

Master Sciences et Technologies  
Mention "Sciences de l'Univers,  
Environnement, Ecologie"

Master Sciences et Techniques du Vivant  
Mention "Sciences Agronomiques, de  
l'Environnement et du Paysage"

Spécialité Master 2 "Environnements Continentaux et Hydrosociences"  
Parcours "**Sols : organisation, fonctionnement et gestion**"

**Sujet : Détermination de zones de rendement homogènes à partir  
d'une analyse de séries pluriannuelles de cartes de rendement**

*Subject: Determination of homogeneous yield areas from yield-map series*

**Par : Leslie LABORDE**  
Inscrite à l'AgroParisTech

Stage effectué à l'INRA d'Orléans – UR0272 : Unité de « Science du Sol »



**Soutenu le 20 Juin 2013, à Thiverval-Grignon, devant le jury composé de :**

Rapporteur : GILLIOT Jean-Marc

Maître de Stage : BOURENNANE Hocine

Examineurs : BENOIT Pierre (INRA)  
CHENU Claire (AgroParisTech)  
MICHELIN Joël (AgroParisTech)  
RUMPEL Cornelia (CNRS)

## Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier Hocine Bourennane (INRA UR 272, Unité « Science du sol », Orléans) pour son encadrement, son appui et ses conseils avisés en géostatistique tout au long du stage ainsi que Catherine Hénault, directrice de cette unité, qui a rendu possible le bon déroulement de ce stage.

Merci également aux personnes qui m'ont apporté leur aide à l'INRA d'Orléans comme Valentin Généré pour sa bonne connaissance du terrain, et sa forte mobilisation autour du projet Aquateam ainsi que Bernard Nicoullaud, pour les données pédologiques. Un grand merci également au travail amont réalisé par Alain Couturier pour le pré-traitement des données ainsi que son travail réalisé en tant que PRI (Personne Ressource en informatique). Merci également à Sébastien Lehmann et à Joël Darroussin pour leurs aides techniques.

Un remerciement général à toute l'équipe de Science du sol ainsi que d'Infosol pour leur accueil et leur bonne humeur.

*« Everything is related to  
everything else, but near things are more  
related than distant things »  
TOBLER, 1970*

**TABLE des MATIERES**

Remerciements .....	2
Table des matières .....	3
Résumé .....	4
Abstract .....	4
Glossaire.....	5
<b>1. Introduction.....</b>	<b>6</b>
<b>2. Matériel et approches développées .....</b>	<b>7</b>
2.1 Site et matériel d'étude .....	7
2.2 Approches développées.....	8
<b>3. Résultats et discussion .....</b>	<b>9</b>
3.1 Prétraitements des rendements de blé.....	9
3.1.1 <i>Bornage du rendement</i> .....	9
3.1.2 <i>Spatialisation du rendement</i> .....	10
a. <i>Estimation et ajustement d'un variogramme pour chaque campagne de mesure de rendement de blé</i> .....	10
b. <i>Interpolation du rendement de blé par krigeage ordinaire</i> .....	12
3.2 Détermination de zones de rendement homogènes par analyse fréquentielle (AFQ) .....	12
3.2.1 <i>Réalisation de l'AFQ sur la grille régulière</i> .....	12
3.2.2 <i>Approche géostatistique pour un zonage de la parcelle en unités de gestion potentielle pour la conduite des cultures</i> .....	15
3.2.3 <i>Variation des propriétés du sol en fonction du zonage établi</i> .....	18
3.2.4 <i>Application de l'AFQ à la culture de maïs sur les deux parcelles</i> .....	20
3.2.5 <i>Adéquation entre les zonages en fonction de la culture</i> .....	25
3.3 Détermination des zones de rendement homogènes par analyse factorielle krigeante (AFK) .	26
3.3.1 <i>Application de l'AFK sur les cartes de rendement</i> .....	26
3.3.2 <i>Adéquation entre les zonages en fonction de la culture</i> .....	28
3.3.3 <i>Variation des propriétés du sol en fonction du zonage établi pour le blé et le maïs</i> .....	29
<b>4. Conclusion et perspectives .....</b>	<b>30</b>
Bibliographie .....	32
Liste des figures et des tableaux .....	33
<b>Annexe 1</b> : cartes des sols : type de sol, profondeur (cm) et réserve utile (mm).....	35
<b>Annexe 2</b> : cartes de rendement issues des capteurs de rendement, ajustement des variogrammes expérimentaux et cartes de rendement par krigeage ordinaire (KO).....	36
<b>Annexe 3</b> : statistiques relatives aux propriétés des sols (profondeur des sols et réserve utile) en fonction du zonage issu de l'analyse fréquentielle pour le blé (a) et le maïs (b).....	43

## Résumé

Des zones de rendements homogènes ont été identifiées sur deux parcelles adjacentes de l'ordre de 50 ha chacune localisées sur la commune de Villamblain dans le Loiret. Le zonage a été réalisé selon deux approches à partir de mesures sur 11 années de rendements du blé et du maïs effectuées à l'aide de capteurs embarqués sur les machines de récoltes. La première approche de zonage est basée sur une analyse fréquentielle que nous avons dénommée AFQ dans ce mémoire, et la seconde approche est basée sur une analyse géostatistique multivariable connue sous le nom d'analyse factorielle krigéante (AFK). Dans un premier temps et dans les deux cas, on parvient à obtenir des zones présentant des rendements moyens différents et de tailles suffisantes pour qu'elles soient envisagées comme des unités de gestion différenciées pour l'agriculteur. Toutefois, les résultats révèlent que le zonage par AFK paraît notamment mieux approprié dans le cas d'une culture systématiquement irriguée pour laquelle le zonage établi par AFQ est d'avantage influencé par la méthode d'irrigation. Le zonage selon l'approche AFK semble donc plus générique, il demeure néanmoins moins facile à mettre en œuvre comparativement à l'approche par AFQ qui est plus intuitive. Dans un second temps, en utilisant une carte pédologique détaillée de la parcelle établie antérieurement, on montre que le zonage établi par les deux approches est en adéquation avec le type de sol, son épaisseur et sa réserve utile potentielle. Ce constat ouvre de nombreuses perspectives en ce qui concerne l'utilisation des cartes de zones de rendements homogènes.

Mots-clés : Cartes de rendements ; Zones homogènes ; Analyse fréquentielle ; Modèle linéaire de corégionalisation ; Sols ; Epaisseur ; Réserve Utile

## Abstract

Homogeneous yield areas were identified on two adjacent plots of about 50 ha each, in the centre France. The zoning was done using two approaches based on measurements of 11-year yields of wheat and maize made using onboard sensors of harvest machines. The first zoning approach is based on a frequency analysis referred as FQA in this work, and the second approach is based on a multivariate geostatistical analysis known as factorial kriging analysis (FKA). Both approaches lead to areas with average yields statistically different and sufficient sizes for them to be considered as differentiated management units for farmers. However, the results show that the FKA zoning seems more appropriate in the case of a systematically irrigated crop for which the zoning established by FQA is more influenced by irrigation method. Zoning according to FKA approach seems more generic, it nevertheless remains less easy to implement compared to the FQA approach which is much more intuitive. In addition, this work revealed that the zoning established by the two approaches is consistent with soil type, its thickness and its potential available water content. This finding opens many perspectives regarding the use of maps of homogeneous yield areas.

Keywords: Yield maps; Homogeneous areas; Frequency analysis; Linear model of coregionalization; Soils; Soil thickness; Available water content

## Glossaire

### Variogramme expérimental (définition):

- Effet “pépite” (en/Nugget effect) : *Valeur de la variance pour une distance nulle*
- Palier (en/sill) : *Valeur de la variance à partir de laquelle le variogramme ne croît plus.*
- Portée (en/range) : *Distance à partir de laquelle le palier est atteint. Au-delà de cette portée, les observations sont indépendantes.*

### Géostatistique :

- ACP : Analyse en composante principale
- AFK : Analyse factorielle krigéante
- AFQ : Analyse fréquentielle
- KO : Krigeage ordinaire
- LMC : Modèle linéaire de corégionalisation

### Unités :

- Q : quintal (1 quintal = 100kg)
- ha : hectare

### Autre

- RU : Réserve utile

## 1. Introduction

Dans un contexte marqué par le changement climatique et une exigence accrue de la qualité environnementale, les agriculteurs sont soumis à des quotas de prélèvement d'eau de plus en plus stricts. Ils devront également poursuivre leurs efforts en matière d'apports d'engrais pour atteindre la qualité des eaux fixée par la directive cadre européenne. L'optimisation de la consommation de l'eau en fonction du quota de l'exploitant, des types de sols et des cultures semble incontournable. Il en est de même de l'apport d'azote ou d'autres techniques culturales qui devront mieux s'ajuster en fonction de la diversité des sols et des cultures y compris au sein d'une parcelle.

Dans ce contexte, les zones de rendements agricoles homogènes peuvent constituer une base de gestion durable intra-parcellaire. En effet, les cartes de rendement qui sont désormais de plus en plus présentes dans les exploitations peuvent servir de support à la détermination de zones homogènes qui pourront bénéficier d'itinéraires techniques modulables pour des cultures respectueuses de l'environnement sans pour autant diminuer les rendements et la qualité des récoltes.

Plusieurs auteurs (e.g. Blackmore, 2000 ; Bourennane et al., 2004 ; Diker et al., 2004 ; Basso et al., 2007 ; Bocchi et Castrignano, 2007 ; Florin et al., 2009 ; Guastaferro et al., 2010) ont proposé des méthodes statistiques s'appliquant à des séries pluriannuelles de cartes de rendement des cultures pour la définition de zones pouvant bénéficier de techniques homogènes. Parmi les méthodes les plus couramment utilisées pour ce type d'analyse, on peut citer trois grandes catégories : (1) l'analyse fréquentielle ; (2) les méthodes de classifications non supervisées ; (3) l'analyse fractale et l'analyse géostatistique, avec différents algorithmes au sein de chaque catégorie.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire compare dans un premier temps une approche qui découle de l'analyse fréquentielle à une approche de géostatistique multivariable pour définir des zones homogènes de rendement. Dans un second temps les zones identifiées sont confrontées aux types de sols et à certaines propriétés physiques du sol jouant un rôle important dans les choix en matière d'irrigation : son épaisseur et sa réserve utile potentielle.

Ce travail servira donc de support pour de futurs travaux visant à montrer que les cartes de rendement accumulées sur une exploitation pendant plusieurs années pourraient être utilisées comme base pour une gestion intra-parcellaire des pratiques culturales visant principalement une optimisation de la consommation de l'eau. Cette idée sera développée dans le cadre du projet Aquateam (projet FUI « Fonds Unique Interministériels » 2012-2014) dont l'un des objectifs est de développer un outil innovant d'aide à la décision à destination du monde agricole sur le territoire de la nappe de Beauce et permettra d'optimiser l'utilisation de la ressource en eau par l'irrigation.

## 2. Matériel et approches développées

### 2.1 Site et matériel d'étude

Le site d'étude est localisé dans le département du Loiret (45) à environ 35 km au Nord-ouest d'Orléans sur la commune de Villamblain au lieu-dit du « Limoron » (Figure 1). Implanté dans la région naturelle de la « Petite-Beauce », on retrouve au niveau de ces paysages, des grandes parcelles agricoles (blé, maïs, betteraves, etc..) en « openfield » (sans haies, ni clôtures) avec un relief très peu marqué. L'homogénéité apparente de cette région dissimule une importante variabilité spatiale des sols (e.g. Michot, 2003).

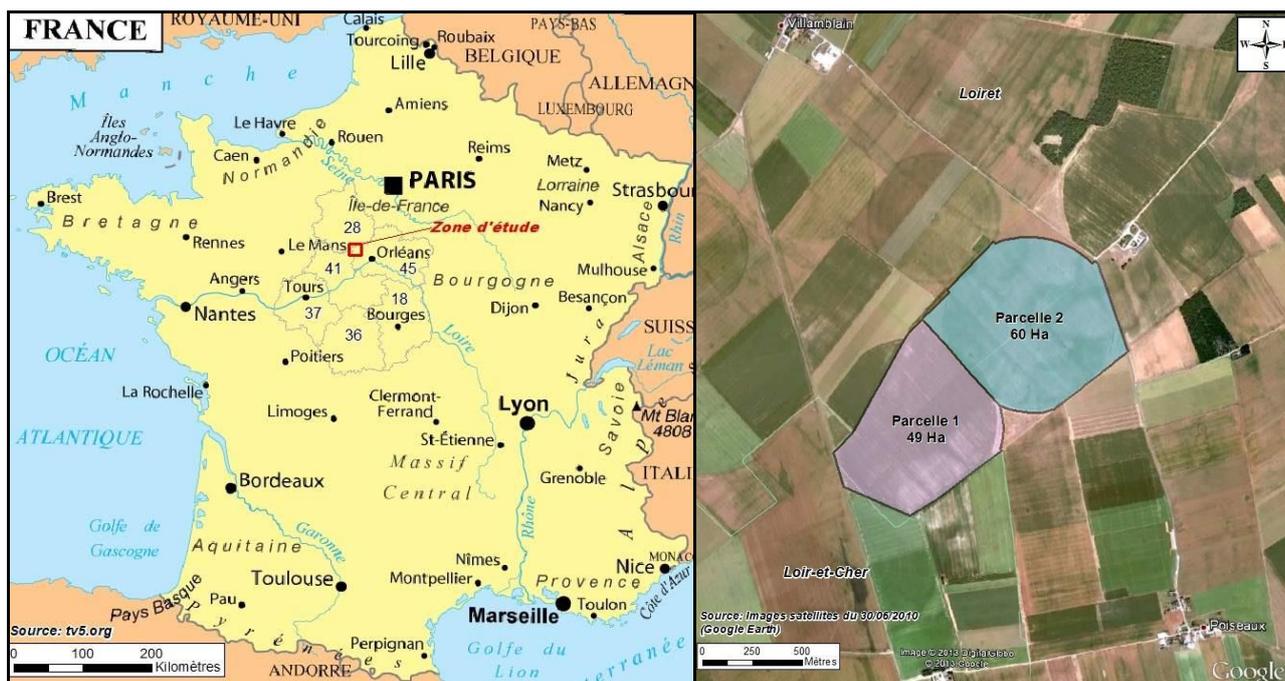
Notre site d'étude est composé de deux parcelles adjacentes de 49 et 60 hectares appartenant à un même agriculteur. On les nomme respectivement parcelle 1 et 2 dans la suite de ce document (Figure1). Les cultures mises en place sont une alternance de blé d'hiver et de maïs. On dispose pour chacune de ces parcelles de mesures de rendements effectués à l'aide de capteurs embarqués sur les machines de récoltes pour 11 années (Tableau 1). Autrement dit, pour chaque année et chaque parcelle, on connaît le rendement de la culture (ramené en quintal par hectare) en de nombreux points de la parcelle.

**Tableau 1 : Récapitulatif des années considérées pour l'analyse des rendements**

parcelle 1	Blé	Maïs	parcelle 2	Blé	Maïs
	1999	1998		1998	1999
2003	2000	2000	2000	2001	2001
2005	2002	2002	2002	2003	2003
2007	2004	2004	2004	2009	2009
2009	2008	2008	2006	2011	2011
	2010	2010	2008		

(a)

(b)



**Figure 1: Localisation du site d'étude en France (a) et délimitation des deux parcelles sur une image satellite (b)**

Concernant la pédologie du site, les types de sols que l'on retrouve sont des calcosols caillouteux (sols peu épais à faibles potentialités agronomiques) et non caillouteux avec des horizons carbonatés dès la surface ainsi que des calcisols (sols épais, développés dans un matériau argilo-limoneux et à fortes potentialités agronomiques) (cf. Annexe 1 - a). En ce qui concerne la topographie, l'altitude varie entre 119 à 126 m avec une pente marquée dans le sens Nord-est à Sud-ouest de 1,1%.

## 2.2 Approches développées

On rappelle que l'objectif du travail dont on rend compte dans ce document est de créer des zones homogènes de rendement puis à explorer les relations qui peuvent exister entre ces dernières et les caractéristiques des sols de la parcelle.

