG, J. et WILLIAMS, J. F., 2000. Interpreting yield patterns for california rice precision farm management, 5t International Conference on Precision Agriculture, Bloomington - Minnesota.
- SCHMOLDT, D. L., 2001. Editorial:Precision agriculture and information technology. *Computer and electronics in Agriculture - Elsevier*, **30**: pp. 5 - 7.
- SCULL, P., FRANKLIN, J., CHADWICK, O. A. et MCARTHUR, D., 2003. Predictive soil mapping: a review. *Progress in Physical Geography*, **27**(2): pp. 171-197.

- SEELAN, S. K., LAGUETTE, S., CASADY, G. M. et SEIELSTAD, G. A., 2003. Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing Environment*, **88**: pp. 157 - 169.
- SHATAR, T. M. et MCBRATNEY, A. B., 2001. Subdividing a field into contiguous management zones using a k-zone algorithm. In: Grenier, G. (ed.), Third European Conference on Precision Agriculture. Agro-Montpellier, Montpellier, Fr, pp. 115 - 120.
- SOMMER, M., WEHRHAN, M., ZIPPRICH, M., WELLER, U., CASTELL, W. Z., EHRLICH, S., TANDLER, B. et SELIGE, T., 2003. Hierarchical data fusion for mapping soil units at field scale. *Geoderma*, **112**(3-4): pp. 179-196.
- STEIN, A., BROUWER, J. et BOUMA, J., 1997. Methods for comparing spatial variability patterns of Millet yield and soil data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **61**: pp. 861 - 870.
- STONE, W. E., 2004. ASPRS Guide to land imaging satellites. ASPRS - Mitretek Systems.
- SUDDUTH, K. A., DRUMMOND, S. T. et KITCHEN, N. R., 2000. Measuring and interpreting soil electrical conductivity for precision agriculture, Second International geospatial information in agriculture and forestry conference, Lake Buena Vista, Florida.
- SUDDUTH, K. A., DRUMMOND, S. T. et KITCHEN, N. R., 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, **31**(3): pp. 239-264.
- SWINDELL, J. E. G., 1997. Mapping the spatial variability in the yield potential of arable land through GIS analysis of sequential yield maps. In: Stafford, J. V. (ed.), 1st European Conference on Precision Agriculture. Bios -SCI, pp. 827 - 835.
- THOMASSON, J. A., SUI, R., COX, M. S. et AL-RAJEHY, A., 2000. Soil Reflectance Sensing For Determining Soil Properties in Precision Agriculture. *Trans. ASAE*, **44**(6): pp. 1445 - 1453.
- THOMASSON, J. A., WOOTEN, J. R., COX, M. S., AL-RAJEHY, A. et SUI, R., 2001. Soil Reflectance Properties: Ground-based Versus Remotely Sensed Measurements, Trans. ASAE Annual International Meeting, Sacramento, California, USA.
- TOURINHO-SOTO, I., GAY, M. et DENUX, J.-P., 2004. Detection of stable soil temporal soil pattern by a geostatistical method based on remote sensing data: Application in Precision Agriculture, 7th International Conference on Precision Agriculture. IN PRESS, Minneapolis (USA).
- VAZZOLER, T., 1999. Mise au point d'une méthode de cartographie de rendement - Application à l'étude SPOT iV/MIR-résidu. Mémoire fin d'études Thesis, Toulouse
- VISCARRA ROSSEL, R. A. et MCBRATNEY, A. B., 1998. Laboratory evaluation of a proximal sensing technique for simultaneous measurement of soil clay and water content. *Geoderma*, **85**: pp. 19 - 39.

- VORLEY, B. et FERET, S., 2001. L'agriculture et le développement durable, Family Farming, Societies and Globalisation Network (APM).
- WACKERNAGEL, H., 1995. *Multivariate geostatistics: An introduction with applications*. pp. 256. (Berlin: Springer-Verlag).
- WASSENAAR, 2001. Reconnaissance des états de surface du sol en milieu viticole méditerranéen par télédétection à très haute résolution spatiale, Montpellier
- WEBSTER, R. et OLIVER, M. A., 2001. *Geostatistics for environmental scientists*. pp. 271. (Chichester: Wiley & Sons).
- WHELAN, B. M., 1998. Reconciling Continuous Soil Variation and Crop Yield - A study of some implications of within-field variability for site-specific crop management, University of Sydney, Australia
- WITNEY, B. D., 2003. SPECIAL ISSUE: Precision agriculture - Managing soil and crop variability for cereals. *Biosystems Engineering*, **84**(4): pp. 373-373.
- WOODCOCK, C. E., STRAHLER, A. H. et JUPP, D. L., 1988a. The use of variograms in remote sensing:I. scene models and simulated images. *Remote Sensing of Environment*, **25**: pp. 323-348.
- WOODCOCK, C. E., STRAHLER, A. H. et JUPP, D. L., 1988b. The use of variograms in remote sensing:II.Real digital images. *Remote Sensing of Environment*, **25**: pp. 349-379.
- WOODCOCK, S., 1987. The factor of Scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, **21**: pp. 311-332.
- ZAMMIT, C., 2000. Mise au point d'une méthode de réalisation des cartes de rendement: synthèse de la procédure d'élaboration de cartes de rendements. Mémoire fin d'études Thesis, ESAP, Toulouse
- ZHANG, N. Q., RUNQUIST, E., SCHROCK, M., HAVLIN, J., KLUITENBURG, G. et REDULLA, C., 1999. Making GIS a versatile analytical tool for research in precision farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, **22**(2-3): pp. 221-231.
- ZIMMER, D., BOUZIGUES, R., CHOSSAT, J. C., GUIRESSE, A. M. et FAVROT, J., 1990. Incidence des infiltrations profondes sur le drainage des boubènes. In: S.O., A. (ed.), Les sols de boubènes, Toulouse.
- ZWAENEPOEL, P. et LE BARS, J.-M., 1997. L'agriculture de precision, Ingénieries - EAT, pp. 67 - 79.

Table de matières

Remerciements.....	3
Résumé.....	5
Table des matières.....	7
Introduction : Contexte, objectifs et structure de la thèse.....	9
Contexte et objectifs	11
I. L’agriculture de précision	13
I.1. L’agriculture de précision : le terme	13
I.1.1. L’agriculture de précision et ses nuances	13
I.1.2. Agriculture de précision et connaissance.....	13
I.1.3. Agriculture de précision et agriculture durable	14
I.2. L’agriculture de précision : la démarche	15
I.2.1. Observer	15
I.2.2. Analyser	15
I.2.3. Agir	16
I.3. L’agriculture de précision : les outils et méthodes	16
I.3.1. L’Analyse spatiale	17
I.3.1.1. La géomatique.....	17
I.3.1.2. La géostatistique	17
I.3.2. Les systèmes de navigation globale : le positionnement	19
I.3.2.1. GPS	19
I.3.2.2. GALILEO	20
I.3.3. Les capteurs et méthodes	20
I.3.3.1. Mesures in situ	20
I.3.3.2. Méthodes géophysiques	20
- Mesures électriques	21
- Mesures par induction électromagnétique	21
I.3.3.3. Méthodes de télédétection.....	21
I.3.3.4. Les cartes de rendement.....	22
II. Terminologie associée à la « Variabilité »	23
II.1. La variabilité : composante de l’hétérogénéité	23
II.2. La variabilité à l’échelle intra parcellaire	25
III. Structure de la thèse	27

Première partie La variabilité du rendement.....	29
Introduction.....	31
IV. Le rendement : Acquisition et traitement.....	33
IV.1. L'acquisition	33
IV.1.1. Les outils.....	33
dGPS	33
Capteur de débit du grain :	33
Capteur d'humidité :	34
Capteur d'état de travail :	34
Capteur de vitesse :	34
IV.1.2. Etalonnage.....	34
Capteur de rendement :	34
Capteur d'humidité :	34
IV.1.3. Stockage.....	35
IV.2. Traitements	35
IV.2.1. Pré-traitements	35
Projection	35
IV.2.1.1. Temps de réponse	35
IV.2.1.2. La pondération	36
IV.2.2. « Potential Mapping ».....	37
IV.2.2.1. Limites de parcelles	37
IV.2.2.2. Grille d'extraction.....	37
IV.2.2.3. Extraction du rendement	38
IV.2.2.4. Interpolation.....	38
IV.3. Conclusion	39
V. La base de données : cartes de rendement	41
V.1. Localisation.....	41
V.1.1. Bassin Agricole du GCO en agriculture de précision.....	41
V.1.2. Bassin Versant du Touch	42
V.2. Données disponibles et récoltées	43
V.3. Analyse de la base de données.....	46
V.3.1. Mode d'utilisation des données	46
V.3.2. Valeur statistique de l'échantillon	47
V.4. Conclusion	48

VI.	Interprétation des cartes de rendement	51
VI.1.	Enquêtes auprès des agriculteurs	51
VI.1.1.	Origines pédoclimatiques.....	52
VI.1.1.1.	Effet de la pente	53
VI.1.1.2.	Effet du sol.....	54
VI.1.1.3.	Effet du voisinage	54
VI.1.2.	Origines anthropiques	55
VI.1.2.1.	Origines historiques	55
VI.1.2.2.	Modifications récentes	56
VI.1.3.	Conclusion	58
VI.2.	Zones intra parcellaires	59
VI.2.1.	Introduction.....	59
VI.2.2.	Matériel et méthodes.....	59
VI.2.3.	Résultats.....	60
VI.2.4.	Discussion	62
VI.3.	Analyse pluriannuelle des cartes de rendement.....	62
VI.3.1.	Introduction.....	62
VI.3.2.	Application de la méthode de Blackmore.....	63
VI.3.2.1.	Matériel.....	64
VI.3.2.2.	Méthodes.....	64
VI.3.2.3.	Résultats.....	66
VI.3.3.	Discussion	67
	Conclusion de la première partie	69
	Deuxième partie La variabilité du sol :.....	71
	Introduction.....	73
VII.	Zone d'étude et télédétection	77
VII.1.	Zone d'étude : Les sols de Boulbène	77
VII.1.1.	Contexte géomorphologique.....	77
VII.1.1.1.	Echelle régionale.....	77
VII.1.1.1.a.	Fy : Basse terrasse :	78
VII.1.1.1.b.	Fx : La moyenne terrasse :	78
VII.1.1.1.c.	Fw : Haute terrasse :	79
VII.1.1.1.d.	FV : Haut niveau	79
VII.1.2.	Contexte pédologique	80

VII.1.3.	Contexte agronomique	80
VII.1.3.1.	Drainage	80
VII.1.3.1.a.	Topographie (Penalver et al., 1990)	80
VII.1.3.1.b.	Plancher imperméable (Bouzigues et Chossat, 1990) :	81
VII.1.3.1.c.	Structure de l'horizon argilique (Favrot et al., 1990; Zimmer et al., 1990)	82
VII.1.3.2.	Irrigation	84
VII.1.4.	Conclusion	84
VII.2.	La télédétection	85
VII.2.1.	Généralités	85
VII.2.1.1.	Définition	85
VII.2.1.2.	Rayonnement électromagnétique	86
VII.2.1.3.	Les satellites	86
VII.2.1.4.	Le satellite SPOT	87
VII.2.1.5.	La réflectance spectrale	87
VII.2.2.	La télédétection et les sols	88
VII.2.2.1.	La réflectance spectrale des sols.	88
VII.2.2.2.	La réflectance spectrale des sols et ses facteurs d'influence	89
VII.2.2.2.a.	Facteurs extrinsèques :	89
VII.2.2.2.b.	Facteurs intrinsèques :	90
VII.2.2.2.b.1.	L'humidité :	90
VII.2.2.2.b.2.	La matière organique :	90
VII.2.2.2.b.3.	La granulométrie	90
VII.2.2.2.b.4.	Le calcaire	91
VII.2.2.2.b.5.	Le fer	91
VII.2.2.2.b.6.	La couleur	91
VII.2.2.2.b.7.	La rugosité	92
VII.2.3.	L'étude de la variabilité des sols par télédétection	92
VII.2.3.1.	La réflectance des sols et sa variabilité	92
VII.2.3.2.	Télédétection et géostatistique	93
VII.2.3.2.a.	La propriété d'observation et la variable observée :	95
VII.2.3.2.b.	La dimension spatiale :	96
i.	Taille du support	96
ii.	Taille de l'étendue	97

VII.2.3.2.c. La dimension temporelle :	97
VIII. Identification du « vrai <i>pattern</i> » du sol.....	99
VIII.1. Identification du sol nu	100
VIII.2. Identification du « vrai » <i>pattern</i>	101
VIII.2.1. Introduction.....	101
VIII.2.2. Zone d'étude	102
VIII.2.3. Matériel et méthodes.....	103
VIII.2.3.1. Données.....	104
VIII.2.3.1.a. Limites parcellaires	104
VIII.2.3.1.b. Données de télédétection	104
VIII.2.3.1.c. Processus de changement d'échelle et de propriété	105
VIII.2.3.2. Méthode	109
VIII.2.3.2.a. Coefficient de co-dispersion.....	110
VIII.2.3.2.b. Stabilité temporelle du pattern de l'indice de brillance	116
VIII.2.4. Résultats.....	116
VIII.3. Discussion et conclusion.....	120
IX. Explication du pattern de sol identifié	123
IX.1. Introduction.....	123
IX.2. Matériel et méthodes.....	124
IX.2.1. Images Satellites	124
IX.2.2. Images Aériennes.....	124
IX.2.3. Les parcelles.....	125
IX.2.4. Méthode de comparaison	125
IX.3. Résultats.....	125
IX.3.1. Vision générale	125
IX.3.2. Vision parcellaire : intra et inter	126
IX.4. Conclusion	128
Conclusion de la deuxième partie	131
Troisième partie Variabilité du sol et variabilité du rendement :	133
Introduction.....	135
X. Relations sol, rendement et végétation	137
X.1. Sol et rendement	137
X.1.1. Robustesse de l'identification du « vrai <i>pattern</i> » pour la corrélation.....	138
X.1.2. Corrélation spatiale entre l'indice de brillance et le Rendement	139

X.2.	NDVI et rendement.....	141
X.2.1.	Evolution de la corrélation du NDVI.....	143
X.2.2.	Corrélation entre le <i>pattern</i> du NDVI et le <i>pattern</i> du rendement.....	147
X.3.	Sol et NDVI	148
	Conclusion de la troisième partie.....	151
	Quatrième partie Stratification du bassin versant	153
	Introduction.....	155
XI.	La stratification	157
XI.1.	Descripteurs texturaux statistiques	158
XI.1.1.	Statistique simple (statistique empirique du 1 ^{ère} ordre)	158
XI.1.2.	Texture GLCM (Gray-level co-occurrence matrices).....	158
XI.1.3.	Fractales	158
XI.1.4.	Géostatistique.....	159
XI.2.	L'image de la texture	159
XI.2.1.	Mise en oeuvre.....	160
XI.2.2.	Interprétation.....	162
XI.3.	Résultats.....	162
	Conclusion de la quatrième partie.....	169
	Conclusion et perspectives.....	171
	Bibliographie.....	181
	Références bibliographiques	183
	Table de matières	197
	Liste des tables.....	203
	Liste des figures	205
	Liste des annexes	209
	Annexes.....	211