Pour cela, la première approche développée pour une parcelle donnée, que l'on nommera dans la suite de ce document « analyse fréquentielle » (AFQ), consiste à :

1. Interpoler sur une grille régulière (commune pour l'ensemble des années) les enregistrements issus du capteur de rendement. Autrement dit, de transformer l'information ponctuelle en une information continue (de type raster). Cette interpolation suppose l'analyse de la structure spatiale du rendement pour chaque année et la mise en œuvre d'un estimateur du type krigeage afin de cartographier le rendement à partir des mesures ponctuelles enregistrées par le capteur de rendement sur le terrain.
  2. Reclasser chaque carte résultante de l'étape 1 et normalisée par sa moyenne annuelle. Le reclassement consiste à attribuer la classe 0 pour tout rendement négatif (état 0), et la classe 1 à tout rendement positif (état 1). Par conséquent, des cartes (autant de cartes que d'années considérées) de rendement décrivant deux états seront créées.
  3. Déterminer pour chaque maille de la grille régulière, le nombre d'années où le rendement était au-dessus de la moyenne (état 1) sur la période considérée. Ce nombre sera attribué à la maille de la grille finale. Cette dernière sera trop détaillée pour une utilisation pratique dans la gestion des intrants agricoles.
  4. Filtrer la carte issue de l'étape 3 à l'aide d'une fenêtre mobile de  $n \times n$  cellules qui passe sur les centres de toutes les cellules de la grille, et affecte la valeur de la majorité des  $n^2$  cellules à la cellule centrale. La taille de la fenêtre est donnée par la portée du variogramme établi à partir de la carte issue de l'étape 3. Un zonage de la parcelle considérée en unités de gestion potentielle pour la conduite des cultures est obtenu à l'issue de cette étape.
  5. Examiner la pertinence du zonage établi dans l'étape 4 par une confrontation aux cartes des types de sols et de leurs propriétés.
- L'ensemble de ces étapes et les résultats obtenus pour l'AFQ sont détaillés dans la partie 3.1 et 3.2 de ce document.

La deuxième approche développée dans ce document, que l'on nommera « analyse factorielle krigeante » (AFK), consiste pour une parcelle et une culture à :

1. Modéliser l'ensemble des variogrammes expérimentaux directs et croisés, des cartes de rendement obtenues dans l'étape 1 de l'AFQ, par une même combinaison linéaire de fonctions de variogrammes théoriques. Cette dernière est définie dans la littérature (e.g. Wackernagel, 1998 ; Bourennane et al. 2003) sous le nom de 'modèle linéaire de corégionalisation : LMC'. Le LMC comprend  $n$  matrices de variances-covariances

appelées matrices de corégionalisation. Ces matrices décrivent les relations entre les variables considérées pour chaque échelle spatiale définie par les portées des fonctions de variogrammes. Par exemple dans le cas d'un LMC avec un effet de pépite, une structure à courte distance et une structure à longue distance, le LMC comprend 3 matrices de variances-covariances. Ces matrices représentent respectivement, le bruit blanc (l'effet de pépite), les hautes fréquences (structure à courte distance) et les basses fréquences (structure à longue distance). Cette dernière représente, dans notre cas, les structures stables de rendement pour les n années culturales considérées.

2. Conduire une analyse en composante principale (ACP) sur la matrice variance-covariance de la structure de longue distance. Cette ACP permet de déduire spatialement le facteur des basses fréquences (F1-BF) qui explique une part importante de la variance dans le jeu de données. Ce facteur va aussi résumer l'allure et les relations entre l'ensemble des variables considérées (n cartes de rendement dans ce travail).

3. Classer F1-BF en cinq classes.

4. Examiner la pertinence du zonage établi dans l'étape 3 par une confrontation aux cartes des types de sols et de leurs propriétés.

L'ensemble de ces étapes et les résultats obtenus pour l'AFK sont détaillés dans la partie 3.1 et 3.3 de ce document.

### 3. Résultats et discussion

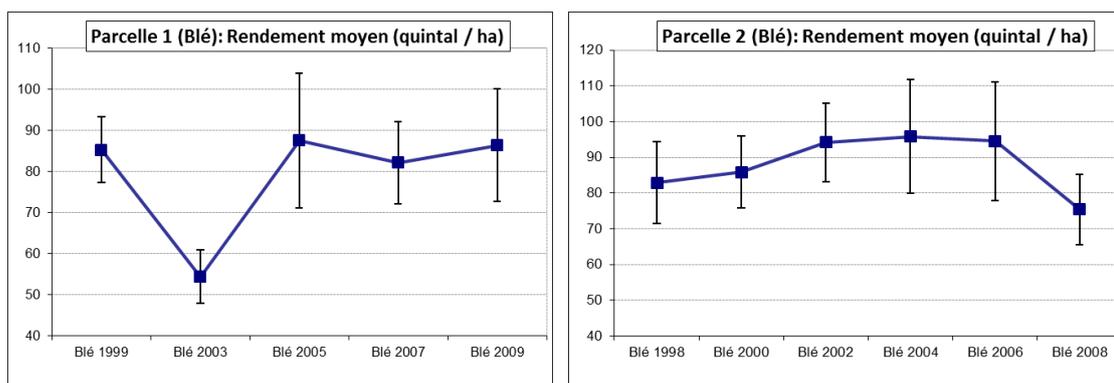
#### 3.1 Prétraitements des rendements de blé

##### 3.1.1 Bornage du rendement

Les données de rendement issues du capteur ont subi un pré-traitement afin d'éliminer toutes les valeurs aberrantes liées à un rendement nul et/ou à un géoréférencement absent ou erroné. Les bornes minimale et maximale retenues pour l'analyse du rendement de blé sont de 20 et 140 quintaux par hectare (q/ha). Le Tableau 2 et la Figure 2 présentent les statistiques descriptives des différentes campagnes d'enregistrement du rendement de blé sur les deux parcelles.

**Tableau 2 : Statistiques descriptives pour le rendement de blé (q/ha) après le bornage**

Parcelle 1 - BLE						
Campagnes de mesure	Nombre enregistrements	Nombre variétés	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Blé 1999	12 553	2	20,3	130,7	85,3	8,1
Blé 2003	14 621	2	20,1	101,8	54,4	6,5
Blé 2005	19 166	1	20,0	140,0	87,6	16,4
Blé 2007	18 697	1	20,0	140,0	82,1	10,1
Blé 2009	16 420	1	20,0	140,0	86,3	13,7
Parcelle 2 - BLE						
Blé 1998	15 750	10	20,0	140,0	82,9	11,5
Blé 2000	45 237	2	20,1	139,7	85,9	10,1
Blé 2002	24 289	1	20,0	140,0	94,2	11,0
Blé 2004	19 978	1	20,0	140,0	95,8	15,9
Blé 2006	21 680	1	20,0	140,0	94,6	16,6
Blé 2008	16 051	1	20,0	138,8	75,5	9,8



**Figure 2: Rendement moyen et intervalle de confiance de la moyenne (q/ha) pour le blé**

Pour la parcelle 1, le rendement moyen du blé se situe à 79 q/ha avec une année de bas rendement pour l'année 2003 (Tableau 2). L'écart type est relativement important pour l'ensemble des campagnes (Figure 2). Les valeurs sont donc très dispersées par rapport à la moyenne. Pour la parcelle 2, le rendement moyen du blé pour les 6 années se situe à 88 q/ha, et on peut constater un rendement globalement meilleur sur cette parcelle par rapport à la parcelle 1.

### 3.1.2 Spatialisation du rendement

#### a. Estimation et ajustement d'un variogramme pour chaque campagne de mesure de rendement de blé

Dans l'optique de la mise en œuvre de la démarche décrite dans le paragraphe 2.2, chaque campagne de mesure de rendement a été interpolée par krigeage ordinaire (KO) sur une grille régulière. Cette grille d'interpolation est la même pour l'ensemble des campagnes de mesure. L'estimation spatiale par krigeage ordinaire du rendement à partir des données de chaque campagne de mesure nécessite l'inférence et la modélisation du variogramme de la variable rendement. Le variogramme expérimental de la variable rendement a donc été estimé et modélisé (Annexe 2, graphique (b) montrant le variogramme expérimental en pointillé vert et l'ajustement par des modèles en rouge) pour chaque campagne de mesure. Les coefficients des fonctions des variogrammes théoriques ajustés aux variogrammes expérimentaux sont présentés dans le Tableau 3.

**Tableau 3 : Pas des variogrammes expérimentaux et coefficients des fonctions de variogrammes théoriques ajustés aux variogrammes expérimentaux pour les deux parcelles d'étude**

Parcelle 1 - BLE					
Campagne de mesure	Pas du variogramme (m)	Effet de pépité (q/ha) <sup>2</sup>	Modèle	Portée (m)	Palier (q/ha) <sup>2</sup>
Blé 1999	12 (55 classes)	34	sphérique	283	20
			sphérique	56	3
			puissance	462	13
Blé 2003	5 (130 classes)	28	sphérique	165	4
			sphérique	14	7
			puissance	283	2
Blé 2005	5 (130 classes)	195	sphérique	6	39
			puissance	645	66
Blé 2007	5 (130 classes)	50	sphérique	6	28
			puissance	371	19
Blé 2009	5 (130 classes)	80	sphérique	12	47
			sphérique	493	68
			puissance	267	3

Parcelle 2 - BLE					
Campagne de mesure	Pas du variogramme (m)	Effet de pépité (q/ha) <sup>2</sup>	Modèle	Portée (m)	Palier (q/ha) <sup>2</sup>
Blé 1998	15 (40 classes)	65	sphérique	292	24
			sphérique	18	16
Blé 2000	10 (60 classes)	55	sphérique	19	24
			sphérique	301	26
Blé 2002	5 (120 classes)	59	sphérique	7	38
			puissance	547	29
Blé 2004	5 (120 classes)	188	sphérique	10	21
			puissance	466	53
Blé 2006	5 (120 classes)	197	sphérique	9	18
			puissance	356	55
Blé 2008	5 (120 classes)	61	sphérique	259	15
			sphérique	27	14
			puissance	440	14

Quelle que soit la parcelle, les variogrammes présentent un fort effet pépité. Ce dernier traduit l'existence de fortes dissemblances à très courtes distances. Ces dissemblances sont probablement liées à des erreurs d'enregistrement par le capteur de rendement. En tout cas, ces dissemblances à courtes distances sont difficilement attribuables à une structure spatiale inférieure au pas d'échantillonnage étant donné l'exhaustivité des données.

Pour la parcelle 1, les variogrammes croient sans cesse au-delà d'une distance de l'ordre de 250m. Ceci suggère l'existence d'une dérive qui implique la mise en œuvre d'un estimateur spécifique (krigeage universel) lors de l'interpolation. Cela étant, en interpolant en voisinage glissant sur des distances réduites, la stationnarité de la fonction aléatoire qui modélise la variable d'intérêt est vérifiée localement. On peut ainsi utiliser le KO pour l'interpolation sur une grille régulière. On constate le même phénomène au niveau de la parcelle 2, à l'exception des rendements en 1998 et 2000 qui présentent des variogrammes bornés.

### b. Interpolation du rendement de blé par krigeage ordinaire

En utilisant le système d'équations de KO et les fonctions de variogrammes théoriques, le rendement du blé, pour chaque campagne de mesure, est estimé aux nœuds d'une grille tous les 2.5 m en voisinage glissant. L'Annexe 2 (c) et le Tableau 4 montrent les résultats de ces interpolations. Nous remarquons que le rendement moyen estimé est similaire au rendement moyen mesuré par les capteurs (Tableau 2) quelles que soient la parcelle et la campagne de mesure considérées. En revanche, les valeurs extrêmes mesurées ne sont pas toujours reproduites lors de l'interpolation. Ceci est particulièrement dû à l'existence d'un effet de pépite et d'un effet de lissage propre à la forme de l'estimateur lui-même dans le cas du KO.

**Tableau 4 : Statistiques descriptives pour le rendement de blé (q/ha) après krigeage**

Parcelle 1 - BLE						
Campagne de mesure	Nombre points	Nombre variétés	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
<b>Blé 1999</b>	78 080	2	49,7	110,5	85,2	5,7
<b>Blé 2003</b>	78 080	2	20,7	101,6	54,1	3,9
<b>Blé 2005</b>	78 080	1	22,0	140,0	87,5	8,9
<b>Blé 2007</b>	78 080	1	21,5	132,9	81,8	6,4
<b>Blé 2009</b>	78 080	1	20,0	139,7	86,1	9,9
Parcelle 2 - BLE						
<b>Blé 1998</b>	96 799	10	31,7	134,3	83,1	8,2
<b>Blé 2000</b>	96 799	2	20,1	137,9	85,3	7,1
<b>Blé 2002</b>	96 786	1	20,8	140,0	94,2	7,2
<b>Blé 2004</b>	96 781	1	26,6	140,0	95,4	8,9
<b>Blé 2006</b>	96 799	1	20,0	140,0	92,7	10,9
<b>Blé 2008</b>	96 799	1	20,0	134,9	75,5	7,5

## 3.2 Détermination de zones de rendement homogènes par analyse fréquentielle (AFQ)

### 3.2.1 Réalisation de l'AFQ sur la grille régulière

Les cartes obtenues dans le paragraphe précédent sont reclassées en attribuant la classe 0 pour tout rendement inférieur à la moyenne (Figure 3, zones blanches), et 1 à tout rendement supérieur ou égal à la moyenne (Figure 3, zones noires).

Avec une seule variété, la moyenne utilisée est celle de la parcelle. A contrario, s'il existe plusieurs variétés, c'est la moyenne pour chaque variété qui est considérée pour la surface sur laquelle elle a été semée.

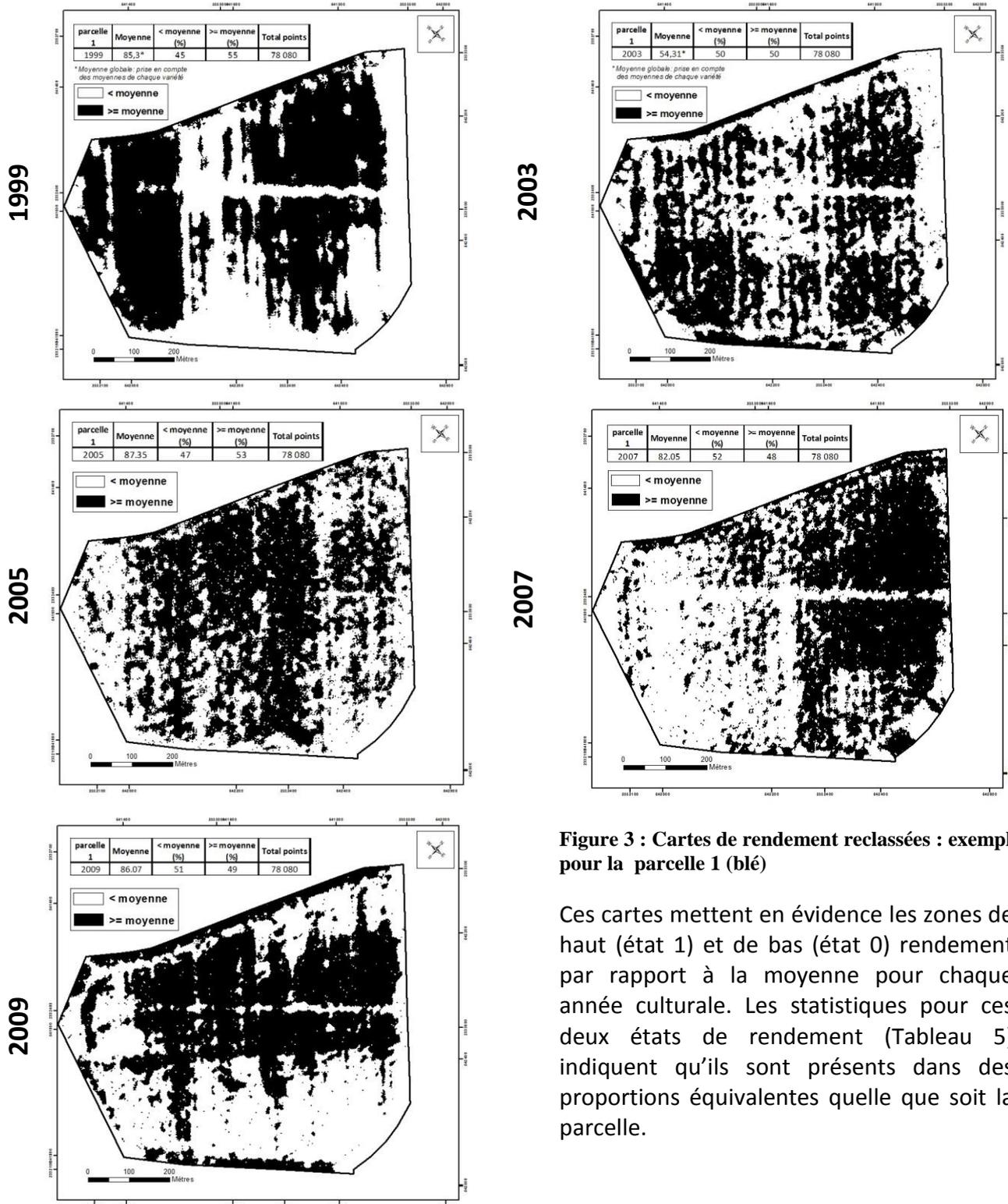


Figure 3 : Cartes de rendement reclassées : exemple pour la parcelle 1 (blé)

Ces cartes mettent en évidence les zones de haut (état 1) et de bas (état 0) rendement par rapport à la moyenne pour chaque année culturale. Les statistiques pour ces deux états de rendement (Tableau 5) indiquent qu'ils sont présents dans des proportions équivalentes quelle que soit la parcelle.

Toutefois, on peut constater que les pourcentages de l'état 0 croient au cours des années culturales dans la parcelle 1. Cette augmentation de l'état 0 atteint une amplitude de 7% de la surface de la parcelle 1 sur la période considérée.

Tableau 5 : Proportions (%) de points à l'état 0 et à l'état 1 des cartes de rendement reclassées

parcelle 1 Blé	< moyenne (% points)	>= moyenne (% points)	Total points	parcelle 2 Blé	< moyenne (% points)	>= moyenne (% points)	Total points
1999	45	55	78 080	1998	47	53	96 799
2003	50	50	78 080	2000	53	47	96 799
2005	47	53	78 080	2002	47	53	96 786
2007	52	48	78 080	2004	47	53	96 781
2009	51	49	78 080	2006	52	48	96 799
				2008	44	56	96 799

Pour chaque maille de la grille, on détermine ensuite le nombre d'années où le rendement était au-dessus de la moyenne (état 1). Pour chaque parcelle, on obtient ainsi une carte représentant le nombre d'années sur la période considérée, où le rendement est au-dessus de la moyenne.

Les résultats de l'AFQ conduite sur les cartes de rendement reclassées sont présentés dans la Figure 4. Les parcelles 1 et 2 présentent respectivement six et sept zones de rendement. Pour la parcelle 1, la classe 0 montre les zones où l'état 1 (rendement au-dessus de la moyenne de la parcelle) n'a jamais eu lieu. Cette classe signifie aussi que ces zones produisent de façon cohérente des rendements inférieurs à la moyenne de la parcelle. Les classes de fréquence de rendement 1, 2, 3 et 4 représentent les zones où l'état 1 a été rencontré 1, 2, 3, et 4 années sur 5. Les secteurs représentés par la classe 5 de fréquence de rendement ont des rendements au-dessus du rendement moyen de la parcelle sur toute la période considérée. Cette classe signifie aussi que ces zones produisent de façon cohérente des rendements supérieurs à la moyenne de la parcelle. Ainsi, les secteurs représentés par les classes de fréquence 0 et 5 constituent les secteurs avec des rendements stables dans le temps. Les secteurs de classe de fréquence 0 constituent les secteurs avec des rendements bas et stables dans le temps (BSDT) tandis que les secteurs de classe de fréquence 5 constituent les secteurs avec des rendements élevés et stables dans le temps (ESDT). Pour la parcelle 2, le même diagnostic peut-être conduit pour 6 années culturales.

(a)

(b)

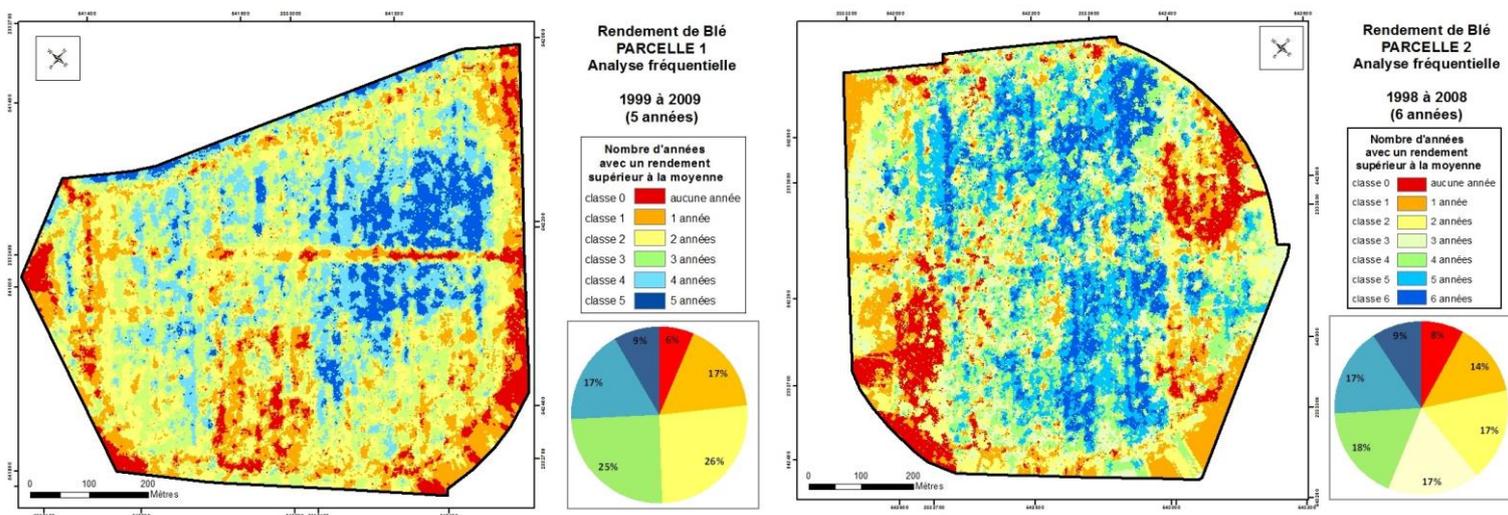


Figure 4: Répartition spatiale du nombre d'années (sur 5 et 6 années, respectivement pour la parcelle 1 et la parcelle 2) pour un état de rendement du blé au-dessus de la moyenne de la parcelle

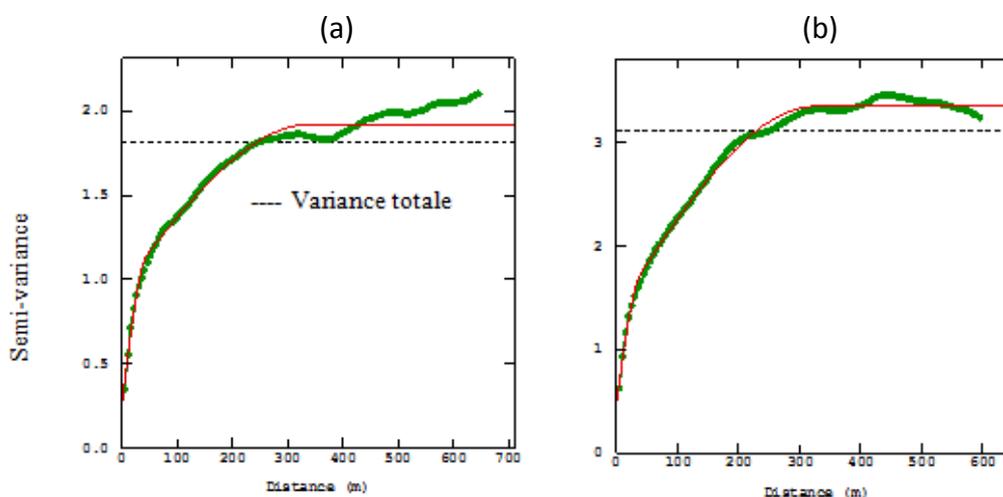
La moyenne du rendement par classe (Tableau 6) indique bien des rendements moyens croissants de la classe 0 à la classe 5 ou 6. Par ailleurs, la parcelle 2 affiche toujours de meilleurs rendements comparés à la parcelle 1, de 87 q/ha à 78 q/ha en moyenne respectivement. Ainsi, la classe 0 de la parcelle 2 a un rendement moyen comparable à la classe 3 de la parcelle 1.

**Tableau 6: Moyenne du rendement par zone établie issue de l'analyse fréquentielle**

Classes	Nombre points	%	Rendement moyen (q/ha)	Classes	Nombre points	%	Rendement moyen (q/ha)
<b>Parcelle 1 - Blé</b>				<b>Parcelle 2 - Blé</b>			
classe 0	4 969	6	70	classe 0	7 676	8	80
classe 1	13 185	17	75	classe 1	13 333	14	82
classe 2	20 474	26	78	classe 2	16 752	17	85
classe 3	19 336	25	80	classe 3	16 648	17	88
classe 4	13 526	17	83	classe 4	17 214	18	90
classe 5	6 590	8	85	classe 5	16 130	17	92
<b>Total</b>	<b>78 080</b>	<b>100</b>	<b>78</b>	classe 6	9 028	9	94
				<b>Total</b>	<b>96 781</b>	<b>100</b>	<b>87</b>

### 3.2.2 Approche géostatistique pour un zonage de la parcelle en unités de gestion potentielle pour la conduite des cultures

Sur chacune des deux parcelles, nous disposons à ce stade d'une carte qui montre le nombre d'années, sur la période considérée, où le rendement du blé est au-dessus de la moyenne au sein d'un pixel de 2,5m. Ces cartes (Figure 4) sont trop détaillées pour une utilisation pratique dans la conduite des cultures. Pour pallier à ce défaut, nous avons utilisé une méthode de lissage qui s'appuie sur les variogrammes de ces cartes. Ces derniers (Figure 5) révèlent des portées de 45m et 40m respectivement pour la parcelle 1 et la parcelle 2. Ces distances indiquent la corrélation spatiale entre les données. Elles ont donc permis de définir la taille d'une fenêtre mobile de  $n \times n$  cellules qui passe sur les centres de toutes les cellules de la grille, et affecte la valeur de la majorité des  $n^2$  cellules à la cellule centrale. Dans ce travail, la fenêtre retenue est un cercle dont le rayon est donné par la portée du variogramme de la carte cible. Ce travail de lissage permet d'obtenir des zones homogènes relativement étendues qui pourraient donc faire l'objet de gestions différenciées de la part de l'agriculteur (Figure 6).



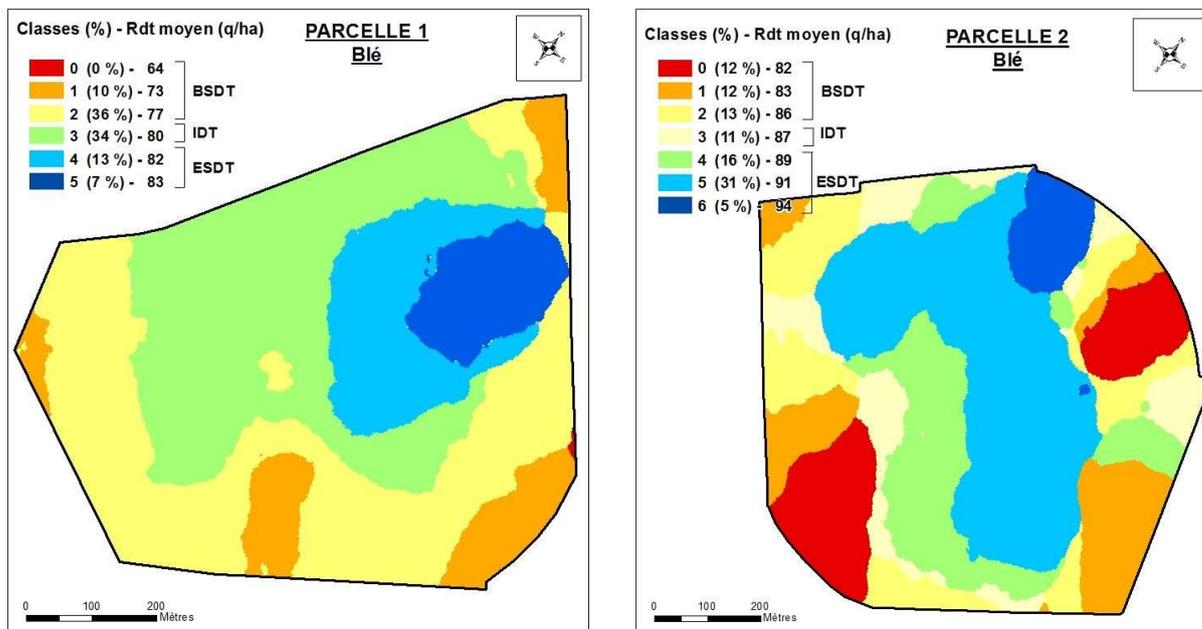
**Figure 5: Variogrammes expérimentaux (les points) et modèles ajustés (les courbes) pour la variable nombre d'années avec le rendement du blé supérieur à la moyenne pour la parcelle 1 (a) et pour la parcelle 2 (b)**

La comparaison des valeurs moyennes (ANOVA : analyse de la variance, test de Tukey) de rendement au niveau des zones déterminées montre que le rendement moyen en zones 5 et 4 de la parcelle 1 sont similaires (Tableau 7). Ce résultat signifie que les zones 5 et 4 dans la parcelle 1 peuvent être regroupées. En revanche, les autres zones présentent des rendements moyens significativement différents, on peut donc les considérer comme des zones différenciées. Pour la parcelle 2, les résultats de l'ANOVA révèlent des zones bien différenciées.