Liste des tables

Tableau I-1 Variables biophysiques estimables par télédétection. Le niveau de précision et la robustesse de l'estimation sont indiqués par le nombre de + (« ++++ » précis et robuste ; « - » non estimable par télédétection (Baret, 1999)	21
Tableau I-2 Variables biophysiques estimables par télédétection et utilisables pour différentes applications. Les domaines spectraux sont VIS : visible ; PIR : proche infrarouge ; MIR : moyen infrarouge ; IRT : infrarouge thermique ; μ onde : micro-ondes (Baret, 1999)	22
Tableau VI-1 Récapitulatif des sources de variation du rendement intra parcellaire. (* : Degré d'importance)	59
Tableau VII-1- Dates de prise de vue des images de la série SPOT	87
Tableau VIII-1 Parcelles étudiées et leur surface en hectares	104
Tableau VIII-2- Conditions climatiques 10 jours avant l'acquisition des images	105
Tableau VIII-3- Indices de sols	105
Tableau VIII-4- Statistique descriptive de l'indice de brillance pour les images sélectionnées.	106
Tableau VIII-5- Individus sélectionnés à partir de l'ACP	120
Tableau IX-1 Dates de prise de vue des images aériennes et leurs caractéristiques	125
Tableau XI-1 Analyses statistiques paramétriques et non paramétriques	165
Tableau XI-2 Résultats du Test de Kruskal-Wallis	166

Liste des figures

Figure I-1 - Composantes du variogramme : portée (a) , palier (C0+C) et effet pepite (C0). Variogramme expérimental (étoiles) et variogramme théorique (ligne continue)	18
Figure I-2 - Système global de correction différentiel du signal GPS en temps réel (Omnis.T.A.R., 2005)	19
Figure II-1 - Représentation de notions associées à l'échelle : l'étendue, la couverture, le support et le pixel.	24
Figure III-1- Structure de la thèse : En gris foncé les parties de la thèse, en gris clair les notions reliées à l'agriculture de précision.	27
Figure IV-1- Outils installés sur la moissonneuse batteuse	33
Figure IV-2- Information enregistrée dans l'Agropilot	35
Figure IV-3 - Correction du temps de réponse : Sur la partie gauche du zoom de l'image de gauche (signalé en rouge) on peut observer un groupe de points en jaune, devenant en vert sur le zoom de l'image de droite.	36
Figure IV-4 - Délimitation automatique des parcelles. (Denux, 2004)	37
Figure IV-5 - Grille d'extraction	38
Figure IV-6 - Extraction du rendement	38
Figure V-1 - Localisation du bassin agricole en agriculture de précision du GCO (Aude) et du bassin versant du Touch (Haute-Garonne).	42
Figure V-2 - Parcelles: Cadastre, Agricole et Cartographiée	43
Figure V-3 - Surface (ha) par culture et par année pour les deux zones d'étude	44
Figure V-4 - Rendement (qx) par culture et par année pour les deux zones d'étude	45
Figure V-5 - Coefficient de variation (%) intra parcellaire du rendement par culture et par année pour les deux zones d'étude	46
Figure V-6 - Précision et Exactitude (D'après Merour, 2001)	47
Figure VI-1 – Effet de la pente et photographie associée	53
Figure VI-2 - Effet de la pente: courbe de niveau, à gauche, et rendement, à droite.	53
Figure VI-3 - Effet direct du sol. Le cercle de la figure indique la position de l'affleurement de la roche mère.	54
Figure VI-4 - Effet autour d'un arbre : zones avec un plus faible rendement	55
Figure VI-5 - Effet des inondations , proximité à la rivière : rendement plus faible dans la zone inondée indiquée en rouge.	55
Figure VI-6 - Effet d'un ancien talus (cercle) : rendement plus élevé.	56

Figure VI-7 - Effet d'une ancienne vigne et un ancien bois : diminution du rendement	56
Figure VI-8 - Effet d'un mauvais désherbage : zones de faibles rendement (cercles) indiqués par l'agriculteur	57
Figure VI-9 - Effet provoqué par un dysfonctionnement du système de drainage : lignes verticales de plus forte ou faible valeurs de rendement.	57
Figure VI-10 - Effet du précédent cultural. La ligne rouge entre les deux points rouge délimite le précédent culturale : à gauche du tournesol et à droite du colza.	58
Figure VI-11 - Effet du type d'apport azoté. La différenciation du rendement entre la partie gauche et droite de la parcelle est due à un apport de fumier sur l'une et de lisier sur l'autre.	58
Figure VI-12 - Délimitation des zones à partir de la carte de rendement: correspondance entre la zone identifiée par l'agriculteur (affleurement de roche) et le zonage proposé.	61
Figure VI-13 - Délimitation des zones à partir de la carte de rendement	61
Figure VI-14 - Cartographie du rendement sur trois années pour la même parcelle.	64
Figure VI-15 - Structure de la méthode de «Blackmore ».	65
Figure VI-16 - Résultat de la variabilité spatiale et temporelle d'après la méthode de «Blackmore ».	66
Figure VI-17 - Résultat final de la méthode de «Blackmore » : Carte d'action	66
Figure Intro-2ème partie - L'observation du sol en Agriculture de Précision (A.P.) : Echelles d'étendue et de support	174
Figure VII-1- Coupe schématique de la vallée de la Garonne en amont de Muret , d'après la CRAMP (C.R.A.M.P., 1995)	78
Figure VII-2 - Bassin du Touch: représentation des terrasses	79
Figure VII-3 - Critères morpho-analytiques d'identification du plancher imperméable ; (Bouzigues et Chossat, 1990)	82
Figure VII-4- Type de faciès ; d'après (Favrot et al., 1990)	83
Figure VII-5 Positionnement des satellites en fonction de trois classes : grande étendue, haute résolution et multi-spectrale. (D'après Stoney, 2004)	86
Figure VII-6 - Comportement spectrale de 4 milieux différents.(Cabrières, 2001)	88
Figure VII-7- Méthode de calcul pour le variogramme : a) Orthogonal et b) Omnidirectionnelle	94
Figure VII-8- Variogramme directionnel - Horizontal et Vertical à deux échelles différentes : l'échelle du paysage et l'échelle de la parcelle	94

Figure VII-9- Variogramme théorique à l'échelle du paysage pour cinq variables différentes	96
Figure VII-10 : Variogramme de $r = 1$ (30 m) à $r = 10$ (300m): effet du changement du support. D'après Ramstein et Raffy (Ramstein, 1989)	97
Figure VIII-1- Approche méthodologique : Différentiation du sol nu de la végétation et identification du "vrai" <i>pattern</i> .	99
Figure VIII-2- Séparation sol nu et végétation	101
Figure VIII-3- Observation de la stabilité temporelle du <i>pattern</i> d'une parcelle du bassin versant du Touch entre 1993 et 2003.	101
Figure VIII-4- <i>Pattern</i> « artificiel »	102
Figure VIII-5- Zone d'étude: Parcelles cartographiées	103
Figure VIII-6- Méthodologie- Identification du « vrai <i>pattern</i> »	104
Figure VIII-7- Changement de support: Techniques	107
Figure VIII-8- Changement de support: Résultats	108
Figure VIII-9- Variogrammes des trois cas possibles de changement de support pour les deux parcelles	109
Figure VIII-10 Images de l'indice de brillance des trois parcelles sélectionnées, les parcelles 140, 142 et 143 (du haut vers le bas) pour les trois dates : mars, avril et novembre 2002 (de gauche à droite) – noir : faible valeur de l'IB / blanc : forte valeur de l'IB	111
Figure VIII-11 Variogramme de l'indice de brillance de mars, avril et novembre pour les trois parcelles : 140 (haut), 142 (milieu) et 143 (inférieur)	113
Figure VIII-12 - Variogramme croisé pour les trois parcelles illustrées	114
Figure VIII-13 - Coefficient de co-dispersion en fonction de la distance pour les parcelles illustrées.	115
Figure VIII-14- Courbes de référence selon les deux premiers axes d'une ACP	116
Figure VIII-15- Vision générale du coefficient de dispersion pour l'ensemble de couples d'images	118
Figure VIII-16- ACP pour l'identification des images présentant le "vrai pattern" du sol.	119
Figure IX-1- Images satellites et aériennes	124
Figure IX-2- Ancien parcellaire et images SPOT-5: Origine des "patterns"	126
Figure IX-3- Explication du "pattern" du sol et du système de drainage	127
Figure IX-4 Identification automatique de la variabilité « naturelle » inter parcellaire : effet du paramètre d'échelle dans la segmentation automatique	128

Figure Intro-3ème Partie - Schéma des relations entre les patterns des propriétés: sol, végétation et rendement	135
Figure X-1- Schéma méthodologique: Comparaison de l'indice de brillance et du rendement	137
Figure X-2- Coefficient de co-dispersion, en fonction de la distance, entre le rendement et l'indice de brillance de 3 images	138
Figure X-3- Coefficient de co-dispersion, en fonction de la distance, entre l'IB et le rendement 2002 pour les 10 parcelles.	139
Figure X-4- Coefficient de co-dispersion entre l'IB et le rendement sur trois campagnes; pour deux parcelles	140
Figure X-5- Aperçu de l'IB, rendement et série d'images satellite pour les deux parcelles	143
Figure X-6- Coefficient de co-dispersion de l'évolution du NDVI	144
Figure X-7- Profil temporel du NDVI sur les deux parcelles	145
Figure X-8- Coef. de co-dispersion entre la série de NDVI et la carte de rendement	148
Figure X-9 Coefficient de co-dispersion entre l'indice de brillance et la série de NDVI	150
Figure XI-1 Prise en compte de l'effet bordure dans le calcul des descripteurs : exemple du calcul de la moyenne.	160
Figure XI-2 Indice de brillance et descripteurs texturaux dans le BV	163
Figure XI-3 Zones pedo-geo-morphologique et population - en rouge - pour l'analyse de variance	165
Figure XI-4 Valeur du madogramme "textural" sur l'ensemble du bassin versant	167
Figure Conclusion et perspectives - Logique de recherche	

Liste des annexes

Annexe I. Cartes de rendements : ajustement des variogrammes et analyse

Annexe II. Exemple d'enquête réalisée.

Annexe III. Méthodes de zonage intraparcellaire

III.1. Introduction

III.2. Matériel

III.3. Méthode de « Layrol » et « LTGT_GCO»

III.4. Résultats

III.5. Conclusion

Annexe IV. Terrain

IV.1. Aspects bibliographiques

IV.2. Où : Choix des parcelles

IV.3. Quoi : Suivi de l'humidité

IV.4. Comment : Mesures

IV.5. Conclusion

Bibliographie des ANNEXES

Annexes

Annexe I. Cartes de rendements : ajustement des variogrammes et analyse

A partir des cartes des rendement et comme indiqué sur la figure ci-dessous (Figure Annexe I-1) nous avons extrait par parcelle les valeurs de rendement qu'on été ensuite utilisées pour ajuster les 4 modèles de variogrammes proposés (Gaussien, exponentiel, sphérique et power-exponentielle)

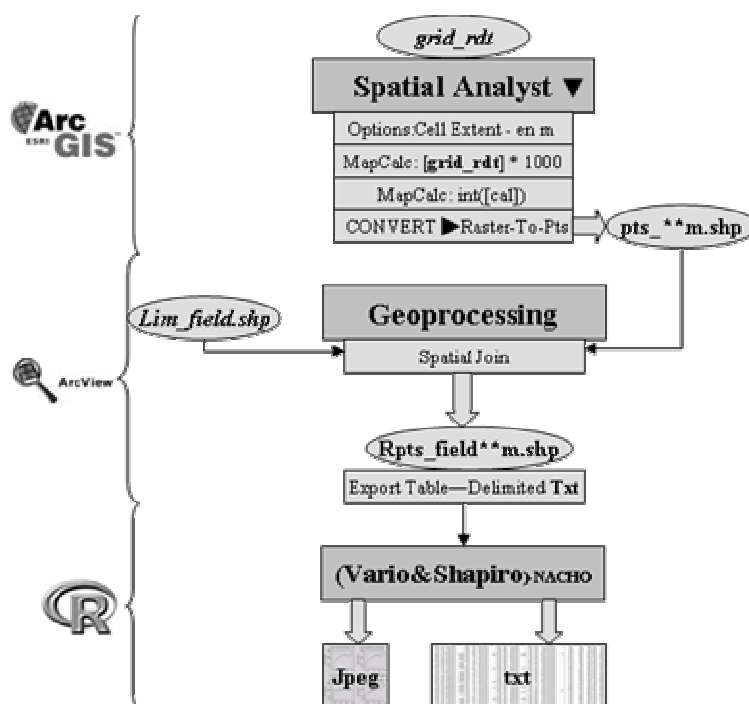


Figure Annexe I-1 Approche technique pour le passage du rendement intra-parcellaire à l'ajustement du variogramme

De cette chaîne de traitement nous avons obtenu un tableau (Table Annexe I-1) comme celui représenté ci-dessous et une figure pour chaque parcelle.