**Tableau 7: Analyse des différences de rendement entre les modalités (ANOVA, test de Tukey avec un intervalle de confiance à 95%)**

Modalité	Moyenne estimée (q/ha)	Groupes – Parcelle 1 (Blé)				
5	82.6	A				
4	82.5	A				
3	80.4	B				
2	77.3	C				
1	72.7	D				
0	63.6	E				

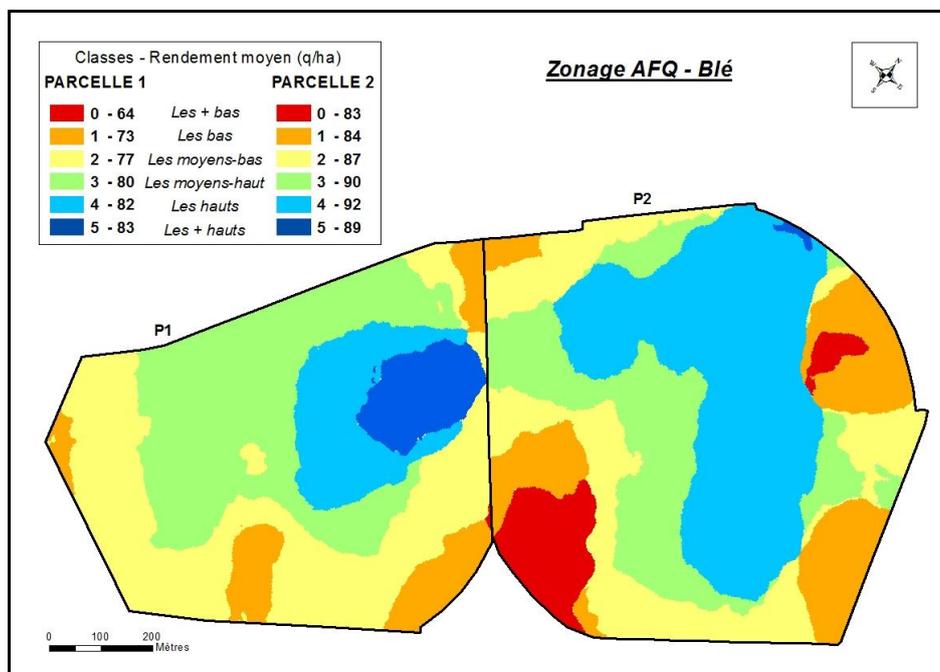
Modalité	Moyenne estimée (q/ha)	Groupes – Parcelle 2 (Blé)						
6	93.7	A						
5	91.2	B						
4	88.7	C						
3	87.1	D						
2	85.7	E						
1	83.2	F						
0	82.0	G						



**Figure 6: Inférence d'unités de gestion potentielle pour la conduite des cultures sur la base des portées des variogrammes de la répartition spatiale du nombre d'années pour un état de rendement du blé au-dessus de la moyenne de la parcelle.**

Sur la base de ces résultats et pour la parcelle 1, on peut dire que les zones représentées par les classes de fréquences 4 et 5 constituent les secteurs avec des rendements élevés et stables dans le temps (ESDT). Elles représentent 20% de la surface totale de la parcelle 1 (Figure 6). On peut aussi faire l'approximation que les zones représentées par les classes de fréquences 0, 1 et 2 (46% de la surface totale de la parcelle 1) constituent les secteurs avec des rendements les plus bas et stables dans le temps (BSDT). Enfin, la zone représentée par la classe de fréquence 3 (34% de la surface totale de la parcelle 1) constitue les secteurs avec des rendements instables dans le temps (IDT). Pour la parcelle 2, ces proportions sont respectivement égales à 52%, 37% et 11%.

La comparaison des cartes obtenues sur les deux parcelles serait plus facile si elles présentaient un même nombre de classe. Aussi, nous avons fait le choix d'ignorer l'année 1998 des analyses pour la parcelle 2 pour réduire le nombre de classes à 6 comme dans le cas de la parcelle 1. Ce choix est en plus motivé par le fait que le capteur de rendement en 1998 est d'une génération différente de celle des années suivantes. En supprimant cette année, la portée du variogramme pour la parcelle 2 passe à 47m. La Figure 7 montre les résultats de ce filtrage sur la base de considérations géostatistiques et permet de comparer les deux parcelles ensemble.

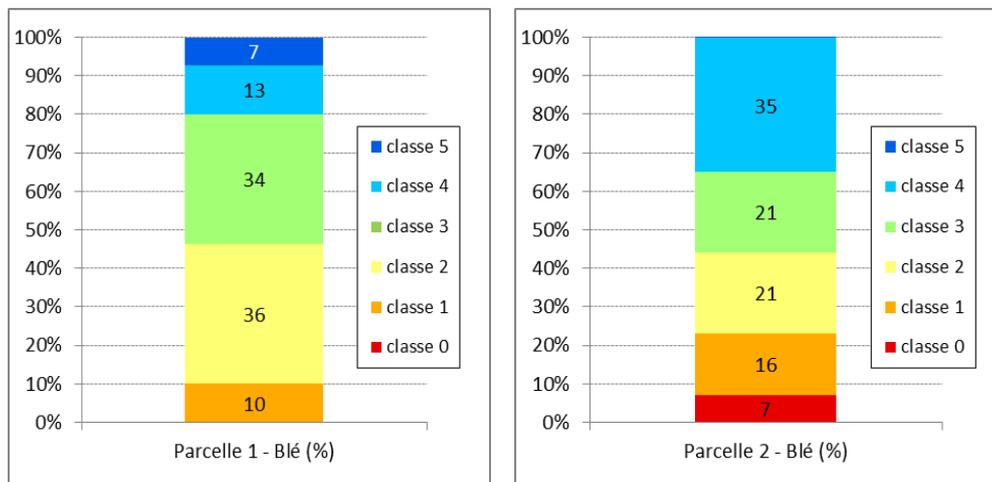


**Figure 7: Comparaison des unités de gestion potentielle pour la conduite des cultures sur les parcelles pour un même nombre d'années culturales**

Avant d'effectuer des comparaisons inter-parcellaires, il est important de préciser que les rendements moyens estimés pour une classe donnée sont différents de la parcelle 1 à la parcelle 2. Le plus haut rendement de la parcelle 1 (classe 5) équivaut au plus bas rendement de la parcelle 2 (classe 0). Ces différences peuvent s'expliquer par des conditions climatiques et/ou des itinéraires techniques différents en fonction de l'année et donc de la parcelle. Ces cartes ne permettent donc pas de juger des valeurs agronomiques des deux parcelles. On peut toutefois comparer, la répartition des différentes zones. Dans les deux cas, on note que les hauts à moyen-haut rendement regroupant les classes 3 à 5 sont localisés au centre des parcelles. A l'inverse, les plus bas à moyen-bas rendements, regroupant les classes 0 à 2 se retrouvent sur les bords

des parcelles. Par ailleurs, on constate une quasi-continuité des zones au niveau de la limite séparant les deux parcelles.

On pourrait donc penser que certaines caractéristiques environnementales continues entre les deux parcelles influencent la répartition des rendements. La suite de ce travail a eu pour but de tester cette hypothèse en considérant les caractéristiques des sols comme variable environnementale influençant potentiellement le rendement.



**Figure 8: Histogramme cumulé montrant les proportions des classes au sein des deux parcelles**

La Figure 8, qui représente la proportion de chaque classe au sein des parcelles, permet de se rendre compte que certaines classes représentent des superficies négligeables dont on pourra ne pas tenir compte dans les analyses à venir. En effet, pour la parcelle 1, la classe 0 représente moins de 1% de sa surface et pour la parcelle 2, le même cas se présente pour la classe 5.

### 3.2.3 Variation des propriétés du sol en fonction du zonage établi

Nous proposons ici de comparer la répartition des types de sols sur la parcelle à celle des zones établies précédemment. Pour cela, nous disposons d’une carte des sols établit à l’échelle de la parcelle par l’unité science du sol de l’INRA d’Orléans. Dans un premier temps, la typologie de la carte des types de sols (Annexe 1, a et colonne 1 du Tableau 8) a été simplifiée de façon à aboutir au regroupement indiqué dans la colonne 2 du Tableau 8 et la carte de la Figure 9.

**Tableau 8: Typologie de la carte des sols des deux parcelles d’étude et sa simplification en 3 types de sols**

Type sol	Type de sol regroupé
CALCISOLS développés sur matériau cryoturbé beige et gris	<b>CALCISOLS</b>
CALCISOLS développés sur matériau cryoturbé beige moyennement profond	
CALCISOLS développés sur matériau cryoturbé beige peu profond	
CALCOSOLS caillouteux développés sur calcaire dur	<b>CALCOSOLS caillouteux</b>
CALCOSOLS caillouteux développés sur calcaire gris	
CALCOSOLS caillouteux développés sur calcaire tendre	
CALCOSOLS développés sur calcaire dur	<b>CALCOSOLS non caillouteux</b>
CALCOSOLS développés sur calcaire gris	
CALCOSOLS développés sur calcaire tendre	
CALCOSOLS développés sur matériau cryoturbé beige	
CALCOSOLS développés sur matériau cryoturbé beige et gris	

Ainsi, on constate (Figure 9 et Figure 10) que les calcosols non caillouteux couvrent 48% de la surface de la parcelle 1 et 55% de la surface de la parcelle 2. Le reste de la surface est occupé de façon quasi-équivalente par les calcisols et les calcosols caillouteux et ceci quelle que soit la parcelle considérée.

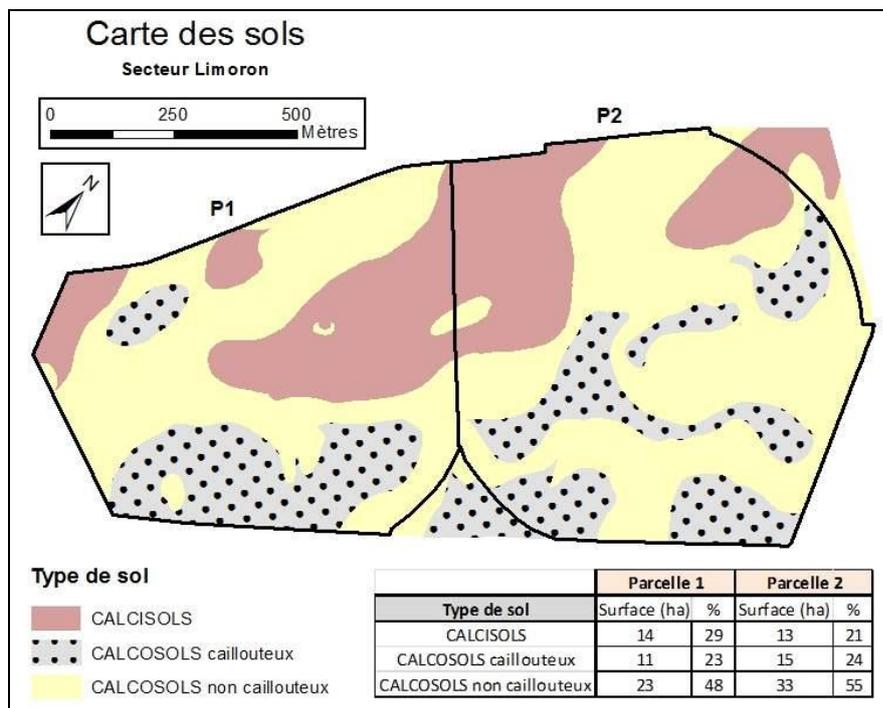


Figure 9 : Carte des sols simplifiée

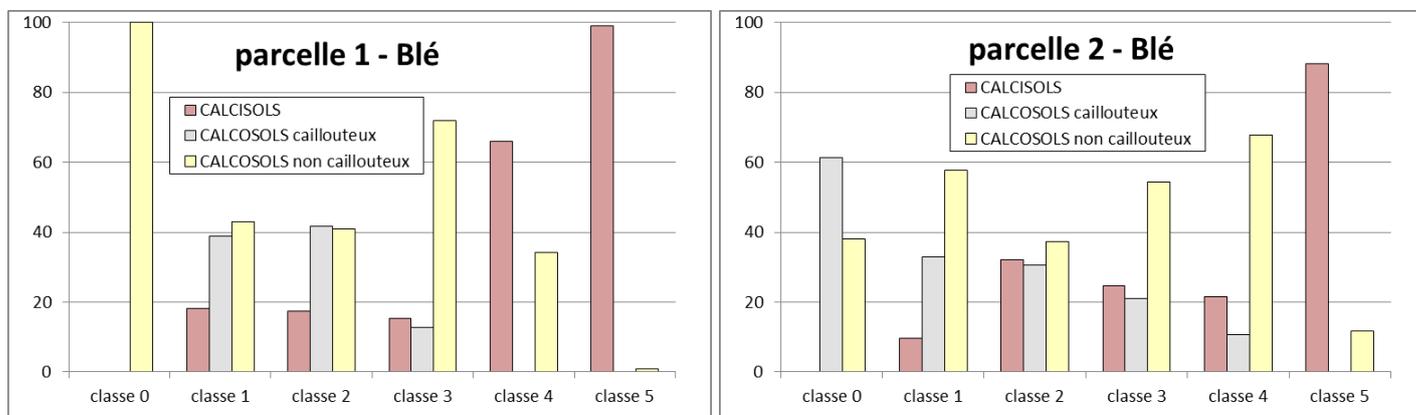


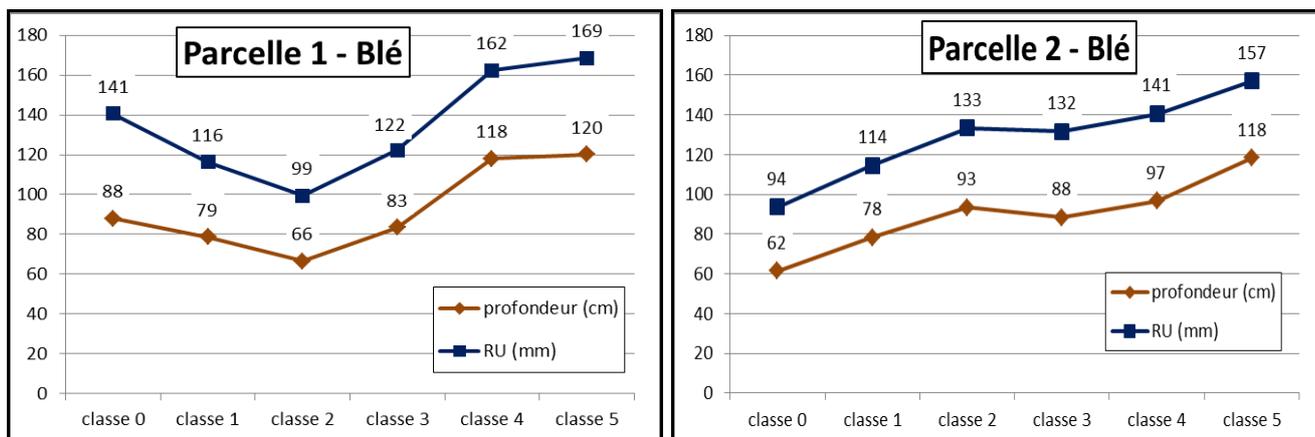
Figure 10 : Proportion (%) des grands types de sols en fonction du zonage

On constate que les rendements les plus hauts et stables dans le temps, représentés par les classes 5 et 4, se trouvent uniquement sur des calcisols et des calcosols non caillouteux (Figure 10 et Annexe 3, a) pour la parcelle 1. Pour la parcelle 2, 90% de la surface occupée par les zones 5 et 4 correspondent à ces types de sols.

Concernant les rendements les plus bas et stables dans le temps représentés par les classes 0, 1 et 2, on remarque que ces rendements sont concomitants des calcosols caillouteux ou non pour au moins 82% et 68% de leurs surfaces, respectivement pour la parcelle 1 et la parcelle 2. La classe 3, représentant les secteurs avec des rendements instables dans le temps, révèle (Figure 10) une moindre présence des sols caillouteux. En effet, les calcisols et les calcosols non caillouteux constituent 87% et 79% de la surface de cette classe, respectivement pour la parcelle 1 et la parcelle 2.

Par ailleurs, à chaque unité cartographique de la carte des sols, correspond plusieurs unités typologiques de sol pour lesquels une épaisseur de sol et une réserve utile sont fournies. Il est donc possible de calculer une valeur moyenne de ces deux paramètres pour chaque unité cartographique et de comparer leurs répartitions à celle des zones de rendement. Ainsi, la Figure 11 montre la variation de l'épaisseur moyenne du sol et de sa réserve utile (RU) moyenne en fonction du zonage établi. Les valeurs moyennes présentées dans cette figure sont des moyennes pondérées par la proportion des types de sol au sein de chaque classe.

Pour la parcelle 2, la RU moyenne ainsi que l'épaisseur moyenne croient en fonction du zonage établi. Ainsi, les classes représentant les secteurs avec les rendements les plus élevés et stables dans le temps, exhibent les RU et les épaisseurs moyennes les plus élevées et inversement pour les classes représentant les rendements les plus bas et stables dans le temps. Pour la parcelle 1, on retrouve la même tendance à partir de la classe 2. Les valeurs de la RU moyenne et de l'épaisseur moyenne de la classe 1 ne sont pas en adéquation avec les rendements moyens estimés dans les zones de cette classe. Quant à la classe 0, elle peut être ignorée étant donné que sa surface est très réduite. Signalons aussi que quelle que soit la parcelle, Les valeurs de la RU moyenne et de l'épaisseur moyenne des différentes classes sont statistiquement différentes à l'exception des épaisseurs moyennes des classes 0, 1 et 3 de la parcelle 1. On peut ainsi dire que le zonage établi à partir de l'analyse des cartes de rendement est assez cohérent avec la variation de deux propriétés des sols au sein de ces mêmes zones.



**Figure 11 : Epaisseur moyenne et réserve utile (RU) moyenne des sols en fonction du zonage établi : moyennes pondérées par la proportion des types de sol au sein de chaque classe**

### 3.2.4 Application de l'AFQ à la culture de maïs sur les deux parcelles

L'approche de zonage mises en œuvre pour le blé a été appliquée sur une autre culture implantée sur ces mêmes parcelles : le maïs. A l'instar du blé, les données du maïs (Tableau 9) issues des capteurs de rendement ont été bornées entre 30 et 140 q/ha. Le Tableau 9 indique que le rendement moyen sur les périodes considérées est de 107 q/ha et 110 q/ha, respectivement pour la parcelle 1 et la parcelle 2.

**Tableau 9: Statistiques descriptives pour le rendement de maïs (q/ha) après le bornage**

Campagne de mesure	Nombre enregistrements	Nombre variétés	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
<b>Parcelle 1 - MAIS</b>						
<b>Mais 1998</b>	17 244	4	30	140	103,0	13,8
<b>Mais 2000</b>	22 931	3	30	140	119,0	11,4
<b>Mais 2002</b>	20 366	1	30	140	104,9	19,3
<b>Mais 2004</b>	18 546	1	30	140	99,0	17,7
<b>Mais 2008</b>	20 171	1	30	140	104,4	18,5
<b>Mais 2010</b>	20 516	1	30	140	110,3	16,1
<b>Moyenne</b>					<b>106,7</b>	
<b>Parcelle 2 - MAIS</b>						
<b>Mais 1999</b>	65 100	5	30	140	117,3	15,2
<b>Mais 2001</b>	23 126	1	30	140	100,6	12,8
<b>Mais 2003</b>	27 685	1	30	140	118,1	15,0
<b>Mais 2009</b>	24 302	1	30	140	107,1	27,3
<b>Mais 2011</b>	22 918	1	30	140	106,3	11,2
<b>Moyenne</b>					<b>109,8</b>	

Les données du maïs ont été spatialisées par krigeage ordinaire sur une grille régulière. Les cartes résultantes se trouvent en Annexe 2 et les variogrammes nécessaires à ces interpolations sont présentés au niveau du Tableau 10.

**Tableau 10 : Pas des variogrammes expérimentaux et coefficients des fonctions de variogrammes théoriques ajustés aux variogrammes expérimentaux pour les deux parcelles d'étude (cas du maïs)**

Campagne de mesure	Pas du Variogramme (m)	Effet de pépité (q/ha) <sup>2</sup>	Modèle	Portée (m)	Palier (q/ha) <sup>2</sup>
<b>Parcelle 1- MAIS</b>					
<b>Mais 1998</b>	12 (55 classes)	89	sphérique sphérique	109 586	21 109
<b>Mais 2000</b>	5 (130 classes)	49	sphérique puissance	85 645	46 69
<b>Mais 2002</b>	7,5 (90 classes)	136	sphérique sphérique puissance	225 26 494	62 111 111
<b>Mais 2004</b>	5 (130 classes)	88	sphérique sphérique puissance	261 29 509	87 79 100
<b>Mais 2008</b>	5 (130 classes)	92	sphérique sphérique puissance	160 24 579	93 62 192
<b>Mais 2010</b>	5 (130 classes)	112	sphérique puissance	38 526	73 111

Parcelle 2- MAIS					
Mais 1999	5 (120 classes)	42	sphérique	22	54
			sphérique	190	71
			puissance	522	105
Mais 2001	7,5 (90 classes)	51	sphérique	64	75
			puissance	559	56
Mais 2003	5 (120 classes)	81	sphérique	94	33
			sphérique	237	43
			puissance	552	105
Mais 2009	5 (120 classes)	84	sphérique	18	36
			sphérique	123	70
			puissance	559	199
Mais 2011	5 (120 classes)	82	sphérique	13	19
			puissance	406	27

Quelle que soit la parcelle, les variogrammes du rendement du maïs présentent des effets de pépites moins importants que ceux observés dans les données de rendement de blé. La dissemblance est donc moins importante à courtes distances dans les données de rendement de maïs. En revanche, les variogrammes ne sont pas bornés. Ils sont croissants sans cesse au-delà d’une distance de l’ordre de 250m comme pour les variogrammes du rendement de blé.

Les résultats de l’analyse fréquentielle (cf paragraphe 3.2 pour plus de détails) conduite sur les cartes de rendement interpolées et reclassées sont présentés dans la Figure 12 et le Tableau 11. Sept et six zones de rendement sont ainsi obtenues respectivement pour la parcelle 1 et la parcelle 2. Les rendements moyens par classe ainsi définis sont en adéquation avec la définition sous-jacente à la classe. Le Tableau 11 montre aussi que les zones avec des rendements supérieurs à la moyenne sont plus fréquentes dans le cas du maïs par comparaison au blé. Ceci est probablement lié à l’irrigation qui n’est pas pratiquée de façon systématique dans le cas de la culture de blé dans notre contexte d’étude.

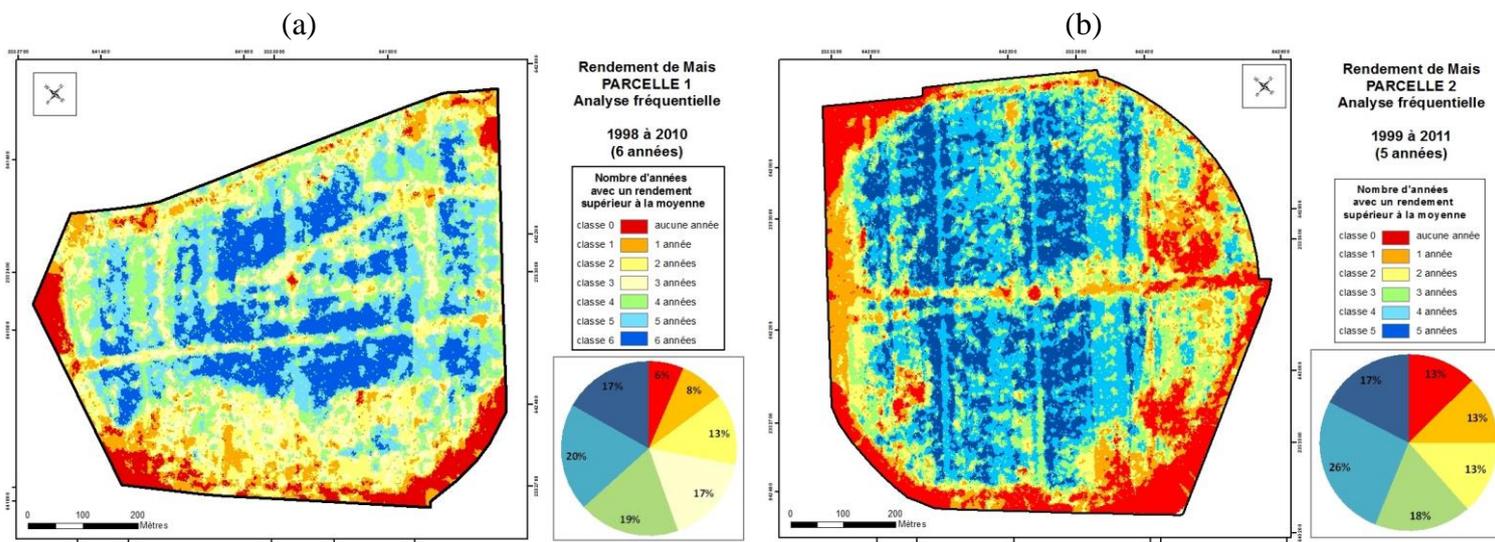


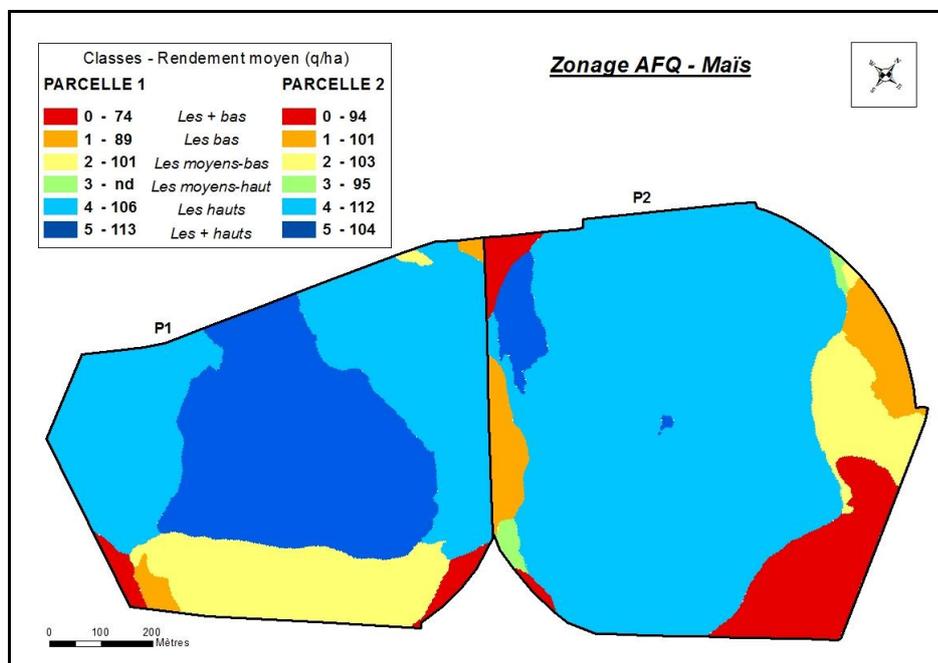
Figure 12 : Répartition spatiale du nombre d’années (sur 6 et 5 années, respectivement pour la parcelle 1 et la parcelle 2) pour un état de rendement du maïs au-dessus de la moyenne de la parcelle

Les cartes (Figure 12), tout comme pour le blé, sont lissées à l'aide du filtre dit géostatistique présenté dans le paragraphe 3.2.2. De plus, par souci d'uniformité, l'année 1998 est également retirée des analyses pour la parcelle 1 afin de pouvoir obtenir 6 classes pour chacune des deux parcelles. Quant aux portées des variogrammes estimés à partir des données présentées en Figure 12, elles sont de 71m et 76m, respectivement pour la parcelle 1 et la parcelle 2.

**Tableau 11: Moyenne du rendement du maïs par zone établie par analyse fréquentielle**

Classes	Nombre points	%	Rendement moyen (q/ha)	Classes	Nombre points	%	Rendement moyen (q/ha)
<b>Parcelle 1- Maïs</b>				<b>Parcelle 2- Maïs</b>			
classe 0	5 015	6	78	classe 0	12 159	13	89
classe 1	6 544	8	96	classe 1	12 088	13	101
classe 2	10 280	13	102	classe 2	13 030	13	107
classe 3	12 998	17	105	classe 3	17 040	18	111
classe 4	14 569	19	109	classe 4	25 586	26	115
classe 5	15 586	20	112	classe 5	16 880	17	118
classe 6	13 088	17	116	<b>Total</b>	<b>96 783</b>	<b>100</b>	<b>107</b>
<b>Total</b>	<b>78 080</b>	<b>100</b>	<b>103</b>				

Ces distances ont servi à définir la taille d'une fenêtre mobile de n x n cellules qui passe sur les centres de toutes les cellules des cartes cibles, et affecte la valeur de la majorité des n<sup>2</sup> cellules à la cellule centrale. Le résultat de cette étape est présenté par la Figure 13 et la Figure 14.



**Figure 13 : Comparaison des unités de gestion potentielle pour la conduite des cultures sur les parcelles pour un même nombre d'années culturales pour le maïs**

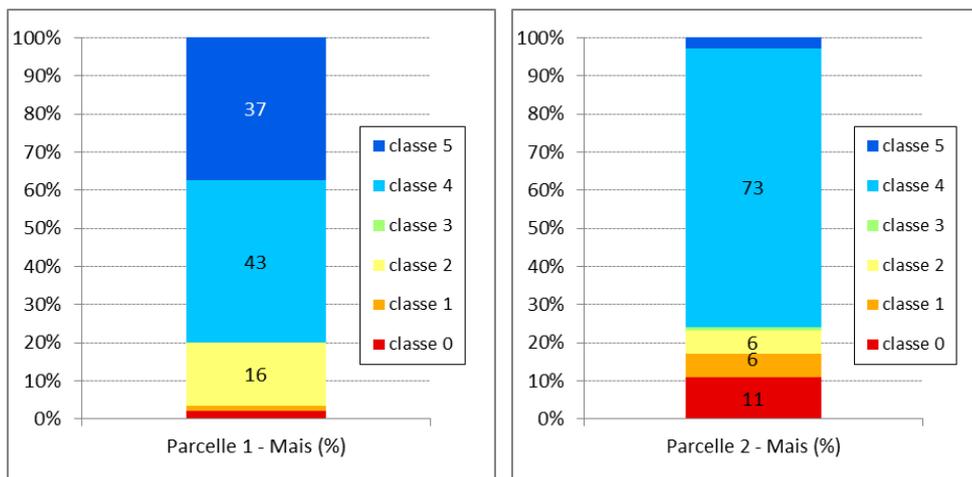


Figure 14: Histogramme cumulé montrant les proportions des classes au sein des deux parcelles pour le maïs

On remarque (Figure 13) que, les zones définies par les classes 4 et 5 sont très étendues. En effet, elles représentent 80% de la surface de la parcelle 1 et 76% de celle de la parcelle 2. Il faut noter que le maïs est une culture systématiquement irriguée, contrairement au blé, ce qui explique probablement la dominance des classes à plus haut rendement. En considérant la carte des sols (cf. Annexe 1, a), il est difficile d’identifier des liens évidents entre le zonage établi et les types de sols. Toutefois, on peut constater par exemple qu’au niveau de la parcelle 2, la classe des très hauts rendements (classe 5) est composée à 94% de calcisols. Toutefois, cette classe ne représente que 3% de la surface de la parcelle 2 (Figure 14). Pour la parcelle 1, les classes 0 et 1 peuvent également être négligées dans l’interprétation des données car elles ne représentent que 4% de la surface de cette parcelle.

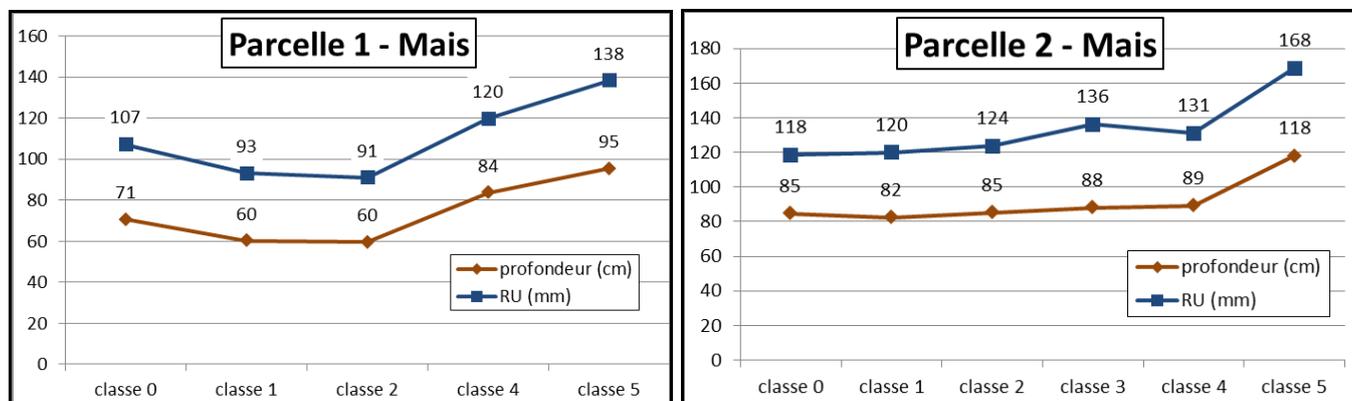


Figure 15 : Epaisseur moyenne et réserve utile (RU) moyenne des sols en fonction du zonage établi : moyennes pondérées par la proportion des types de sol au sein de chaque classe pour le maïs

La Figure 15 montre la variation de l’épaisseur du sol moyenne et de sa réserve utile (RU) moyenne en fonction du zonage établi. Les valeurs moyennes présentées dans cette figure ont été pondérées par la proportion des types de sol au sein de chaque classe.