ID	MeanRdt	Etp_Rdt	CV	NbrPts	Year	Cult	Surf	Sdc	Range	Sill	Tauq	NduV
5	54.26	9.34	0.17	514	2002	8	52900.86	5669095.33	56.41	72.05	25.58	gaussian
6	54.16	10.55	0.19	411	2002	8	42014.32	52814148.37	53.49	123.59	0.00	gaussian
7	46.03	9.66	0.21	145	2002	8	14476.86	3275306.62	54.29	100.11	8.57	spherical
8	51.63	4.07	0.08	85	2002	8	8991.91	31620.41	47444.31	7695.06	3.58	spherical
9	69.68	11.14	0.16	238	2002	2	24692.79	5073346.76	188.80	195.13	6.84	spherical
10	45.26	4.78	0.11	94	2002	2	9850.62	979.26	48.88	33.06	2.42	gaussian
11	62.77	6.17	0.10	90	2002	2	9140.62	612459.61	21.59	44.45	0.00	gaussian
12	49.90	9.96	0.20	890	2002	2	90487.33	25653656.12	63.72	91.77	17.79	gaussian
13	51.95	7.53	0.14	252	2002	2	25760.38	710184.26	62.41	71.42	5.15	gaussian
14	50.09	8.47	0.17	134	2002	2	13817.22	118513.38	34.53	80.59	4.84	gaussian
15	46.64	6.49	0.14	501	2002	2	50276.64	4310645.11	43.88	40.96	4.00	gaussian
16	70.42	5.72	0.08	794	2002	8	81517.26	2540799.05	207.68	46.62	9.74	exponen.
17	72.11	9.60	0.13	436	2002	8	45082.46	2613073.29	41055.19	1843.45	0.00	pow_exp

Table Annexe I-1- Extrait des résultats de l'ajustement automatique du variogramme

Ce tableau présent donc un extrait des résultats de l'ajustement automatique des variogrammes. Pour chaque parcelle identifié par un code ID, nous avons extrait la valeur moyenne du rendement, l'écart type, le CV, le nombre de points dans le calcul du variogramme, l'année de récolte, l'identifiant de la culture, la surface de la parcelles, la qualité de l'ajustement exprimé par la somme de carré (Sdc), la portée (range), le palier (sill), l'effet pépète et le nom du modèle automatiquement choisi (Nduv). A chacune de ces lignes correspond une image avec le variogramme ajusté pour chacun des 4 modèles choisis. Nous avons décidé de présenter deux exemples. Celui de gauche de la Figure Annexe I-2 montre l'ajustement d'une parcelle, la parcelle 8, où un pallier et portée aberrantes ont été ajustés (7695.06 et 47444,31 respectivement). Au contraire, la parcelle 10, graphiques de droite dans la Figure Annexe I-2 présente un bon ajustement. Sur ces graphiques la qualité de l'ajustement exprimé par la somme de carrés est indiquée.

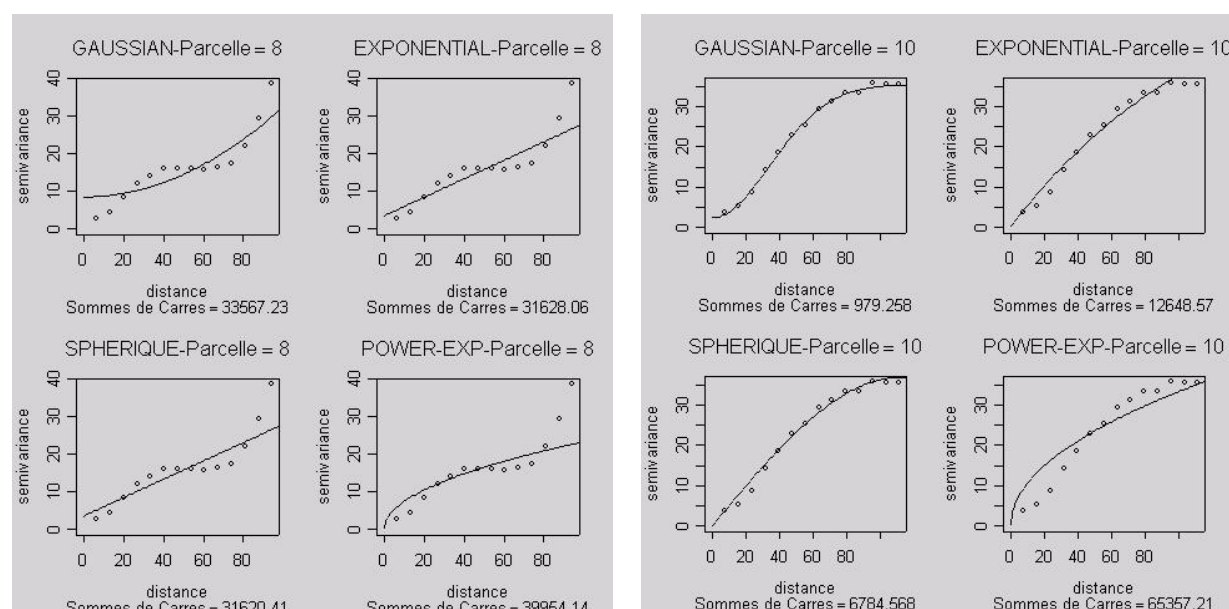


Figure Annexe I-2 Illustration du choix du modèle lors de l'ajustement automatique du variogramme

Comme illustré sur la Figure Annexe I-3 à partir des données issues de l'ajustement différents tests statistiques ont été réalisés. L'objectif final de ces tests était de comparer si les différences de la variabilité intra parcellaire du rendement par culture, par année ou par zone étaient significativement différentes. Pour cela et pour chacune des trois groupes une série de tests ont été réalisés. Ces tests permettent de vérifier les hypothèses de normalité et/ou de variances avant pouvoir utiliser les tests de comparaison de moyennes (cf. figure XIII-1). Ce dernier étant le test cible qui nous permettrait de vérifier si la séparation de nos parcelles en groupes (par culture, par année ou par zone) est statistiquement significative. Suite aux résultats des tests de normalité et de variances, présentant de données avec de variances non égales entre les groupes, l'utilisation du test de comparaison des moyennes n'a pas de sens, en conséquence il

n'est pas possible d'arriver à une conclusion concernant la plus ou moins forte variabilité intra parcellaire du blé par rapport au tournesol ou le maïs.

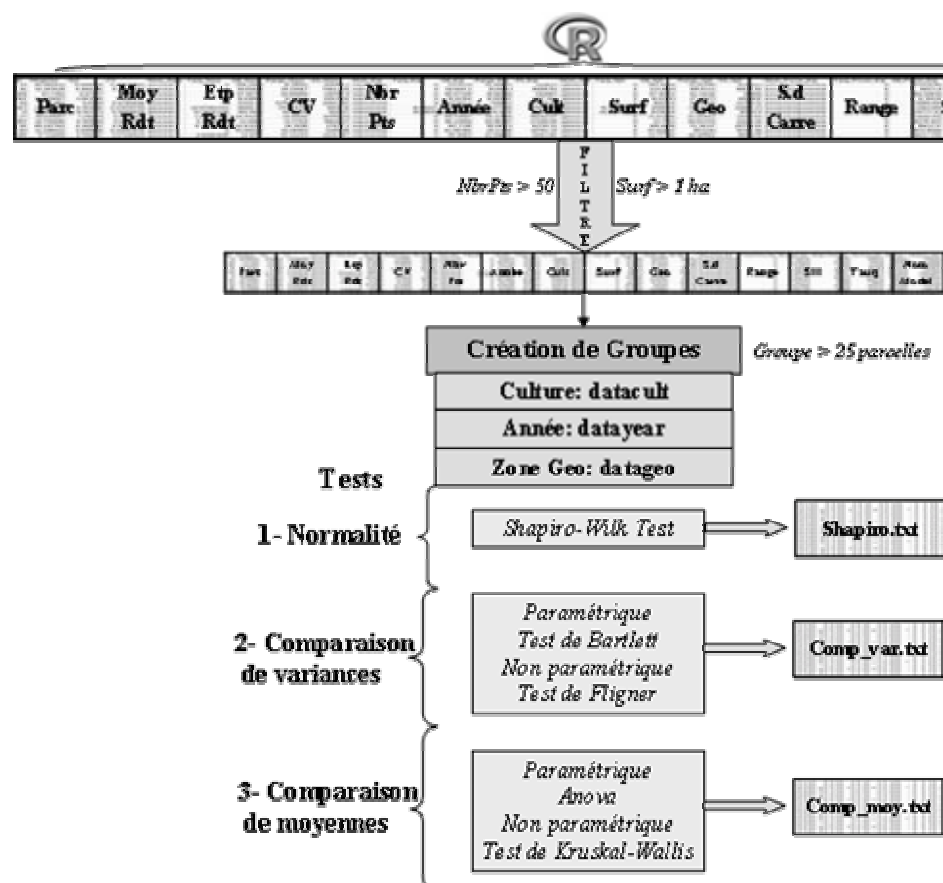


Figure Annexe I-3 Approche technique de l'enchaînement des tests statistiques pour analyser le rendement

Annexe II. Exemple d'enquête réalisée.

Le Table Annexe II-1 est l'exemple d'un questionnaire réalisé en 2002 et concernant une parcelle de l'exploitant M. Mespoulet situé dans le bassin versant du Touch.

QUESTIONNAIRE		Document à accompagner avec les cartes de rendement de l'agriculteur		14/06/2002 - v-3	
Générales					
Agriculteur	M. Mespoulet				
Code Parcelle (cartes de rdt)	Mesp_02_02				
Année Culturelle	2002				
Information (papiers, mémoire...)					
Plante					
Culture	Maïs				
Variété	Bounty, DK580, DK				
Irrigué - Type (Homogène?)	Oui - Pivot - Dates récupéré (parcelle étudié en détail)				
Comment le regle Tensiomètres?	Nous				
Pratiques culturales					
Semis					
Date (= tout parcelle?)	3 - 4 avril				
Densité (Homogène?)	78000 g/ha				
Fertilisation					
Dates	Apport 1	Apport 2	Apport 3		
	6-7 feuilles	1ere au 5 juillet	12 -13 juillet		
Produit - (Engrais, urée, fumier, lisier?)	urée	urée-fertigation	urée-fertigation		
Quantité	123u	44u	44u		
Phyto-Desherbage					
Dates					
Produit - Caractéristique					
Quantité					
Travail					
Sens du travail -(Pareil toutes les années?)	oui - il ne fait pas le semis - entrepreneur				
Sol					
Type -(nom locale)					
Possede des analyses? (on peut les avoir?)	Oui	photocopie			
Caracteristiques					
Profond- (Combien + ou -?)					
Texture (Argileux, limoneuse....)					
Cailloux- Où sur la carte?	qq zones				
Zones					
Quelles type de sol					
Ancien fossé ou autres?	ancien fossé, localisé				
Reliquat Azote?					
Drainage					
Année					
Plans	Oui	photocopie			
Cartes de rendement					
Identifi-t-il les zones?	A				
Pour quoi, explication?	diffent type de sol				
Haut ou bas rendement	bas rdt				
Different rdt selon les cultures?	tjr maïs				
zones selon les culture?					
Notes (A signaler sur la carte papier)					
Souvent de verses en blé? -Zones?					
Remembrement recent	nous disposons des images aeriennes				
Nous avons récupéré les plans d'irrigation et les mesures de pluvio					

Table Annexe II-1 Exemple de questionnaire terrain pour obtenir l'information parcellaire : plante, pratiques culturales, sol et cartes de rendement

Annexe III. Méthodes de zonage intra parcellaire

III.1. Introduction

Les résultats présentés par Blackmore (Blackmore et al., 2003) et nos résultats (sous chapitre VI.3) montrent les limitations de l'utilisation des cartes de rendement comme source unique dans l'établissement d'un zonage intra parcellaire. Néanmoins et comme nous avons avancé dans la conclusion (chapitre VI) les cartes de rendement peuvent être utilisées : comme donnée de validation dans les modèles de croissance de culture (Gay et Chéret, 1999), dans les essais en grand parcelle ou comme données intégrantes dans d'autres méthodes de zonage.

Concernant ce dernier point, l'utilisation des cartes du rendement comme source intégrante et non unique dans des méthodes de zonage, nous avons établi une méthode de zonage basé sur l'algorithme de l'ISODATA, algorithme déjà validé dans un contexte de zonage d'agriculture de précision (Layrol et al., 2001; Layrol et al., 2000).

Le point suivant présentera :

la méthode de « Layrol » qui permet d'intégrer d'autres sources de données et se base sur l'algorithme ISODATA et

la méthode que nous proposons dite « LTGT-GCO », permettant d'intégrer d'autres sources de données spatialisées et utilisant également l'algorithme de l'ISODATA mais couplé à une ACP (Analyse en Composantes Principales). L'ACP permet de concentrer l'information et aider à l'interprétation des zones obtenues.

Ces méthodes ne cherchent pas à établir le potentiel de la parcelle sinon à définir de zones intra-parcellaires pour la conduite des parcelles. A travers l'établissement d'une nouvelle méthode nous cherchons donc à aider l'agriculteur désirant mettre en place une démarche de modulation. Une fois ce zonage proposé, l'agriculteur doit associer les limites des zones à ses connaissances de la parcelle. La méthode proposée présente l'avantage d'établir le zonage de telle façon que l'agriculteur puisse plus facilement donner un sens aux zones proposées.

III.2. Matériel

La parcelle d'étude correspond à la parcelle de Terreblanche, utilisée dans l'analyse multi-temporelle (sous chapitre VI.3). Pour cette parcelle nous disposons d'environ 9 ha sur trois années de rendement.

D'autre part, nous disposons de la série temporelle d'images satellite en réflectance, SPOT à 20 mètres de résolution, acquises entre mars et octobre 2002 (Cf VII-2) qui seront intégrées dans la méthode de « Layrol » et du « LTGT-GCO ».

III.3. Méthode de « Layrol » et « LTGT_GCO »

Le schéma de la Figure Annexe III-1 est une présentation des méthodes « Layrol » et « LTGT-GCO » pour la création de zones à partir des cartes du rendement et des images satellites. Toutefois, d'autres sources de données, à conditions qu'elles soient spatialisées, peuvent être introduites. Après une préparation commune des données (données d'entrée), les deux méthodologies sont différenciées.

Au sujet de la préparation des données, les données ont été normalisées. Cette normalisation est une étape indispensable pour pouvoir travailler avec des données de différents sources sans perdre la distribution spatiale (Maestre Gil, 2002; Stein et al., 1997). Pour ce qui concerne les méthodes ; dans celle développée par « Layrol » l'ensemble des informations spatiales est superposé (« *stack layer* ») puis l'ISODATA (algorithme de nuées dynamiques créant de classes) permet de générer les zones. Dans la méthode du LTGT-GCO une étape de plus s'insère entre l'ISODATA et le « *stack-layer* ». Cette étape consiste à la réalisation d'une ACP pour concentrer les données dans le plus petit nombre de bandes. Cette ACP peut être réalisée, cf. partie gauche de la méthode LTGT-GCO dans la Figure Annexe III-1, sur l'ensemble de données, ou par classe de données, cf. partie droite de la méthode LTGT-GCO dans la Figure Annexe III-1. Cette séparation par classe permet de faire des ACP plus facilement compréhensibles et qui permettent une interprétation des résultats plus aisée. En plus cela permet de filtrer les données en enlevant des classes porteuses de bruit (ex. la classe *intermédiaire* dans la Figure Annexe III-1).