Pour la parcelle 1, et en ignorant les classes 0 et 1 qui représentent que 4% de la surface de la parcelle 1, on constate (Figure 15) que le zonage établi à partir de l’analyse des cartes de rendement est très cohérent avec la variation de deux propriétés des sols considérées au sein de ces mêmes zones.

Pour la parcelle 2 et en ignorant les classes 5 et 3 qui représentent que 4% de la surface de la parcelle 2, on constate que la RU moyenne est en adéquation avec le rendement

moyen de la zone considérée. On signale aussi que les RU moyennes des classes 0 et 1 sont statistiquement similaires. Pour l'épaisseur moyenne, le lien n'est pas évident avec les rendements moyens même en ignorant les classes ayant des surfaces réduites (les classes 5 et 3)

On peut ainsi dire que l'approche de zonage mise en œuvre dans ce travail est en adéquation avec les connaissances pédologiques antérieures. Elle semble toutefois moins appropriée dans le cas d'une culture systématiquement irriguée pour laquelle le zonage établi est d'avantage influencé par la méthode d'irrigation que par les sols et leurs propriétés.

### 3.2.5 Adéquation entre les zonages en fonction de la culture

L'examen de l'adéquation des zonages sur une parcelle donnée en fonction du type de culture révèle que pour la parcelle 1, il y a seulement 17% d'adéquation (Figure 16) entre le zonage du blé et le zonage du maïs. Pour la parcelle 2, ce taux monte à 41%.

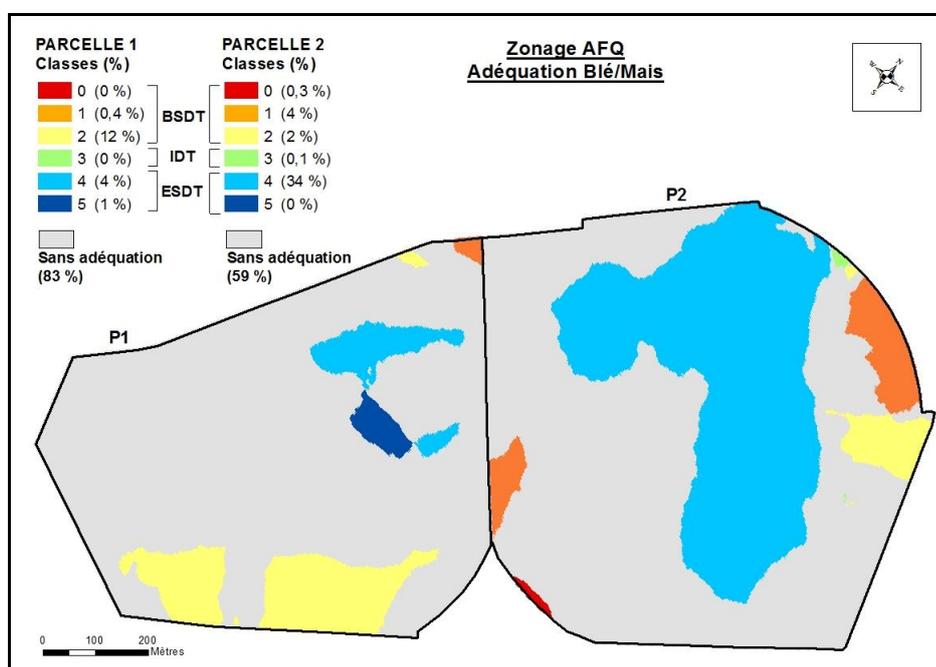
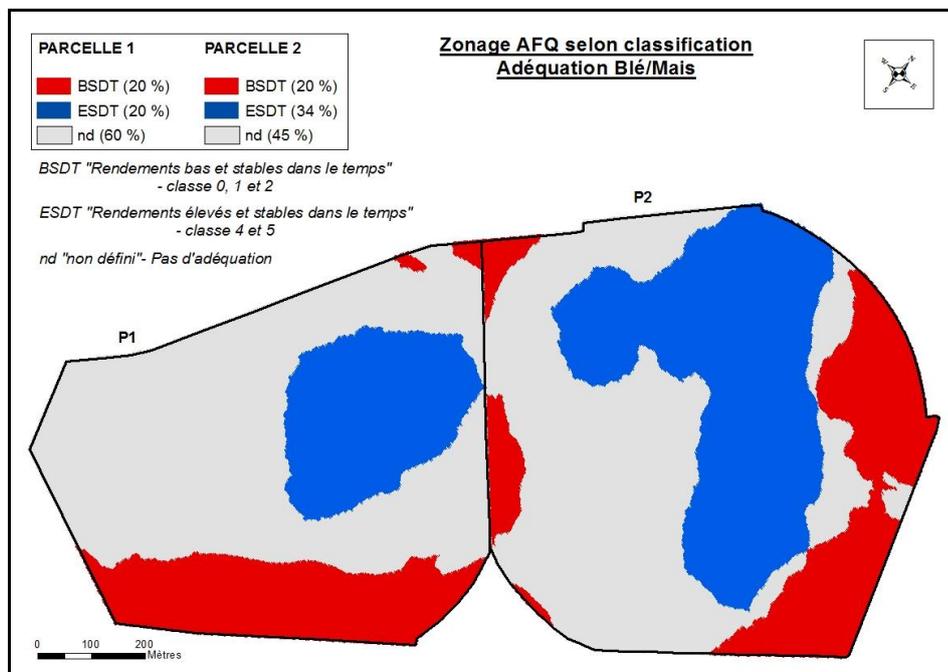


Figure 16 : Correspondance du zonage entre le blé et le maïs

Les correspondances entre les classes des deux types de cultures sont faibles, un essai avec un regroupement selon la classification développée dans le paragraphe 3.2.2 est réalisée, les résultats de ces correspondances sont les suivants (Figure 17) :



**Figure 17 : Correspondance avec la classification entre le blé et le maïs**

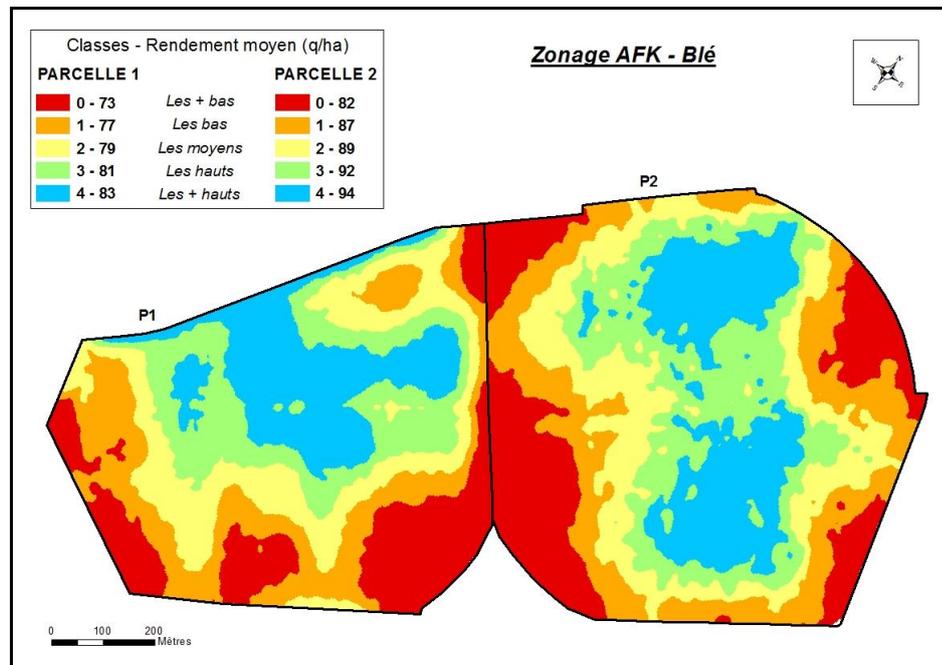
En considérant les secteurs avec des classes fréquences 0, 1 et 2 comme étant des secteurs avec des rendements bas et stables dans le temps (BSDT) tandis que les secteurs de classe de fréquence 4 ou 5 constituent les secteurs avec des rendements élevés et stables dans le temps (ESDT), l'adéquation des zonages sur une parcelle donnée entre le blé et le maïs représente 40% et 55 % (Figure 17) respectivement, pour la parcelle 1 et la parcelle 2.

### 3.3 Détermination des zones de rendement homogènes par analyse factorielle krigéante (AFK)

#### 3.3.1 Application de l'AFK sur les cartes de rendement

Les variogrammes directs et croisés sont estimés à partir des cartes de rendement du blé obtenues par KO sur une grille régulière (cf paragraphe 3.1.2 (b)). Ces variogrammes suggèrent la présence de quatre structures quelle que soit la parcelle. Ainsi un modèle linéaire de corégionalisation (LMC) composé d'un effet de pépité (S0), de deux modèles sphériques (S1 et S2) et d'un modèle puissance (S3) non borné a été ajusté à l'ensemble des 5 variogrammes directs (5 cartes de rendement de blé considérées par parcelle) et 10 variogrammes croisés estimés pour chaque parcelle.

Les analyses en composantes principales (ACP) conduites sur les matrices variances-covariances (S0, S1, S2 et S3) qui composent le LMC de chaque parcelle révèle que le premier facteur (F1) de l'ACP sur S2 de chacune des deux parcelles explique 84% et 82% de la variance du rendement du blé, respectivement pour la parcelle 1 et la parcelle 2. Ainsi, F1 a été spatialement déduit, pour chaque parcelle, à partir d'une combinaison linéaire des vecteurs propres des 5 cartes de rendement du blé. Les valeurs négatives de F1 indiquent les rendements les plus bas et inversement pour les valeurs positives. Finalement pour chaque parcelle, F1 a été reclassée (Figure 18) en 5 classes équiprobables : deux classes pour les valeurs négatives de F1, deux autres pour les valeurs positives et une dernière classe autour de la valeur centrale.

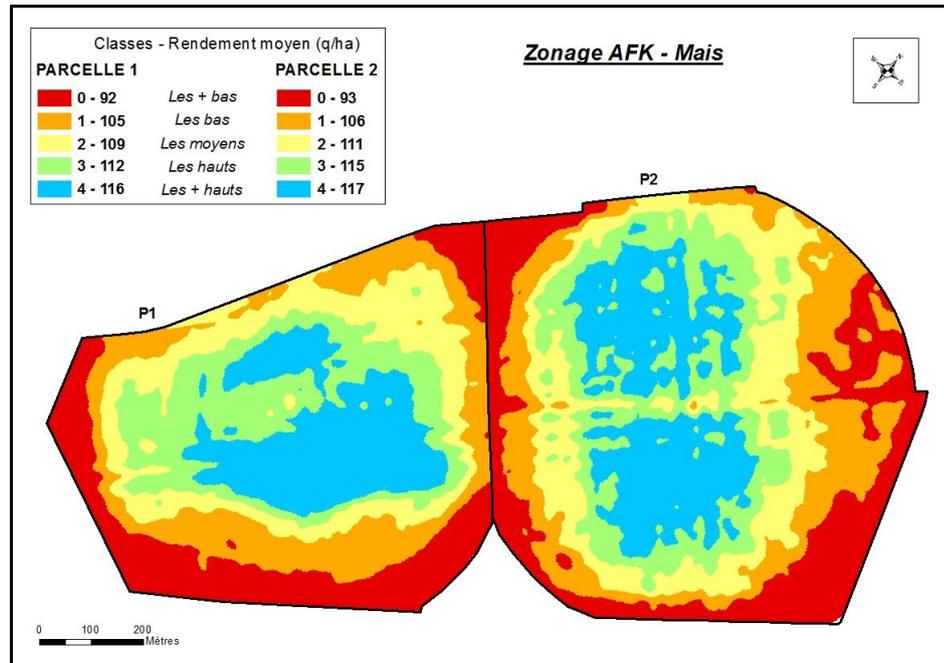


**Figure 18: Unités de gestion potentielle pour la conduite des cultures selon l'approche développée par l'analyse factorielle krigéante (AFK) appliquée sur le blé**

Pour le maïs, les variogrammes directs et croisés suggèrent la présence de trois structures quelle que soit la parcelle. Le meilleur modèle linéaire de corégionalisation (LMC), au sens des moindres carrés, est composé d'un effet de pépité ( $S_0$ ) et de deux modèles sphériques ( $S_1$  et  $S_2$ ). Ce modèle a donc été ajusté à l'ensemble des 5 variogrammes directs (5 cartes de rendement de maïs considérées par parcelle) et 10 variogrammes croisés estimés pour chaque parcelle.

Les analyses en composantes principales (ACP) conduites sur les matrices variances-covariances ( $S_0$ ,  $S_1$  et  $S_2$ ) qui composent le LMC de chaque parcelle révèle que le premier facteur ( $F_1$ ) de l'ACP sur  $S_2$  de chacune des deux parcelles explique 78% et 93% de la variance du rendement du maïs, respectivement pour la parcelle 1 et la parcelle 2. Ainsi,  $F_1$  a été spatialement déduit, pour chaque parcelle, à partir d'une combinaison linéaire des vecteurs propres des 5 cartes de rendement du maïs. Les valeurs négatives de  $F_1$  indiquent les rendements les plus bas et inversement pour les valeurs positives. Pour chaque parcelle,  $F_1$  a été finalement reclassée (Figure 19) en 5 classes équiprobables comme dans le cas du blé.

On signale aussi que quelles que soient la parcelle et la culture, les rendements moyens, au niveau des zones déterminées par l'AFK, sont statistiquement bien différenciées. Ces rendements moyens sont croissants de la classe 0 à la classe 4 comme prévu par les résultats de l'AFK.



**Figure 19: Unités de gestion potentielle pour la conduite des cultures selon l'approche développée par l'analyse factorielle krigée (AFK) appliquée sur le maïs**

### 3.3.2 Adéquation entre les zonages en fonction de la culture

Pour une série de cartes de rendement, l'interprétation des résultats de l'AFK permet de considérer que quelles que soient la culture et la parcelle, les scores négatifs de l'AFK représentés par les classes 0 et 1 constituent les zones avec les rendements les plus bas et stables dans le temps (BSDT). Inversement, les scores positifs de l'AFK représentés par les classes 3 et 4 constituent les zones avec les rendements les plus élevés et stables dans le temps (ESDT). Quant à la classe intermédiaire (la classe 2) entre les BSDT et les ESDT, elle représente les zones instables dans le temps (IDT).

La figure 20 résume le résultat des correspondances des zonages établis pour le blé et le maïs au niveau de chaque parcelle par AFK. On constate que les correspondances entre le blé et le maïs sont respectivement de 55% et 65% pour la parcelle 1 et la parcelle 2.