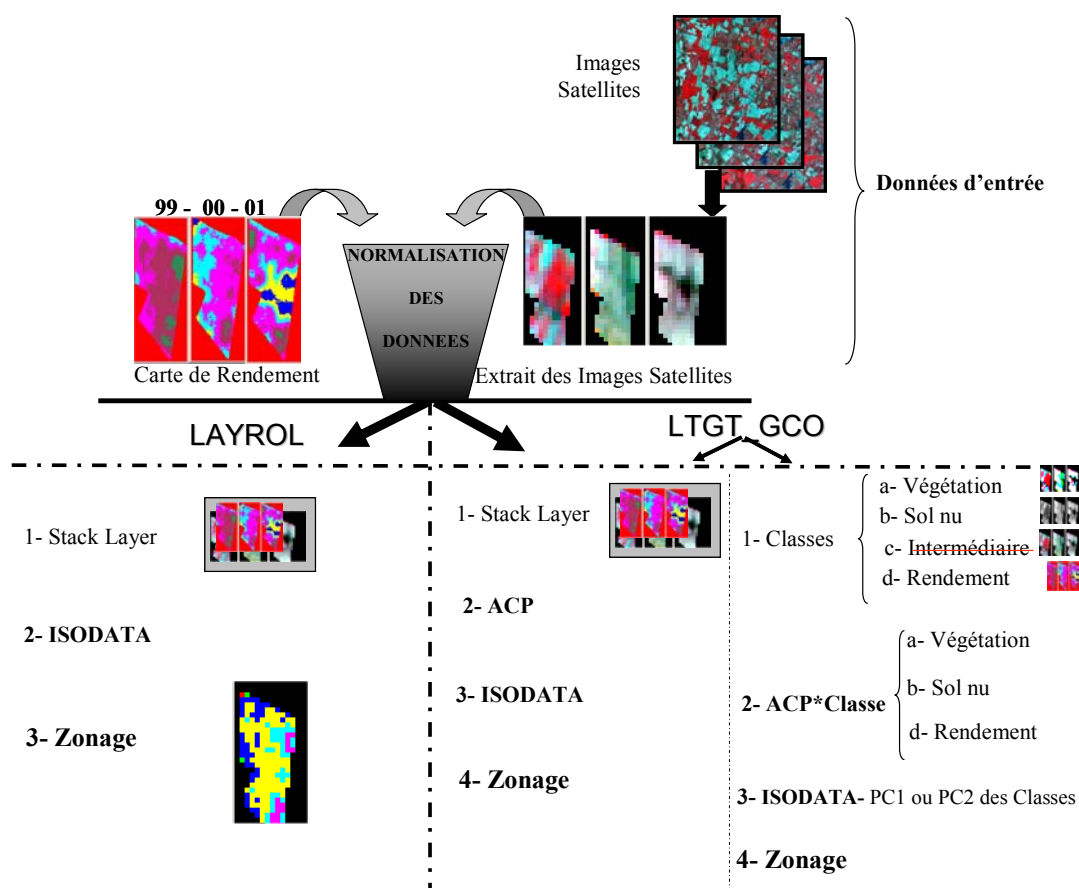


Figure Annexe III-1 - Structure des méthodes « Layrol » et des possibilités de « LTGT-GCO ».

Dans une première partie nous présenterons l'ISODATA, étape commune aux deux méthodes, et ensuite nous présenterons l'ACP, utilisée dans la méthode « LTGT-GCO » pour compacter l'information redondante dans moins de bandes.

III.3.1. L'ISODATA :

La délimitation de zones est réalisée à partir d'une classification non supervisée, l'ISODATA (Layrol et al., 2001; Layrol et al., 2000). Cette méthode présente l'avantage d'éviter de formuler des hypothèses sur l'emplacement ou sur les limites des *patterns* intra parcellaires (Stafford et al., 1998). Elle sera utilisée sur l'ensemble des données pour la méthode de « Layrol » et sur les premiers axes de l'ACP de la méthode «LTGT-GCO ».

L'algorithme de l'ISODATA est représenté sur la Figure Annexe III-2. L'ISODATA commence avec un ensemble de '*n*' groupes (2 groupes dans la Figure Annexe III-2) positionnées dans l'espace spectral arbitrairement ou de façon systématique. Ce nombre '*n*' doit être défini par l'utilisateur. Ensuite les pixels (9 pixels dans la Figure Annexe III-2) sont itérativement affectés au groupe le plus proche. A chaque itération, les classes moyennes sont recalculées et à nouveau les pixels sont associés ou pas à une classe selon un critère (dans la

Figure Annexe III-2 le critère est la SSE = Sum of Squares Error). Le cycle peut se répéter jusqu'à ce que :

- un pourcentage minimum de pixels ayant changé d'affectation entre deux itérations se situe en dessous d'un seuil spécifié : on considère alors que le système est stable et alors on arrête les calculs
- un nombre d'interactions seuil spécifié soit atteint.

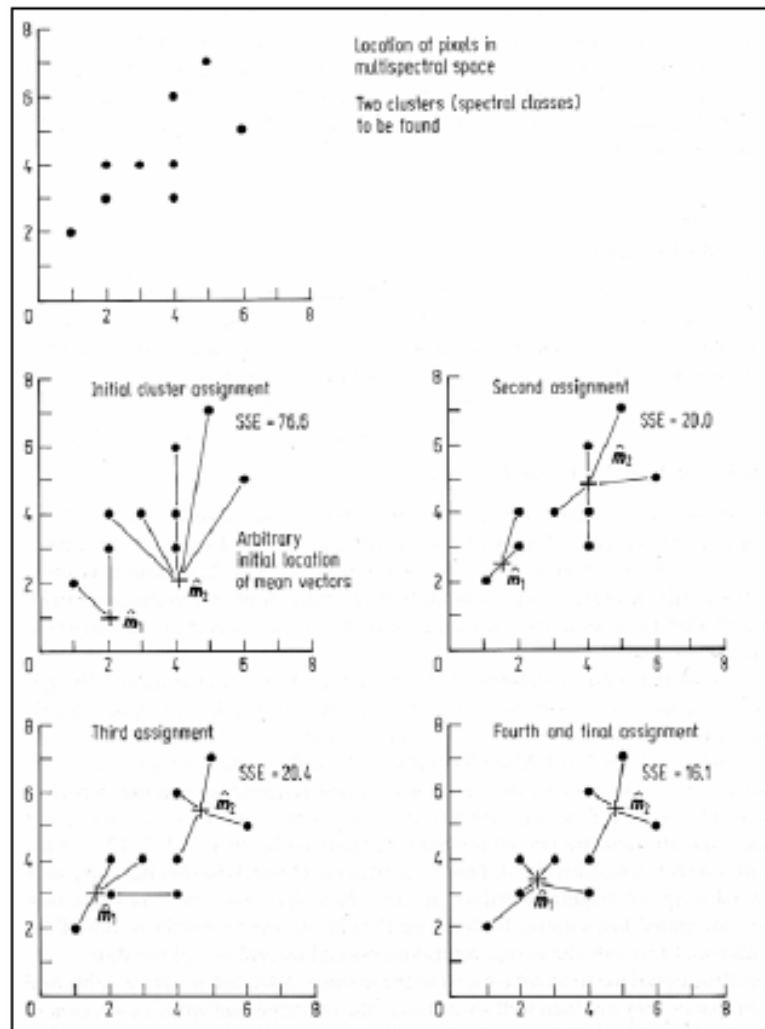


Figure Annexe III-2 - Processus de l'ISODATA- d'après (Richards, 1986)

III.3.2. L'ACP

L'analyse en composantes principales (ACP) se déroule selon les méthodes statistiques traditionnelles, la particularité de leur application à la télédétection réside dans le très grand nombre de données à traiter (les pixels). Les images d'une même scène enregistrées suivant différentes bandes peuvent être fortement corrélées. L'ACP permet de condenser les données originelles en de nouvelles composantes, de façon à ce que ces composantes présentent le minimum de corrélation entre elles et soient ordonnées en termes de pourcentage de variance

apportée par chaque composante. La Figure Annexe III-3 montre les différentes étapes lors du déroulement de l'ACP

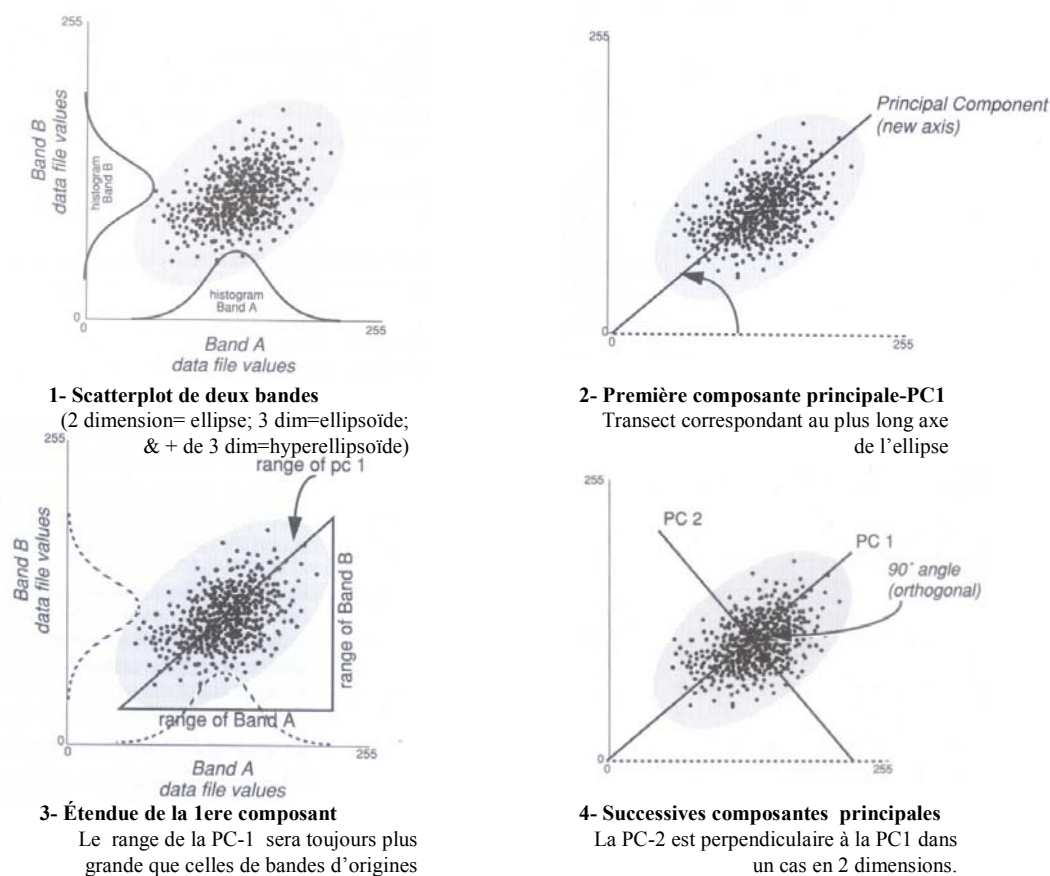


Figure Annexe III-3 - Processus de CAP (Erdas-Llc, 1999)

L'ACP sera donc utilisée comme étape de filtre de l'ensemble des bandes disponibles pour concentrer l'information redondante.

III.3.3. Classes

Pour la différenciation des classes (partie droite de la méthode LTGT-GCO de la Figure Annexe III-1), les images satellites ont été divisées en trois classes (classe a,b et c) et les cartes du rendement en une seule classe (classe d). Concernant la série d'images satellite, les trois classes sont associées à trois types de variabilité :

- 1- Végétation : elle traduit le pattern de la variabilité dynamique
- 2- Sol nu : on considère qu'elle traduit le pattern de la variabilité statique
- 3- Intermédiaire : elle prend les zones de maximum de croissance et sénescence, qui traduisent une variabilité due au sol ou à l'itinéraire technique, cela dépendra de la zone de la parcelle. La culture, à l'échelle d'étendue de la parcelle, n'a pas eu le temps de définir de pattern, c'est une phase de transition

Pour différencier ces zones nous avons calculé le NDVI pour l'ensemble de la série ce qui est illustré sur la Figure Annexe III-4

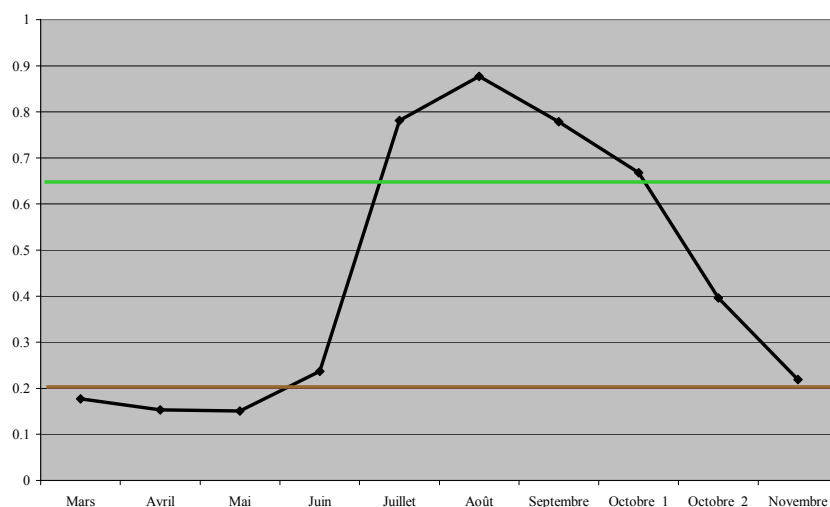


Figure Annexe III-4- Profil temporel du NDVI pour la parcelle étudié

A partir de cette courbe du profil temporel du NDVI nous avons divisé nos classes ayant les dates suivantes pour les classes :

En Végétation : Juillet, Août, Septembre et Octobre_1

En sol nu : Mars, Avril et Mai

Intermédiaire : Juin, Octobre_2 et Novembre

III.3.4. Zonage

Le zonage pour les méthode de « Layrol » et « LTGT-GCO » ne consiste pas à de zones d'action comme dans la méthode de « Blackmore » sinon au repérage de *patterns*, issus d'un ensemble d'informations, qui à un moment ou un autre 'jouent sur' la distribution spatiale du rendement. La résolution de la carte de zonage est de 20 mètres, même résolution que les images disponibles.

III.4. Résultats

III.4.1. Méthode de « Layrol »

L'ISODATA a été lancé sur un total de 40 bandes correspondantes aux 3 bandes des cartes du rendement et le 37 restant aux 3 bandes (V, R, PIR) ou 4 bandes (V, R, PIR, MIR) des images de la série satellitaire.