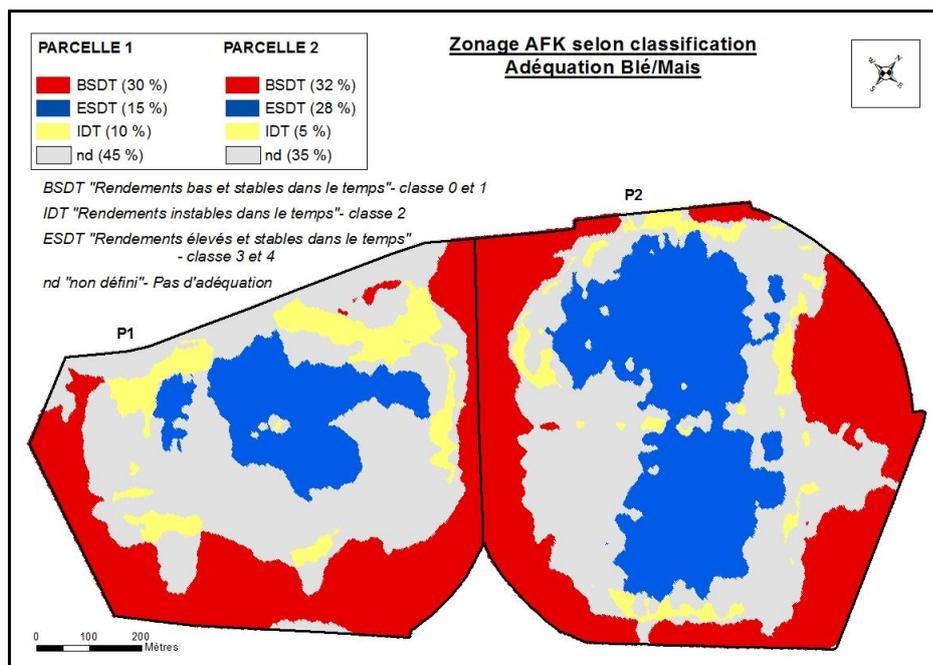


Figure 20 : Correspondance du zonage AFK entre le blé et le maïs

Avec le regroupement de classes, les correspondances entre le blé et le maïs sont de 55% et 65% pour la parcelle 1 et 2. A la différence de l'AFQ (figure 17), des correspondances ont été trouvées au niveau des IDT « rendements dits instables dans le temps » définis par la classe 2 de l'AFK. Les secteurs « BSDT » regroupant les classes de fréquence 0 et 1 sont bien identifiées et montrent une bonne correspondance entre le zonage du blé et du maïs sur les deux parcelles.

### 3.3.3 Variation des propriétés du sol en fonction du zonage établi pour le blé et le maïs

Les variations de l'épaisseur moyenne du sol et de sa réserve utile (RU) sont examinées en fonction du zonage défini par l'AFK. Les valeurs moyennes de l'épaisseur du sol et de sa RU sont pondérées par la proportion des types de sol au sein de chaque classe. Pour la parcelle 1, la figure 21 montre que la RU moyenne ainsi que l'épaisseur moyenne croient en fonction du zonage établi. Ceci est particulièrement vrai si on fait l'approximation que l'épaisseur moyenne et la RU moyenne des classes 0 et 1 sont similaires d'un point de vue agronomique. Ainsi, la classe 4 représentant les secteurs avec les rendements les plus élevés exhibe les RU et les épaisseurs moyennes les plus élevées et inversement pour les classes 0 et 1 représentant les rendements les plus bas. Pour la parcelle 2, on retrouve la tendance croissante de la RU et de l'épaisseur moyennes en fonction du zonage établi. Contrairement à ce que l'on peut postuler au vu de la figure 21 (parcelle 2), les classes sont statistiquement bien différenciées.

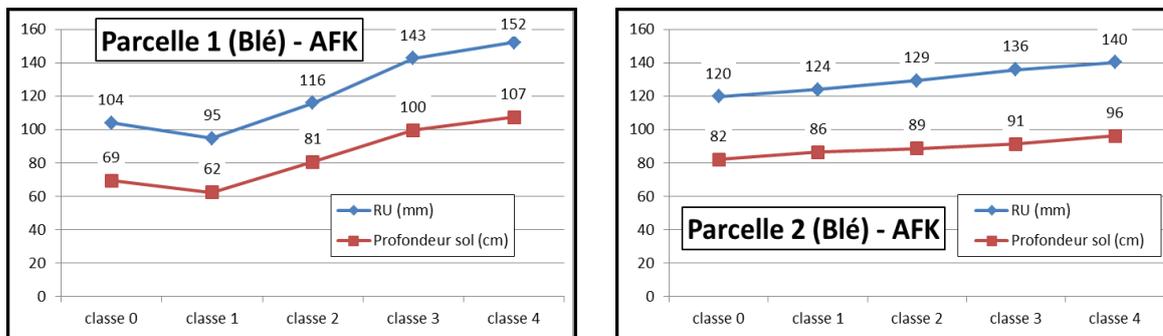


Figure 21: Epaisseur moyenne et réserve utile (RU) moyenne des sols en fonction du zonage établi par l'AFK pour le blé : moyennes pondérées par la proportion des types de sol au sein de chaque classe

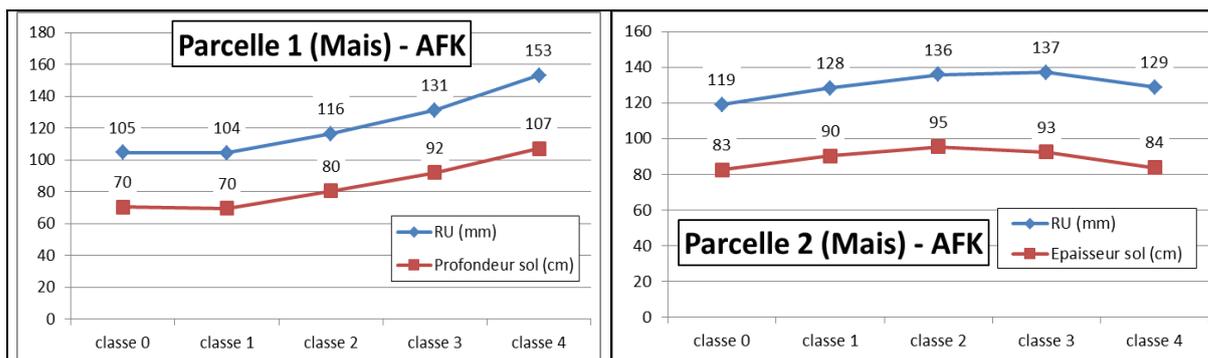


Figure 22: Epaisseur moyenne et réserve utile (RU) moyenne des sols en fonction du zonage établi par l'AFK pour le maïs : moyennes pondérées par la proportion des types de sol au sein de chaque classe

Pour le maïs (Figure 22), les classes 0 et 1 présentent des valeurs moyennes d'épaisseur et de RU statistiquement similaires au niveau de la parcelle 1 contrairement aux rendements moyens. Les autres classes sont statistiquement bien différenciées au regard du rendement moyen et des propriétés des sols considérées.

Concernant la RU moyenne par classe, on constate que les classes 2 et 3 d'une part, et les classes 1 et 4 d'autre part sont statistiquement similaires. La similitude entre les RU de ces deux dernières classes n'est pas cohérente vis-à-vis des rendements moyens estimés. Quant à l'épaisseur du sol, elle présente des épaisseurs moyennes statistiquement différentes en fonction des classes identifiées, toutefois ces épaisseurs moyennes ne semblent pas en adéquation avec les rendements moyens estimés.

#### 4. Conclusion et perspectives

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire avait pour objectif de définir dans un premier temps des zones de rendements homogènes sur la base d'une analyse de cartes de rendement accumulées sur une exploitation pendant plusieurs années. Dans un deuxième temps, ce zonage devait être confronté avec certaines variables permanentes du sol. Pour se faire, nous disposions sur deux parcelles adjacentes :

- d'une cartographie intra-parcellaire des sols
- de mesures de rendements du blé et du maïs effectuées à l'aide de capteurs embarqués sur les machines de récoltes pour 11 années.

Le zonage à partir des mesures de rendements a été réalisé selon deux approches très différentes.

Une première approche basée sur une analyse fréquentielle que nous avons appelé AFQ dans ce mémoire, et une seconde approche basée sur une analyse géostatistique multivariable connue sous le nom d'analyse factorielle krigée (AFK). Dans les deux cas, notre travail a permis d'aboutir à la création de cartes présentant des zones pour lesquelles les rendements moyens sur la chronique considérée sont statistiquement différents.

Toutefois, les deux approches présentent plusieurs différences. Tout d'abord, dans le cas de l'AFQ le nombre d'années considérées conditionne le nombre de zones pour une parcelle et une culture qui est a priori égal au nombre d'années considérées plus un (donc six et sept zones dans cette étude selon la parcelle considérée). En revanche, dans le cas de l'AFK on aboutit à cinq zones homogènes équiprobables quels que soient la culture et le nombre d'années considérées. Par ailleurs, les résultats montrent que le zonage par l'AFK paraît mieux approprié dans le cas d'une culture systématiquement irriguée pour laquelle le zonage établi par l'AFQ est d'avantage influencé par la méthode d'irrigation. En effet dans le cas du maïs qui est systématiquement irrigué dans notre contexte d'étude, les zones avec des rendements fréquemment au-dessus de la moyenne de la parcelle sont très étendues dans le cas de l'AFQ. En résumé, le zonage selon l'approche AFK semble plus générique. Il demeure néanmoins moins facile à mettre en œuvre comparativement à l'approche par AFQ qui est plus intuitive.

Pour aller plus loin dans les méthodes permettant la réalisation de zones de rendement homogènes on pourrait envisager de réaliser un zonage unique multiculture pour une parcelle. Dans notre cas cela revient à réaliser une AFK en considérant toute la rotation culturale sur plusieurs années au sein d'une parcelle. Par ailleurs, on pourrait comparer d'autres méthodes géostatistiques, par exemple, la mise en place d'une analyse de la tendance spatio-temporelle du rendement, largement développée dans la littérature, qui permet de bien cibler la variance temporelle.

Nous avons aussi montré dans ce travail que les zones établies par les deux approches sont en adéquation avec les connaissances pédologiques antérieures à savoir le type de sol, son épaisseur et sa réserve utile potentielle. Pour aller plus loin, on pourrait confronter d'autres facteurs pédologiques au zonage comme le taux de calcaire ou d'éléments grossiers. Quoiqu'il en soit, ce travail montre déjà que les méthodes d'analyse de cartes de rendement pluriannuelles employées permettent de lier des variations intra-parcellaires de rendements à des facteurs pérennes influençant les cultures (tels que certaines propriétés des sols). Par conséquent, en perspective de ce travail, il serait intéressant d'examiner les possibilités d'utilisation des cartes de zones de rendement homogènes :

- dans le cadre d'études pédologiques sur des parcelles où il n'existe pas d'information a priori. On pourrait par exemple limiter le nombre de sondages en ciblant l'échantillonnage sur ces zones différenciées.
- en appui au diagnostic agricole par ces cartes en mettant en avant l'influence des paramètres pérennes sur les cultures.
- pour la mise en place d'itinéraires techniques modulables pour une conduite des cultures. Par exemple, la réalisation d'une carte de la réserve utile à partir de ce zonage pourrait permettre de réaliser une irrigation différenciée.

Dans la continuité du stage, plusieurs de ces pistes de réflexions seront développées dans le cadre du projet Aquateam.

## Bibliographie

- Basso B., Bertocco M., Sartori L., Martin E.C., 2007. **Analyzing the effects of climate variability on spatial pattern of yield in a maize–wheat–soybean rotation.** European Journal of Agronomy 26, 82–91.
- Blackmore S., 2000. **The interpretation of trends from multiple yield maps.** Computer and Electronics in Agriculture 26, 37–51.
- Bocchi S., Castrignano A., 2007. **Identification of different potential production areas for corn in Italy through multitemporal yield map analysis.** Field Crops Research 102, 185–197.
- Bourennane H., Nicoullaud B., Couturier A., King D., 2004. **Exploring the spatial relationships between some soil properties and wheat yields in two soil types.** Precision Agriculture 5, 521-536.
- Diker K., Heermann D. F., Brodahl M. K., 2004. **Frequency analysis of yield for delineating yield response zones.** Precision Agriculture, 5, 435–444.
- Florin M.J., McBratney A.B., Whelan B.M., 2009. **Quantification and comparison of wheat yield variation across space and time.** European Journal of Agronomy 30, 212–219.
- Guastaferro F., Castrignanò A., De Benedetto D., Sollitto D., Troccoli A., Cafarelli B., 2010. **A comparison of different algorithms for the delineation of management zones.** Precision Agriculture 11, Issue 6, 600-620.
- Michot D., 2003. **Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intraparcellaire.** Thèse INRA, Cnes, Université Paris 6.
- Wackernagel H., 1998. **Multivariate Geostatistics.** Springer, Berlin

## Liste des figures et tableaux

### FIGURES

<b>Figure 1</b> : Localisation du site d'étude en France (a) et délimitation des deux parcelles sur une image satellite (b).....	7
<b>Figure 2</b> : Rendement moyen et intervalle de confiance de la moyenne (q/ha) pour le blé .....	10
<b>Figure 3</b> : Cartes de rendement reclassées : exemple pour la parcelle 1 (blé).....	13
<b>Figure 4</b> : Répartition spatiale du nombre d'années (sur 5 et 6 années, respectivement pour la parcelle 1 et la parcelle 2) pour un état de rendement du blé au-dessus de la moyenne de la parcelle .....	14
<b>Figure 5</b> : Variogrammes expérimentaux (les points) et modèles ajustés (les courbes) pour la variable nombre d'années avec le rendement du blé supérieur à la moyenne pour la parcelle 1 (a) et pour la parcelle 2 (b) .....	15
<b>Figure 6</b> : Inférence d'unités de gestion potentielle pour la conduite des cultures sur la base des portées des variogrammes de la répartition spatiale du nombre d'années pour un état de rendement du blé au-dessus de la moyenne de la parcelle.....	16
<b>Figure 7</b> : Comparaison des unités de gestion potentielle pour la conduite des cultures sur les parcelles pour un même nombre d'années culturales.....	17
<b>Figure 8</b> : Histogramme cumulé montrant les proportions des classes au sein des deux parcelles .....	18
<b>Figure 9</b> : Carte des sols simplifiée.....	19
<b>Figure 10</b> : Proportion (%) des grands types de sols en fonction du zonage .....	19
<b>Figure 11</b> : Epaisseur moyenne et réserve utile (RU) moyenne des sols en fonction du zonage établi : moyennes pondérées par la proportion des types de sol au sein de chaque classe.....	20
<b>Figure 12</b> : Répartition spatiale du nombre d'années (sur 6 et 5 années, respectivement pour la parcelle 1 et la parcelle 2) pour un état de rendement du maïs au-dessus de la moyenne de la parcelle .....	22
<b>Figure 13</b> : Comparaison des unités de gestion potentielle pour la conduite des cultures sur les parcelles pour un même nombre d'années culturales pour le maïs .....	23
<b>Figure 14</b> : Histogramme cumulé montrant les proportions des classes au sein des deux parcelles pour le maïs .....	24
<b>Figure 15</b> : Epaisseur moyenne et réserve utile (RU) moyenne des sols en fonction du zonage établi : moyennes pondérées par la proportion des types de sol au sein de chaque classe pour le maïs .....	24