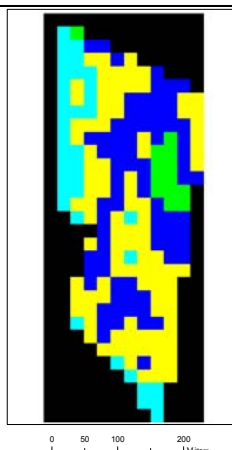


Figure Annexe III-5 - Résultat de zonage obtenu par la méthode de « Layrol »

Le résultat du zonage obtenu par méthode de « Layrol » en utilisant une grande quantité de données permet de délimiter les zones Figure Annexe III-5 : on observe principalement une zone ‘contour de parcelle’, en bleu ciel, et une autre en vert qui indique l’autre extrême.

III.4.2. Méthode de « LTGT_GCO »

Les résultats de cette méthode sont divisés en deux parties selon que l’ACP soit faite sur l’ensemble des données ou sur des classes (parties gauche et droite de la méthode LTGT_GCO de la Figure Annexe III-1).

III.4.2.1. ACP sur l’ensemble de données

Sur l’ACP de l’ensemble de données, les 5 premières composantes expliquent plus de 80 % de la variabilité des mesures de télédétection. En conséquence et pour éviter d’utiliser beaucoup plus de bandes, l’ISODATA a été réalisée sur ces 5 bandes. Le résultat cartographié de cette méthode est présenté Figure Annexe III-6.

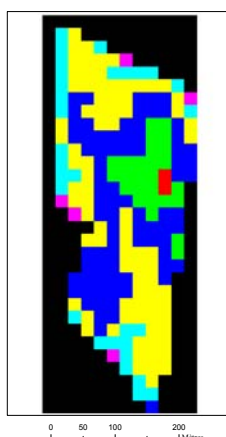


Figure Annexe III-6 - Résultat du zonage obtenu par la méthode du « LTGT-GCO »-Option 1

III.4.2.2. ACP par classes

Dans cette version de la méthode « LTGT-GCO », quatre ACPs ; une par classe ont été réalisées. Ensuite la première ou la première et deuxième composante issue de CAP de chaque classe a été sélectionnée pour réaliser avec l'ensemble une ISODATA et obtenir ainsi le zonage de la parcelle.

Suite à la réalisation de l'ACP par classe mais avant l'ISODATA, il est conseillé d'analyser les résultats spatialisés de chacune de ces classes. Dans notre exemple la première composante de la classe « intermédiaire » présente un pattern qui est observable au mois de juin et qui est attribué à un 'artefact' (après une enquête cette zone s'est avéré être une zone inondée en 2002, elle n'est donc pas représentative de la parcelle). Par conséquent l'ISODATA a été aussi lancée sans insérer la bande correspondant aux composantes de la classe intermédiaire, pour ainsi éviter du bruit.

Les deux résultats (1)- Les ACP de toutes les classes ou (2)- Les ACP de toutes les classes sauf la classe intermédiaire, peuvent être comparés Figure Annexe III-7.

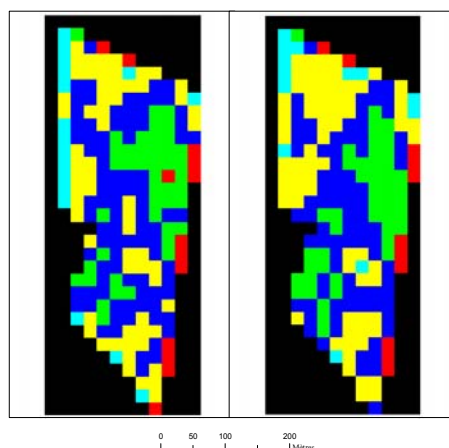


Figure Annexe III-7 - Résultat du zonage obtenu par la méthode du « LTGT-GCO »-Option 2. A gauche résultat de l'ISODATA après ACP sur l'ensemble des classes, et à droite quand la classe intermédiaire a été exclue

Sur la carte de gauche nous avons inséré pour la réalisation de l'ISODATA les deux premières ACP des 4 classes (sol nu, végétation, intermédiaire et rendement), par contre sur l'image de droite seulement les classes sol nu, végétation et rendement font partie de l'analyse. Comme nous l'avons évoqué précédemment, la classe intermédiaire est exclue du traitement. Les résultats montrent un bruit plus important sur l'image de gauche avec des pixels isolés au milieu de zones bien définies. Ces pixels n'existent pas sur la carte de droite et les classes sont plus lissées. Il est donc intéressant d'analyser les données pour exclure des informations lors de l'établissement des zones.

III.5. Conclusion

Contrairement aux hypothèses des années 90 sur la stabilité de effets du sol sur le rendement et à l'utilisation, à cette époque, des cartes de rendement comme source unique pour définir des zones intra parcellaires de modulation, nous avons proposé ici une méthode multidimensionnelle permettant d'intégrer d'autres données spatialisées.

Cette méthode proposée, à différence des autres deux méthodes (Layrol et LTGT-GCO version 1), permet d'obtenir des zones plus facilement interprétables par l'agriculteur.

Malgré cet avantage de la méthode, elle nécessite d'un certain nombre d'améliorations :

- d'une part dans l'aide à la définition du nombre de classes de l'ISODATA ; toutefois et compte tenu de la vitesse du traitement il est envisageable de faire tourner la méthode autour de 4-7 classes, et comparer les résultats pour choisir le plus convenable
- d'autre part elle doit être validé sur le terrain (par des enquêtes) sur un grand nombre de parcelles pour vérifier que l'interprétation est plus aisée.

Annexe IV. Terrain

L'installation et le suivi d'un certain nombre de paramètres dans une – ou un petit groupe – de parcelles, dit de référence, est la démarche la plus répandue dans un contexte d'agriculture de précision cherchant à comprendre dans un premier temps la variabilité intra parcellaire du sol pour ensuite la relier à celle du rendement.

Après les observations de la variabilité des sols, il s'agirait d'extrapoler les résultats de ces parcelles de référence aux autres parcelles du bassin versant, parcelles où les cartes de rendement sont disponibles. Cette extrapolation des connaissances du sol aux parcelles pour lesquelles on dispose du rendement, permettrait de mettre en relation sur un plus grand nombre de parcelles le sol et le rendement pour comprendre comment le rendement varie intra parcellairement avec le sol.

Cette annexe portant sur l'étude de la variabilité des sols par des mesures de terrain est divisée en 4 sous-chapitres :

- Un premier sous chapitre présente des aspects bibliographiques importantes dans une approche terrain (structuration du bassin versant, ordres de grandeur de mesures, etc) et que n'ont pas été évoquées dans le chapitre VII
- Un deuxième sous-chapitre concerne le choix des parcelles de références : là **où** les mesures doivent être réalisées.
- Un troisième sous-chapitre définit ce qu'on va mesurer : **quoi** mesurer.
- Un quatrième sous-chapitre énumère les mesures qui vont être réalisées.

IV.1. Aspects bibliographiques

IV.1.1.1. Garonne

Dans la vallée de la Garonne, on compte cinq terrasses. la haute nappe culminante, la haute terrasse, la moyenne terrasse, la basse terrasse, la basse plaine et le lit majeur de la Garonne.

Malgré une structure relativement commune aux 5 terrasses, l'épaisseur, la composition en éléments grossiers et l'existence d'une couche de grepp diffèrent entre les terrasses :

1- Epaisseur des terrasses : L'épaisseur des terrasses est variable, mais en moyenne on peut le diviser en trois classes :

- i. *basses plaines et basses terrasses* en moyenne 3 à 6 m
- ii. *moyennes et hautes terrasses* de 4 à 8 m

iii. et *nappes culminantes* de 8 à 15 m

2- Le front d'altération ; défini comme le niveau au-dessous duquel s'observent les alluvions fraîches, pas ou peu transformées par l'altération permet de comparer les terrasses :

i. Dans la *basse plaine* le front d'altération dépasse rarement 1.5 m

ii. *Basses terrasses* : souvent 4 m

iii. *Terrasses moyennes et hautes terrasses* : le front est rejeté à une grande profondeur

iv. L'altération est maximale dans les *nappes culminantes*

3- Les cailloux et graviers : La composition des éléments grossiers diffère suivant le niveau de terrasse : sur les plus basses terrasses de la Garonne se rencontrent en proportion variable quartz, quartzites, schistes, silex, parfois granite et granulite ; sur les niveaux supérieurs, les roches fragiles (granites, schistes), sont altérées et finalement décomposées ; il ne subsiste alors que les cailloux et les graviers de quartz à arêtes plus ou moins émoussées. Les sols caillouteux se rencontrent indifféremment quel que soit le niveau de la terrasse, cependant les sols caillouteux se manifestent avec une plus grande fréquence sur les hautes terrasses et les niveaux supérieurs.

4- Couverture limoneuse : dit matériaux mère des boubènes, son évolution est plus complexe que celles des alluvions caillouteuses. Plus que leur origine, c'est leur mode de dépôt, leur facilité de remaniement et, par voie de conséquence, leur âge qui rendent difficile l'interprétation. Concernant les dépôts, on trouve des dépôts d'inondation et des dépôts éoliens. Les dépôts d'inondation ayant nivelé la plaine à toutes les époques auraient été ensuite soumis à l'action du vent. Suivant les situations et les conditions d'érosion, l'épaisseur de ces limons est variable, parfois il n'en subsiste que de minces placages, les graves peuvent alors affleurer. Les dépôts éoliens peuvent être différents selon l'orientation des vents :

i. vent d'ouest : tendance limono-sableuse

ii. vent du sud-est (vent d'autant) : faciès d'argiles loessiques

5- Autres :

i. *basse terrasse* : les sols sont de type lessivé hydromorphe, à pseudogley voire à gley profond, et le grepp est discontinu.

ii. *moyenne terrasse*, les sols sont de type dégradé hydromorphe et le grepp y est plus continu.

iii. sur la *haute terrasse* et les *nappes culminantes* et plus encore sur les plateaux de piémont : plus une terrasse est ancienne, plus sa surface a été soumise à l'action du

ruissellement, d'autant plus qu'avec le temps, sa topographie, entaillée et tronçonnée par les cours d'eau et les vallons, ou dans le meilleur des cas, légèrement ondulée, favorise les écoulements superficiels. Les ruissellements peuvent ainsi occasionner un grand nombre de remaniements, épaissements ici, décapage plus loin.

IV.1.1.2. Le Touch

Sur les terrasses du Touch, le degré d'évolution des sols est assez en accord avec l'ancienneté des terrasses, selon la séquence classique : sols bruns lessivés – sols lessivés hydromorphes – sols lessivés glossique, puis planosoliques comme montré sur la Figure Annexe IV-1. Les caractéristiques des terrasses sont en correspondance avec l'appellation des cartes géologiques: (Begon, 1990).

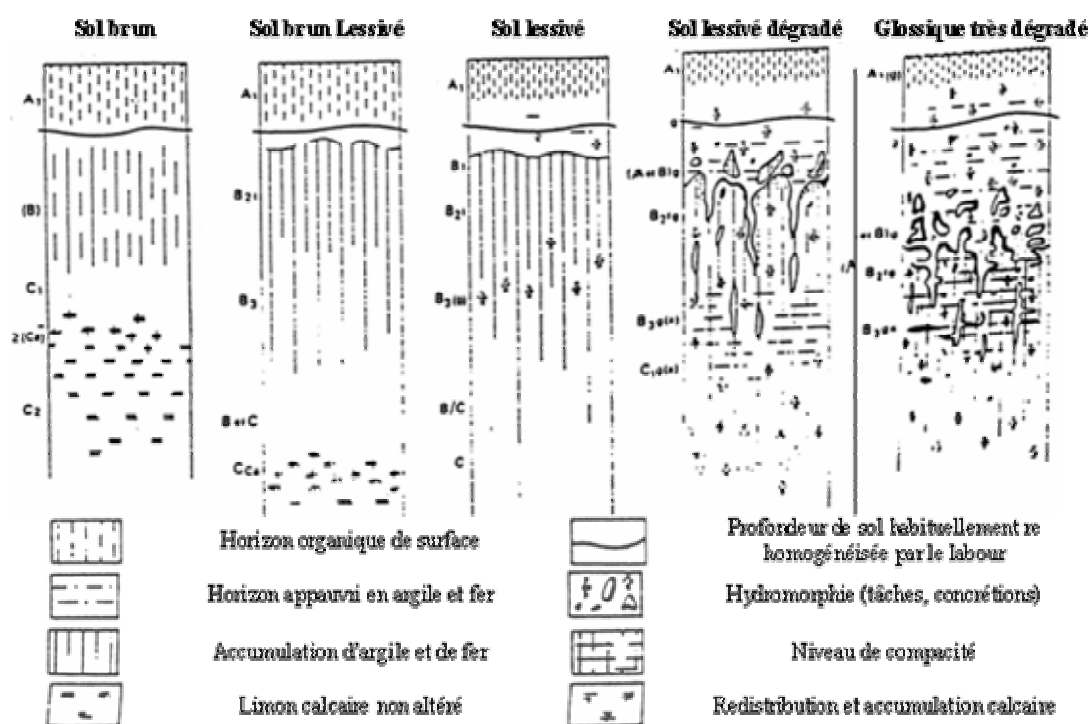


Figure Annexe IV-1- Principaux types de sols développés sur matériau limoneux

IV.1.2. Contexte pédologique

Dans ce chapitre nous allons présenter le profil textural différencié qui caractérise les sols de bouldènes.

IV.1.2.1. Profil Textural

Les profils pédologiques de la Figure Annexe IV-2 montrent une gamme représentative des bouldiers, la localisation de ce profil est la basse terrasse (Guiesse, 1989). En surface de chaque profil se trouve un horizon limoneux, avec un éventuel risque de battance. Ensuite le sol s'éclairci, dû à un lessivage de l'argile et des cations Na et Mg. Ce lessivage va provoquer une accumulation de l'argile et du fer sous les horizons sous-jacents. En parallèle ces sols ont tendance à se dégrader par suite d'une hydromorphie, temporaire ou partielle, provoquée par une lente infiltration des eaux pluviales. Ces sols sont caractérisés par une tendance au pseudo-gley. Ce pseudo-gley, dû aux engorgements périodiques, se manifeste par l'alternance des taches grises, ocre ou rouilles, parfois accompagnées de concrétions (Marty, 1969). Ces concrétions peuvent se trouver à peu près à tous les niveaux, leur proportion augmente avec la profondeur. La taille de ces concrétions arrondies, plus ou moins friables, est variable, les plus grosses d'entre elles dépassent 5 mm de diamètre, la plupart restant comprises entre 1 et 3 mm. Ce « concrétionnement » peut donner lieu à la formation de grepp. Le grepp correspond à un niveau complètement induré résultant d'une précipitation et d'une accumulation qui se produit au sein de graves; les oxydes et hydroxydes de fer colmatent les galets et donnent alors naissance à une véritable cuirasse (Guiesse, 1989). Sur les profils de sols présentés sur la Figure Annexe IV-2, il n'existe pas de formation de grepp. Cette formation ne s'observe que sur la moyenne et la haute terrasse de la Garonne (Guiesse, 1989)

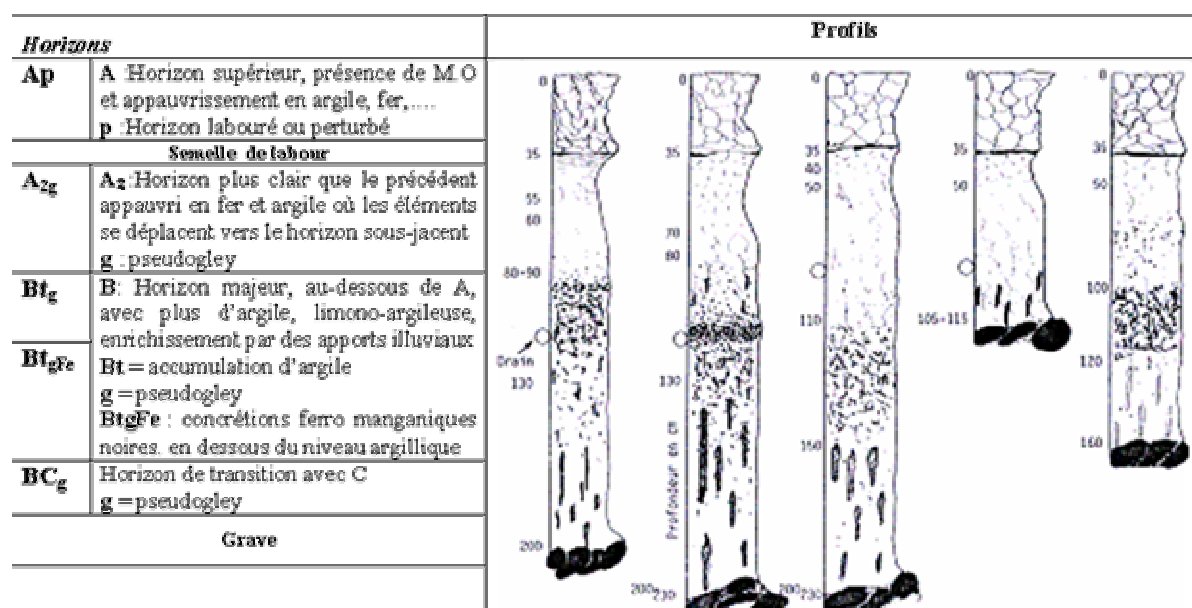


Figure Annexe IV-2- Schéma des profils pédologiques de 5 parcelles ; d'après (Guiesse, 1989)

IV.1.2.2. Texture

IV.1.2.2.a. Composition

La composition moyenne, en pourcentage, des différents éléments texturales est montrée dans la Table Annexe IV-1. Pour les argiles, deux classes englobent plus de 80 % de l'argile (Marty, 1969).

Argile				Limon		Sable
< 2 μm				2 – 50 μm		200 – 2000 μ
8 – 15 % (25%)				45 – 85%		10 – 35%
CEC : 16 – 28 meq / 100gr						
< 0.2 μ	0.5 – 0.2 μ	1 – 0.5 μ	1 – 2 μ	2-20 μ	20-50 μ	
$\approx$ 40% (80%)	10 - 20 %	15 -30 %	30 – 40%	40%	60%	
8-30 meq / 100gr	0.8-4.5 meq / 100gr	0.7-3.5 meq / 100gr	0.2.-0.6meq / 100gr	0.2-0.3 meq / 100gr		

Table Annexe IV-1 Eléments fins : répartition typique des bouldiers au sein des 3 classes

IV.1.2.2.a.1. Densité apparente (Marty, 1969)

En sols non caillouteux

La méthode utilisée pour mesurer la densité apparente des sols non caillouteux est la méthode du cylindre.

La densité apparente des horizons de surface varie davantage avec le système de culture, les façons aratoires et les saisons que suivant les différents types de bouldiers. La densité apparente peut s'accroître de 1.55 à 1.77 sur une même parcelle. La densité apparente de bouldiers se trouve en état d'équilibre aux environs de 1.65, ce qui lui leur confère une porosité globale de 38%. Dans le cas de bouldiers profondes, l'horizon argileux possède une densité apparente plus faible et égale en moyenne à 1.55.

En bouldiers caillouteuses ou graveleuses

La méthode utilisée pour mesurer la densité apparente des sols non caillouteux est la méthode du densitomètre à membrane. Les éléments d'hétérogénéité sont les cailloux. La densité réelle des cailloux varie de 2.57 à 2.68, jointe à des répartitions et des tailles inégales, modifie rapidement la densité apparente qui peut atteindre 1.97.

La densité apparente de la terre fine, obtenue par différence en éliminant le volume réel des éléments grossiers, est plus faible que dans le cas de sols non caillouteux. Pour de teneurs comparables en argile, elle varie de 1.5 à 1.55 (densité plus faible due en grande partie aux lacunes que l'on observe entre cailloux et terre fine et dont la méthode de calcul tient compte).

IV.1.2.2.a.2. Teneur en eau (Table Annexe IV-2)

Humidité de la capacité au champ

Le palier correspondant à la capacité au champ des boubènes se maintient environ 3 semaines si la pluviosité est faible, ce palier devient très court lorsque les pluies sont trop fréquentes.

Cette humidité est équivalente à celle obtenue sur échantillon remanié à des pF de 2.7 – 2.8, celle des sous-sols argileux à des pF de 3.0 – 3.2. – Humidité pondérale d'environ 17- 22%.

Humidité au point de flétrissement permanent

Cette humidité, obtenue à $\Psi = 16000$ g varie peu pour l'ensemble des boubènes, et se maintient aux environs de 5 – 6% dans les horizons limoneux, par contre s'élève à 14 – 15% en horizon argileux.

Humidité	A la capacité au champ			Au point de flétrissement	
Type	Argileux	Limoneux	Sableux	Limoneux	Argileux
pF	3.0 – 3.2	2.7 – 2.8	1.5	4.2	
Hum. Pondérale (%)		17 - 22		5 – 6	14 -15

Table Annexe IV-2- Teneur en eau

Concernant la teneur en eau utile, la profondeur potentielle d'enracinement est un paramètre à obtenir, dans ce calcul de la profondeur il faut tenir compte de :

- l'horizon argileux qui peut être un obstacle à la pénétration des racines,
- la profondeur d'une éventuelle grepp doit être observée suite à l'ouverture d'une fosse intra parcellaires (Guirese, 1989) parce que le sondage à la tarière permet de rencontrer des niveaux impénétrables qui peuvent être attribués à l'existence d'une couche de grepp ou d'un niveau graveleux.

IV.2. Où : Choix des parcelles

Le choix des parcelles, dites de référence, a été réalisé tenant en compte un certain nombre de connaissances, contraintes ou conditions :

- 1- Elles doivent être situées dans une zone représentative des zones du bassin. Pour les localiser une logique basée sur les connaissances de la structuration du bassin versant est suivie.
- 2- Les parcelles choisies (2 au total) doivent être récoltées ou susceptibles d'être récoltées par les moissonneuses batteuse équipées. Cette contrainte est nécessaire pour la suite du travail de recherche de mise en relation du sol avec le rendement.

Compte tenu de ces aspects la démarche est présentée ci-dessous.

IV.2.1. Démarche pour les choix des parcelles

La démarche suivie pour le choix des parcelles est illustré Figure Annexe IV-3. Cette démarche est descendante du point de vue étendue ou échelle d'observation : du bassin versant à la parcelle et parallèle selon les deux thématiques : géo-pédo-morphologie et agricole. La thématique « géo-pédo-morphologie » permet de cibler la zone par son intérêt « sol » et la thématique « agricole » permet de cibler d'un point de vue potentiel agricole et zone d'agriculture de précision. Ensuite, comme illustré dans la méthodologie de la Figure Annexe IV-3, ces deux colonnes d'information sont croisées permettant ainsi de sélectionner la zone d'étude et les parcelles où les mesures doivent être réalisées. Dans la suite nous allons présenter chacune de ces étapes en suivant l'ordre montré sur la Figure Annexe IV-3.

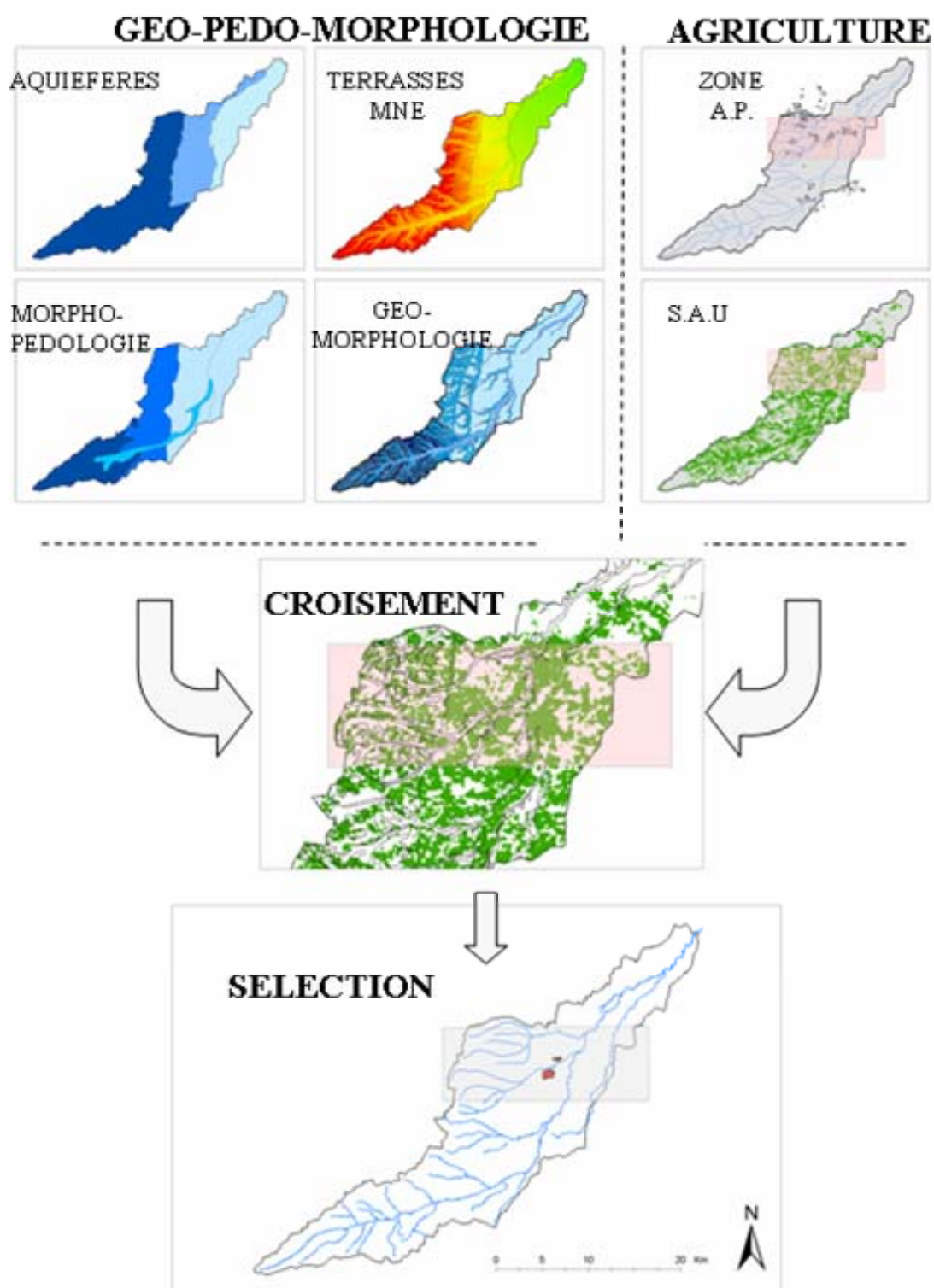


Figure Annexe IV-3- Méthodologie pour le choix de l'emplacement des parcelles

IV.2.1.1. Geo-pédomorphologie

IV.2.1.1.a. Aquifère

L'aquifère est une formation géologique souterraine, formée de roches poreuses ou fissurées, dans laquelle l'eau peut s'infiltrer, s'accumuler et circuler. Le mot aquifère désigne à la fois le contenant (les roches) et son contenu (l'eau). Ce terme est associé au terme nappe (d'eau souterraine) qui désigne l'ensemble de l'eau contenue dans une fraction perméable de la croûte terrestre totalement imbibée, conséquence de l'infiltration de l'eau dans les moindres interstices du sous-sol et de son accumulation au-dessus d'une couche imperméable (Cnrs-Dist, 2005). Les limites et les types d'aquifère ont une répercussion sur le développement des sols. Sur le bassin versant du Touch, trois aquifères divisés en deux groupes sont identifiés (Figure Annexe IV-3) :

- Un aquifère intra ou infra molassique : En amont du bassin versant, à l'ouest, sous les coteaux et la haute terrasse de la Garonne, l'aquifère est profond, intra ou infra molassique : protégés par l'épaisse couche de molasse, elles se superposent entre 200 et plus de 2000 mètres de profondeur. Le seul aquifère profond réellement exploitable est la nappe infra molassique, située directement sous la molasse. A ce niveau en effet, se trouve une couche, plus ou moins épaisse et plus ou moins profonde, de sables datant de l'éocène à travers laquelle l'eau peut circuler
- Deux aquifères alluviaux : Sous la moyenne terrasse de la Garonne, la nappe est alluviale, libre. Sous la basse terrasse, la nappe correspond à celle de la Garonne, elle est encore plus proche que la dernière.

Ces aquifères permettent donc de dessiner le premier des découpages du bassin versant dans la compréhension de son fonctionnement.

IV.2.1.1.b. Terrasses

A l'aide d'un Modèle numérique d'élévation (MNE) (Us-Geological-Survey, 2004) les limites des terrasses évoquées dans la bibliographie (§-Annexe IV.1.1.1) peuvent être retrouvées (Figure Annexe IV-3). La comparaison des limites des aquifères avec les terrasses montre l'étroite relation de ces deux informations géomorphologiques. Le bassin versant se trouve donc maintenant divisé en 4 zones.

IV.2.1.1.c. Morpho-pédologie de la région

Les limites des grands ensembles morpho-pédologiques de la région (C.R.A.M.P., 1995) tient compte des deux couches d'informations précédentes. Toutefois il est intéressant de diviser en étapes ce découpage spatial pour comprendre la structuration du bassin versant. D'après ces ensembles deux grandes zones sous divisées sont différenciables :

- Zones alluviales

- 1- Plaines alluviales des grandes rivières – Terrasses planes d'alluvions anciennes (boulbènes)
- 2- Hautes terrasses découpées (boulbènes de coteaux, rougets,...)
- 3- Vallées des rivières secondaires avec terrasses peu développées.

- Coteaux argilo-calcaires

- 4- Coteaux accidentés (terreforts sup. dominants)

La prochaine étape avant de croiser cette information avec l'information provenant de la colonne agricole (Figure Annexe IV-3) est l'insertion de l'information géo-morphologie.

IV.2.1.1.d. Geo-morphologie de la région

La géo-morphologie du bassin versant du Touch, établie par le BRGM (Desprats et al., 2003) peut être considérée comme une synthèse des couches précédentes. Toutefois les Limons sur Alluvions du quaternaire traversent le bassin versant d'Est en Ouest. Cette classe peut être coupée selon les limites des informations précédentes, les aquifères et les terrasses.

IV.2.1.2. Agricole :

IV.2.1.2.a. Zone de cartographie du rendement

La première contrainte du point de vue agricole est celle de la disponibilité des parcelles cartographiées : là où le rendement est et/ou sera cartographié. Comme indiqué sur la Figure Annexe IV-3 la zone d'agriculture de précision (en rouge) traverse le bassin versant d'Est en Ouest ; il couvre une partie des zones d'alluvions et des colluvions. Elle se trouve loin des zones de molasse de l'amont du bassin versant

IV.2.1.2.b. Densité agricole - Classification

Dans les sous zones [définies par le contexte géo-pédomorphologique] de la zone d'étude [définie par les parcelles cartographiées] où la SAU est plus élevée, il sera plus intéressant de réaliser des mesures parce qu'elles seront extrapolables d'une façon fiable sur une plus grande

surface agricole, donc susceptibles d'intéresser un plus grand nombre d'exploitants. Dans la Figure Annexe IV-3 les limites correspondantes aux parcelles agricoles (issues d'une classification supervisée réalisée au sein du LTGT en 2002) sont illustrées.

IV.2.1.3. Intersection

Cela consiste en le croisement de toutes les informations précédentes au moyen d'un SIG. Comme le montre la Figure Annexe IV-3, les zones avec une plus grande surface agricole, situées dans notre zone d'étude, correspondent aux limons sur alluvions du quaternaire : les boubènes de la basse et la moyenne terrasse. Donc le choix doit être fait parmi les parcelles de ces deux terrasses. Etant donné que la ferme expérimentale de Lamothe se trouve sur la base terrasse où un suivi a déjà été réalisé (Tourinho_Soto, 2001), la terrasse sélectionnée sera la moyenne terrasse aux sols de boubènes, limons sur alluvions

IV.2.1.4. Sélection

La sélection de la moyenne terrasse nous ramène à nouveau à la bibliographie des sols où il a été annoncé que c'est la terrasse où les sols, type boubènes superficielles, présentent le grepp de façon plus continue. On peut rappeler que cette terrasse est divisée en deux parties : une partie Ouest où la couverture limoneuse est plus épaisse et les sols plus blancs (boubènes blanches) et une partie Est, avec un sol plus réduit et le sommet de la grave est cimenté en grepp. Dans un but de représentativité du bassin versant, les deux parcelles expérimentales doivent se situer sur ces deux zones.

IV.2.1.5. Parcelles

Concernant les parcelles il y a deux conditions :

1- Le choix de la culture présente deux autres contraintes :

- la représentativité : la culture doit être représentative au sein de la terrasse. Les cultures principales dans le bassin versant sont le maïs et le tournesol suivi du blé.
- la modulation : outre de la représentativité, une culture pour laquelle l'intervention sur l'itinéraire technique est maximale présente plus d'intérêt. C'est le cas du maïs, où il est possible de varier les doses d'irrigation et fertilisation. Le blé, par contre, est moins intéressant : étant donné qu'il n'est pas irrigué, il n'est possible que d'agir sur la fertilisation

2- que les parcelles soient représentatives de la moyenne terrasse : pour cela le meilleur choix est de trouver une parcelle dans une zone avec du grepp et l'autre parcelle sur un sol sans grepp ; cette configuration balaye, grosso modo, l'ensemble de possibilités de la terrasse.

Compte tenu de ces conditions et des parcelles pour lesquelles on dispose du rendement cartographié les parcelles susceptibles d'être équipées se trouvent sur la partie Est de la terrasse. En général, la plupart des parcelles de cette terrasse, et en particulier les parcelles de ces agricultures, sont cultivées en maïs. Ensuite le choix des parcelles Figure Annexe IV-3, au sein de l'exploitation a été réalisé sous le conseil des deux agriculteurs (M. Mespoulet et M. Renoux).

IV.2.2. Résultats et conclusion

Cette méthodologie en cascade contextuelle a permis de bien connaître le contexte géomorphologique et agricole de la zone où les mesures sont réalisées. Après l'installation des mesures nous avons récupérée, numérisée, georeferencée et vectorisée une carte de sols de la zone à l'échelle 1/50000 (C.A.C.G., 1968). Le zoom de cette carte sur notre zone d'étude permet de voir que les deux parcelles se trouvent sur le même type de sols, avec une couche de grepp en profondeur signalée par une ligne noire pointillée (Figure Annexe IV-4). Cela implique que d'un point de vue spatial l'emplacement des parcelles choisies n'est pas tout à fait représentatif des deux types de sols de la terrasse. L'absence de parcelles cartographiées sur la zone Ouest a provoqué la non représentativité de sols de sans grepp.

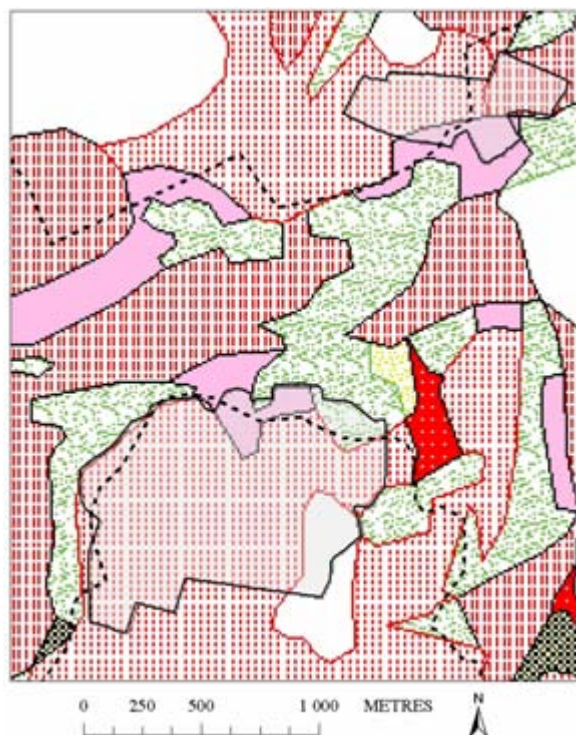


Figure Annexe IV-4- Parcelles sélectionnées et plages de sols avec les zones de grepp. Les parcelles sont indiquées par les lignes continues ; le grepp par les lignes pointillées et les couleurs correspondent aux différents types de sols.

IV.3. Quoi : Suivi de l'humidité

Les points les plus remarquables dans le contexte agronomique des sols de boubènes est l'existence d'une éventuelle couche imperméable, l'existence du drainage et sa répartition spatiale ainsi que le microrelief... (cf. sous-chapitre VII.1.3) .Le dénominateur commun de ces points est «la disponibilité en eau du sol». De ce fait un suivi de l'humidité du sol s'avère indispensable.

D'autres observations, comme des analyses de sols pour vérifier l'existence d'un plancher imperméable (taux d'argile très élevé, etc), des mesures de densité apparente, ou le LAI (Lead Area Index) permettant de voir l'évolution du développement de la culture ont été aussi réalisées.

IV.4. Comment : Mesures

Le choix de l'emplacement de la mesure au sein de la parcelle a été réalisé d'après la connaissance des parcelles des exploitants et d'après la variabilité du rendement. La cartographie du rendement nous a permis de choisir deux zones au sein de chacune des

parcelles ayant un rendement différent pour ainsi étudier les causes de variabilité Figure Annexe IV-5.

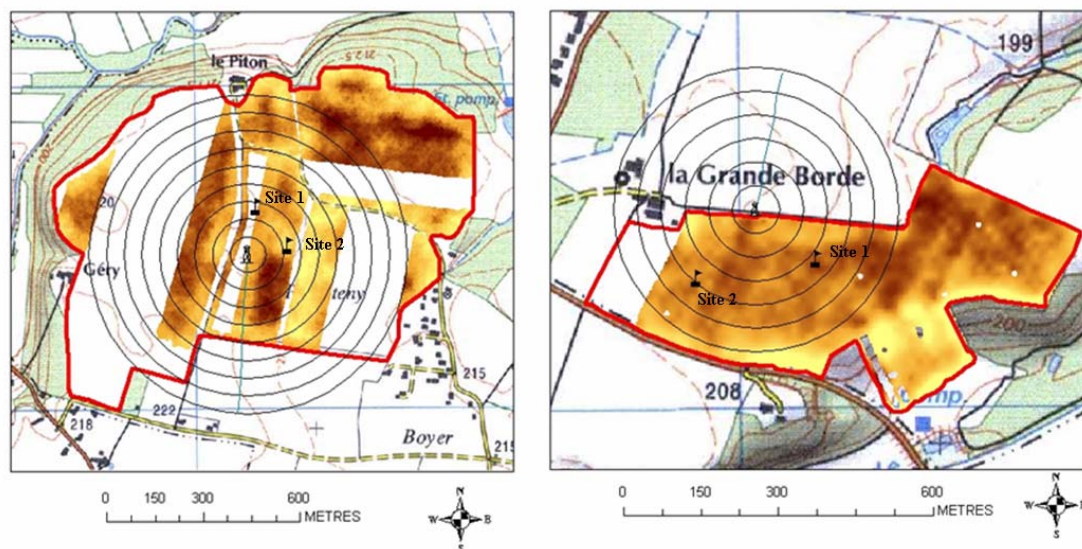


Figure Annexe IV-5- Parcelles de M. Renoux (gauche) et M. Mespoulet (droite) avec les points des mesures (drapeau), la carte de rendement, et le tour du pivot d'irrigation.

IV.4.1. Mesures

IV.4.1.1. Densité

Sur les deux points des mesures des deux parcelles (Figure Annexe IV-5) la mesure de la densité apparente a été réalisée par une méthode non remaniée, la méthode du cylindre. Cette méthode consiste à prélever avec un cylindre un échantillon de sol d'un volume de 200 cm³, dont on a déterminé la masse sèche après étuvage à 105°C pendant 24 h. La densité apparente est le rapport entre la masse sèche et le volume de l'échantillon prélevé (Musy et Souter, 1991).

IV.4.1.2. Humidités massiques à la capacité au champ et au point de flétrissement.

Sur les deux points des mesures des 2 parcelles, nous avons aussi estimé l'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent à partir d'une courbe de rétention «terrain» construite en confrontant des mesures régulières dans le temps d'humidité massiques et de mesures du potentiel hydrique. Nous avons ensuite considéré l'humidité à la capacité au champ comme l'humidité à un potentiel hydrique de 30 kPa.

Pour la mesure de l'humidité massique nous avons choisi la méthode gravimétrique qui consiste à prélever un échantillon de sol à l'aide d'une tarière, le peser à l'état humide puis sec après 24 heures à 105 °C. La masse d'eau évaporée rapportée à la masse de sol sec correspond à la teneur en eau massique du sol (Gaudu et Chanzy, 1996). Chaque humidité est la moyenne de 4 répétitions sur trois profondeurs différentes (0-15, 25-35 et 55-65 cm). Normalement dans ce type de mesures il faut disposer d'une ample gamme de variation des mesures d'humidité et de potentiel pour pouvoir établir la courbe de « potentiel-humidité ».

Pour la mesure du potentiel hydrique du sol, nous avons utilisé des sondes « watermark ». Ces sondes, comme des tensiomètres classiques, mesurent la pression de l'eau du sol. Une mesure de la résistance électrique de l'eau est réalisée puis convertie par un boîtier électronique en unités de pression (cbar). La gamme de mesure de la sonde peut varier entre 0 et 200 cbar. Ces tensiomètres étaient, sur le terrain, placés à deux hauteurs différentes comme le montre sur la Figure Annexe IV-6:

a- sur un des points de la parcelle (Figure Annexe IV-6)

- 3 tensiomètres à 60cm
- 6 tensiomètres à 30 cm : 3 sur le rang et 3 sur l'inter rang

b- sur l'autre point de mesure (Figure Annexe IV-6)

- 3 tensiomètres à 60 cm
- 3 tensiomètres à 30 cm

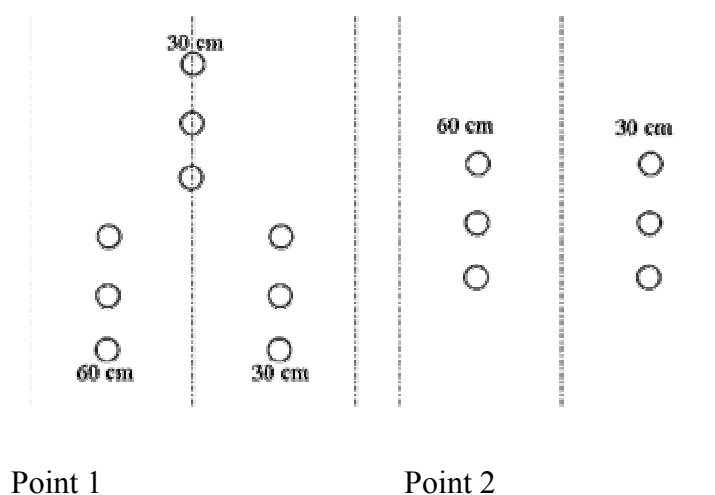


Figure Annexe IV-6- Installation des tensiomètres

IV.4.1.3. Humidité volumique

L'humidité volumique du sol a été calculée à partir des mesures d'humidité gravimétrique effectuées à différentes dates du cycle cultural. L'humidité volumique ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) se calcule en multipliant l'humidité massique (g.g^{-1}) par la densité apparente (g.cm^{-3}).

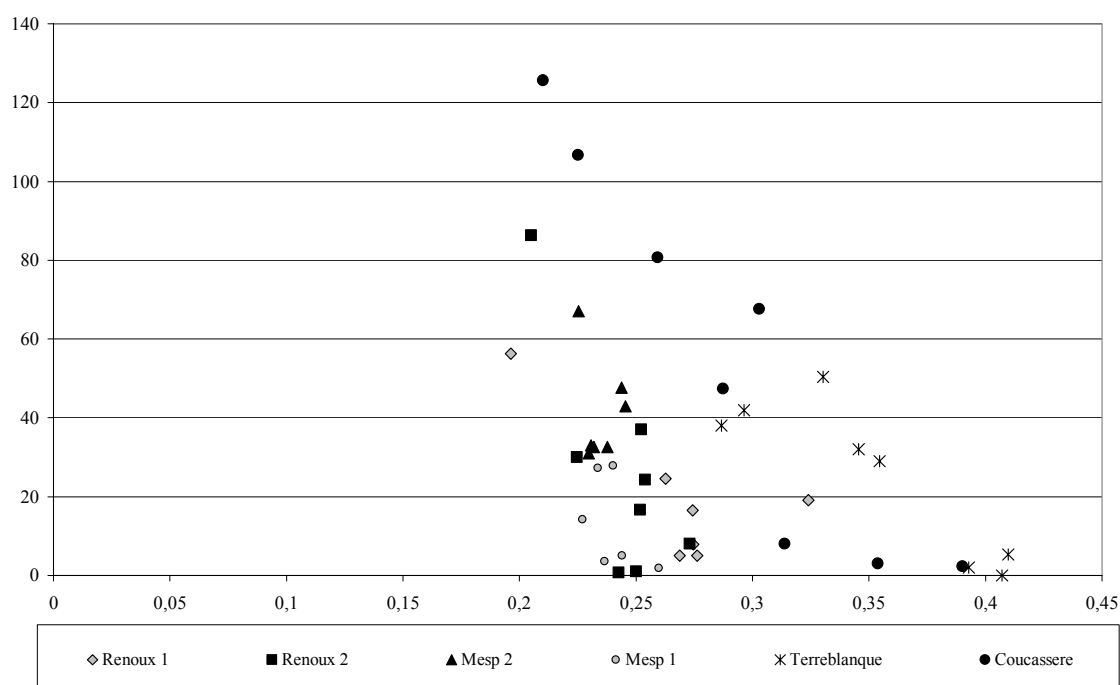
IV.4.1.4. LAI

Pour les mesures du LAI, nous avons utilisé le Li-cor 2000. Cet appareil calcule, simultanément pour cinq angles, l'indice foliaire et l'angle d'inclinaison moyen d'un couvert végétal à partir des mesures de l'atténuation du rayonnement diffus. Une mesure avec le LAI demande 10 valeurs au minimum, 5 mesures au-dessus de la canopée et 5 mesures sous la canopée. Pour nos mesures, nous avons réalisé 20 valeurs. Ces mesures ont été réalisées mensuellement, entre les mois de mars et de juin (sur le blé).

IV.4.2. Résultats

Sur ces mesures, nous avons eu un ensemble de problèmes :

- l'impossibilité de disposer d'une dispersion de valeurs de potentiel et d'humidité suffisante pour construire la courbe d'humidité potentielle



La répartition des valeurs de potentiel dans le graphique ci-dessus conçu pour estimer les valeurs d'humidité à la capacité au champ et au point de flétrissement n'est pas suffisante pour construire la courbe d'humidité et potentiel. L'irrigation du maïs est à l'origine de cette non

représentativité des valeurs d'humidité et potentiel dans les valeurs de fort potentiel (sol plus sec).

- une partie des tensiomètres a été bloquée

Cette problème est récurant dans l'utilisation des tensiomètres type watermark, où un mauvais contact de la bougie poreuse avec le sol donne lieu soit à de valeurs aberrants soit à l'absence de valeurs. Ce dernier a été le cas à partir du mois de juillet pour 6 des tensiomètres installés.

- la mesure de densité par la méthode de cylindre n'est pas appropriée aux sols avec une densité de cailloux importante (cf. Annexe IV.1.2.2.a.1).

Le tableau suivant montre les valeurs de densité sur les différents sites (Annexe Tableau 1) :

<i>DENSITE (g/cm³)</i>	<i>Site 1</i>	<i>Site 2</i>
<i>Parcelle Mespoulet</i>	<i>1.463</i>	<i>1.478</i>
<i>Parcelle Renoux</i>	<i>1.4765</i>	<i>1.487</i>

Annexe Tableau 1- Valeur de densité (g/cm3) pour les deux sites des deux parcelles d'étude

Les valeurs de densité obtenus ne correspondent pas à ceux de la bibliographie (§ Annexe IV.1.2.2.a.1), en conséquent il est utile d'adapter le matériel à ce type de sols.

- Les valeurs de humidité n'étaient pas temporellement représentatives

Les graphiques de la Figure Annexe IV-7 montrent les valeurs d'apports d'eau (précipitation et irrigation), potentiel et humidité sur l'ensemble de la période de mesures et pour les deux points de deux sites.

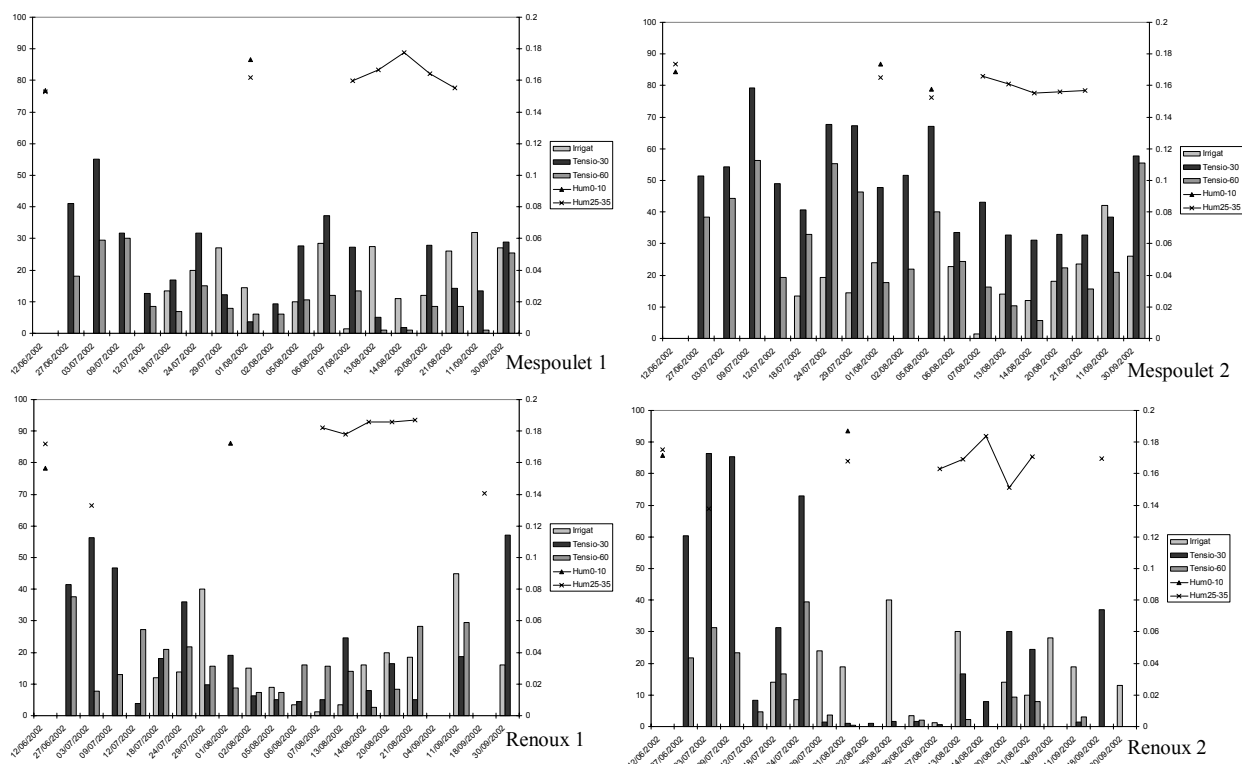


Figure Annexe IV-7 Mesure d'apport d'eau (Irrig), potentiel (tensio) à 30 et 60 cm, humidité à 0-10 cm et 25-35 cm pour les deux points des deux parcelles.

Dans cette figure il est, d'une part, illustré l'absence de représentativité temporelle de la mesure de humidité. D'autre part, concernant les apports d'eau une installation insuffisante de pluviomètres ne nous a pas permis de disposer de données spatialement représentatives jusqu'au mois de juillet.

IV.5. Conclusion

Cette annexe consacrée au terrain a été divisée en quatre parties ; après une première partie bibliographique, le choix des parcelles des mesures, les mesures et les résultats ont été présentés. Cette approche de terrain nous a permis de mieux comprendre la spatialisation du bassin versant lors du choix des parcelles et les mesures nous ont permis de nous rendre compte de :

- la lourdeur des mesures de terrain
- son inadéquation aux échelles recherchés (bassin versant)
- l'investissement économique pour sa mise en place

Concernant les résultats, la moyenne terrasse a été choisie comme terrasse présentant un plus grand intérêt dans une démarche de l'étude de sols en agriculture de précision. Dans cette

terrasse deux zones étaient bien différenciées : la zone Est (sol cimenté en grepp) et la zone Ouest (couverture plus épaisse). A cause des contraintes, telles que la culture (maïs) et la nécessité de choisir de parcelles avec le rendement cartographié, les deux parcelles choisies se trouvent sur la partie Ouest de la terrasse. Ce choix s'est avéré ainsi représentative que des parcelles de la partie Est.

Concernant les mesures réalisées dans deux points des deux parcelles ; ces mesures, de par a) Le problèmes avec certain tensiomètres, les mesures de densité – peu adapté à de sols caillouteux – ainsi que la lourdeur de mesures d'humidité massique et b) le protocole avec deux mesures ponctuelles et un transect pour comprendre l'influence du sol sur le rendement ; n'est pas suffisamment significatif.

Pour aboutir aux objectifs de cette thèse, ce travail aurait nécessité plus de données à l'échelle de la parcelle et un meilleur choix de leur emplacement (§IV.2.2) pour pouvoir mettre en place ou développer des techniques de spatialisation et/ou de changement d'échelle. Or ces techniques sont à part entière des travaux de recherche (Carré, 2002; Lagacherie et al., 1997; Lagacherie et Voltz, 2000).

En conséquence, pour pouvoir comparer la variabilité du sol avec celle du rendement nous nous sommes orientés vers une autre source de données moins chères (ramené à la surface), et spatialisées sur l'ensemble de l'étendue et disponibles à une précision proche de celle nécessaire pour les décisions en agriculture de précision. Cette source de données est la télédétection. Dans les chapitres VII, VIII et IX de la thèse nous avons abordé l'étude de la variabilité des sols par télédétection.

Bibliographie des ANNEXES

BEGON, J. C., 1990. Les sols de boubènes du Toulousain. In: S.O., A. (ed.), Les sols de boubènes, Toulouse.

BLACKMORE, S., GODWIN, R. J. et FOUNTAS, S., 2003. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. *Biosystems Engineering*, **84**(4): pp. 455-466.

C.A.C.G., 1968. Etude intra parcellaires de reconnaissance - Grand ensemble de la NESTE, des petites Pyrénées et des terrasses de Saint-Lys, Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne.

C.R.A.M.P., 1995. Les grands ensembles morpho-pédologiques de la région Midi-Pyrénées, Chambre Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées.

CARRÉ, F., 2002. Cartogénèse des sols et changements d'échelle : application dans la région de La Rochelle sur une base de données pédologiques de plusieurs milliers d'observations, Institut National Agronomique Paris-Grignon, Paris

CNRS-DIST, 2005. L'eau douce: une ressource précieuse: Glossaire. Centre Nationale de la Recherche Scientifique - Délégation à l'information scientifique et technique.

DESPRATS, J.-F., SIDGWICK, J., CERDAN, O. et LINARDON, F., 2003. Modélisation hydrologique du bassin versant du Touch. Cartographie du potentiel d'infiltration des sols et analyses hydrologiques. RP 52808FR, BRGM.

ERDAS-LLC, 1999. *ERDAS Field Guide*. pp. pp164-166. (Antlanta:

GAUDU, J. C. et CHANZY, A., 1996. Les grandes méthodes de la teneur en eau du sol, leur complémentarité. In: INRA (ed.), IVièmes journées de mesure-électronique, informatique, automatique, Carry le Rouet, pp. 5 - 10 p.

GAY, M. et CHÉRET, V., 1999. Anayse de la variabilité statique intraparcellaire au moyen de données de télédétection satellitale, Colloque ICTA VII, Florence (Italy).

GUIRESSE, A. M., 1989. Drainage en sols de boubènes: relation entre les caractéristiques morphologiques et les propriétés hydrodynamiques des sols, Institut national polytechnique, Toulouse

LAGACHERIE, P., CAZEMIER, D. R., VAN GAANS, P. F. M. et BURROUGH, P. A., 1997. Fuzzy k-means clustering of fields in an elementary catchement and extrapolation to a larger area. *Geoderma*, **77**: pp. 197 - 216.

LAGACHERIE, P. et VOLTZ, M., 2000. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data: a conditional probability approach. *Geoderma*, **97**(3-4): pp. 187-208.

LAYROL, L., FRANCOIS, O. et LEPOUTRE, D., 2001. Multi-temporal yield, 3th international conference of geospatial information in agriculture and forestry.

LAYROL, L., HEDOUIN, E. et LEPOUTRE, D., 2000. Matching multitemporal yield and images data. In: al., P. C. R. e. (ed.), 5 th International conference on Precision agriculture. ASA Misc., Madison.

MAESTRE GIL, F. T., 2002. La restauracion de la cubierta vegetal en zonas semiaridas en funcion del patron espacial de factores bioticos y abioticos, Universidad de Alicante, Alicante

MARTY, J. R., 1969. Caractères et Propriétés physiques. Conséquences agronomiques, INRA, Toulouse.

MUSY, A. et SOUTER, M., 1991. *Physique du sol*. pp. 335. (Lausanne:

RICHARDS, J. A., 1986. *Remote sensing digital image analysis*. (New York: Springer Verlag).

STAFFORD, J. V., MURRAY LARK, R. et BOLAM, H. C., 1998. Using yield maps to regionalize fields into potential management units, 4th International Conference on Precision Agriculture.

STEIN, A., BROUWER, J. et BOUMA, J., 1997. Methods for comparing spatial variability patterns of Millet yield and soil data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **61**: pp. 861 - 870.

TOURINÑO_SOTO, I., 2001. Capacité de STICS à prévoir le rendement dans une parcelle de blé d'hiver : étude des effets liés à la variabilité des conditions de sol, ESA-Purpan- (Toulouse), INA-PG,ENS,Univ. Paris VI.

US-GEOLOGICAL-SURVEY, 2004. SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). US Geological Survey.