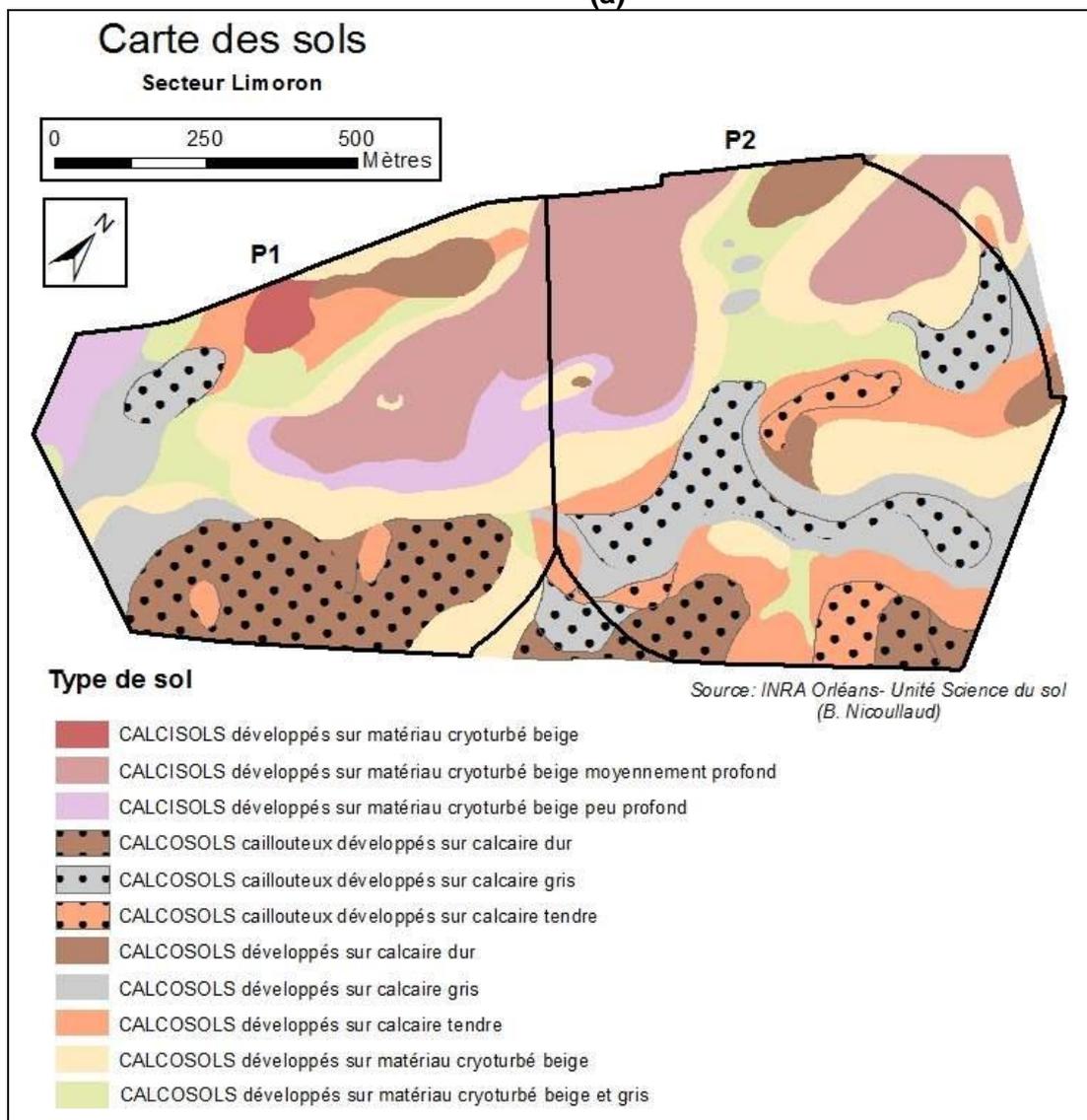
<b>Figure 16</b> : Correspondance du zonage entre le blé et le maïs.....	25
<b>Figure 17</b> : Correspondance avec la classification entre le blé et le maïs.....	26
<b>Figure 18</b> : Unités de gestion potentielle pour la conduite des cultures selon l'approche développée par l'analyse factorielle krigéante (AFK) appliquée sur le blé.....	27
<b>Figure 19</b> : Unités de gestion potentielle pour la conduite des cultures selon l'approche développée par l'analyse factorielle krigéante (AFK) appliquée sur le maïs .....	28
<b>Figure 20</b> : Correspondance du zonage AFK entre le blé et le maïs.....	29
<b>Figure 21</b> : Epaisseur moyenne et réserve utile (RU) moyenne des sols en fonction du zonage établi par l'AFK pour le blé : moyennes pondérées par la proportion des types de sol au sein de chaque classe .....	30
<b>Figure 22</b> : Epaisseur moyenne et réserve utile (RU) moyenne des sols en fonction du zonage établi par l'AFK pour le maïs : moyennes pondérées par la proportion des types de sol au sein de chaque classe .....	30

<b>TABLEAUX</b>
-----------------

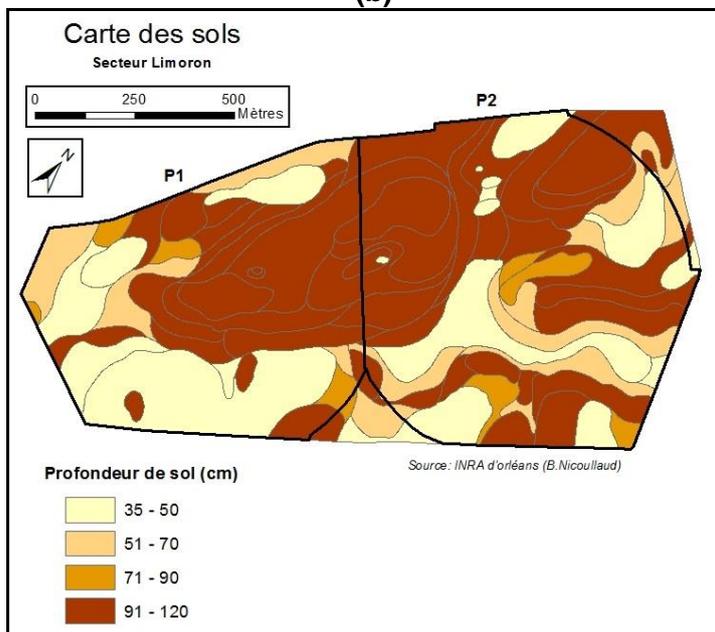
<b>Tableau 1</b> : Récapitulatif des années considérées pour l'analyse des rendements .....	7
<b>Tableau 2</b> : Statistiques descriptives pour le rendement de blé (q/ha) après le bornage ....	9
<b>Tableau 3</b> : Pas des variogrammes expérimentaux et coefficients des fonctions de variogrammes théoriques ajustés aux variogrammes expérimentaux pour les deux parcelles d'étude .....	11
<b>Tableau 4</b> : Statistiques descriptives pour le rendement de blé (q/ha) après krigeage .....	12
<b>Tableau 5</b> : Proportions (%) de points à l'état 0 et à l'état 1 des cartes de rendement reclassées .....	14
<b>Tableau 6</b> : Moyenne du rendement par zone établie issue de l'analyse fréquentielle.....	15
<b>Tableau 7</b> : Analyse des différences de rendement entre les modalités (ANOVA, test de Tukey avec un intervalle de confiance à 95%) .....	16
<b>Tableau 8</b> : Typologie de la carte des sols des deux parcelles d'étude et sa simplification en 3 types de sols .....	18
<b>Tableau 9</b> : Statistiques descriptives pour le rendement de maïs (q/ha) après le bornage	21
<b>Tableau 10</b> : Pas des variogrammes expérimentaux et coefficients des fonctions de variogrammes théoriques ajustés aux variogrammes expérimentaux pour les deux parcelles d'étude (cas du maïs).....	21
<b>Tableau 11</b> : Moyenne du rendement du maïs par zone établie par analyse fréquentielle .....	23

**ANNEXE 1 : Carte des propriétés des sols : type de sol (a), profondeur des sols (b), réserve utile (c)**

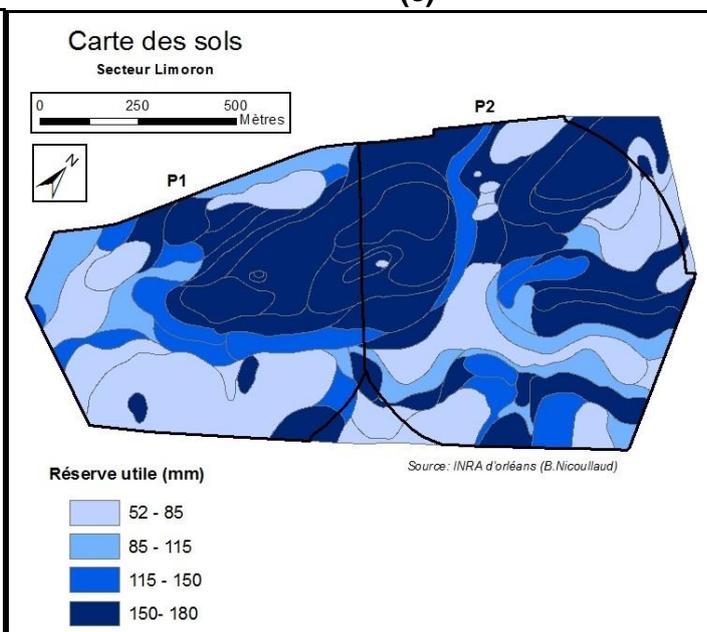
(a)



(b)

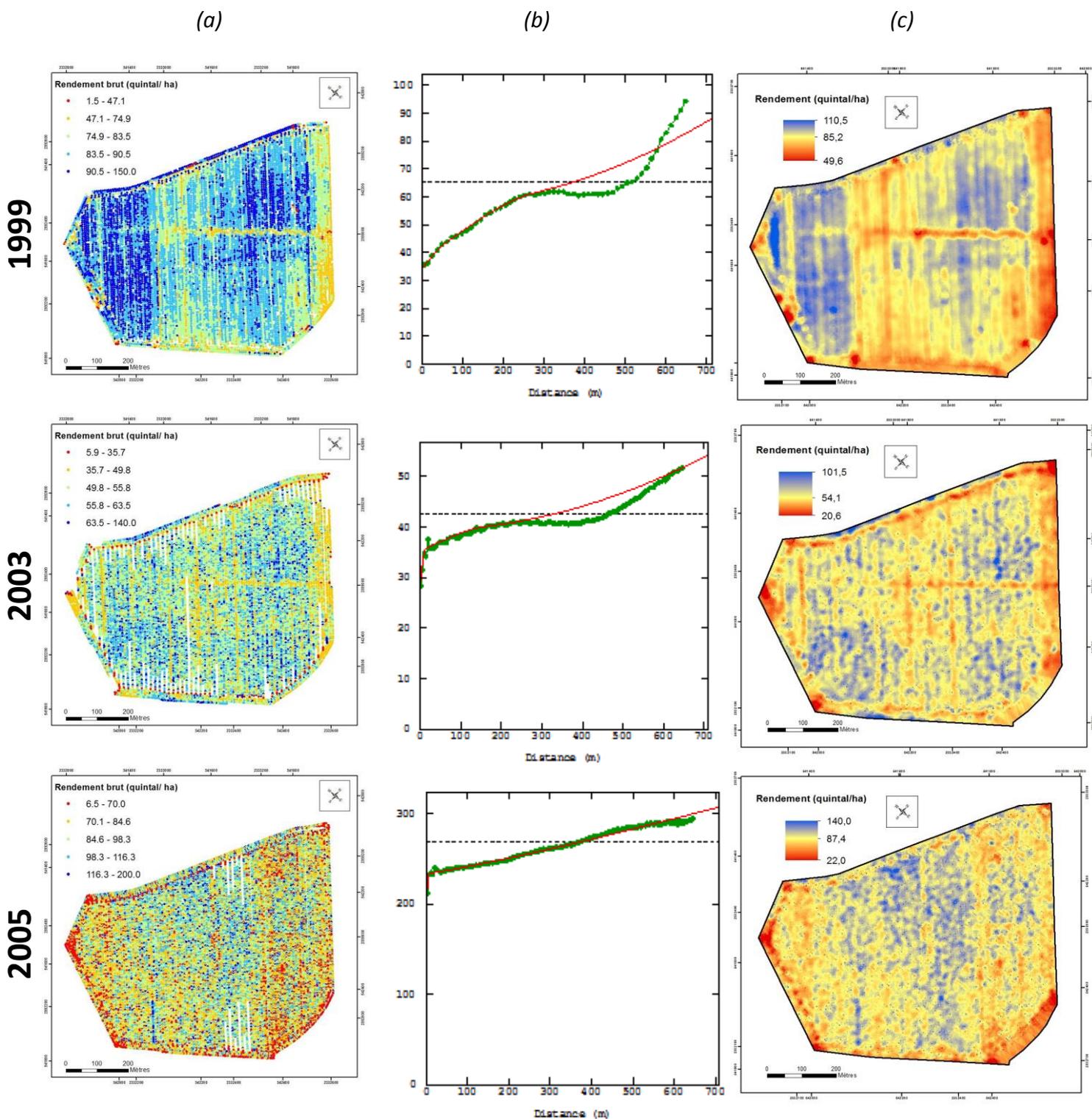


(c)

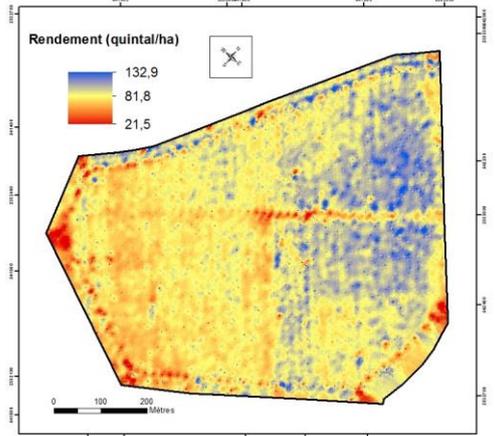
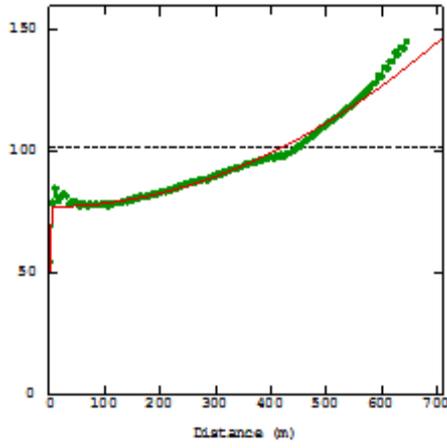
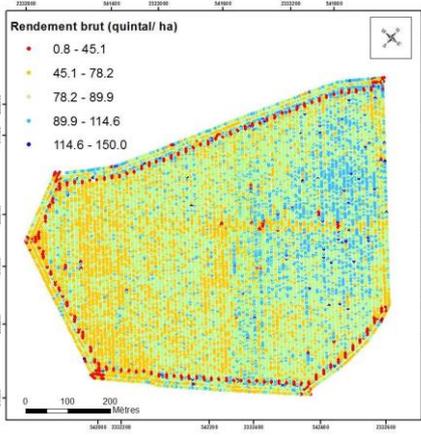


**ANNEXE 2 : Cartes de rendement issues des capteurs de rendement (a), ajustement des variogrammes expérimentaux (b) et cartes de rendement par krigeage ordinaire (c)**

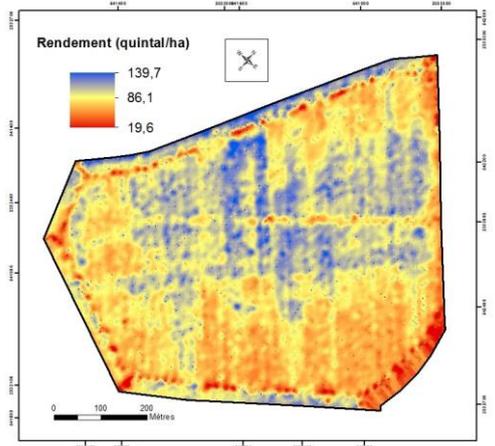
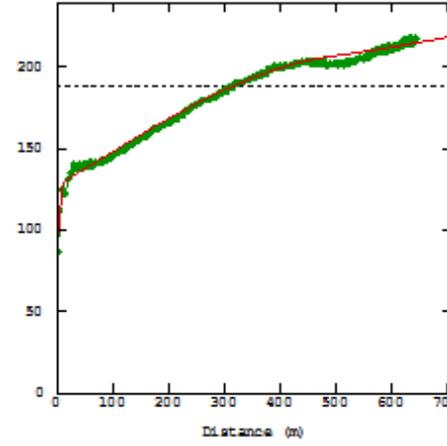
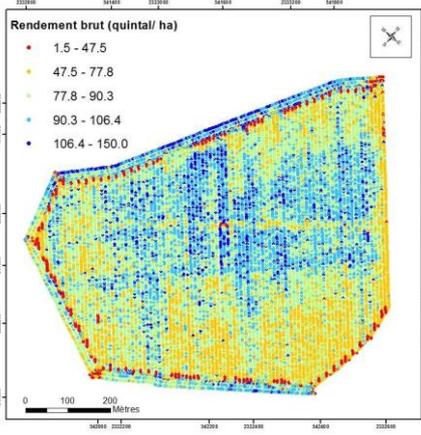
**PARCELLE 1 – BLE**



2007



2009



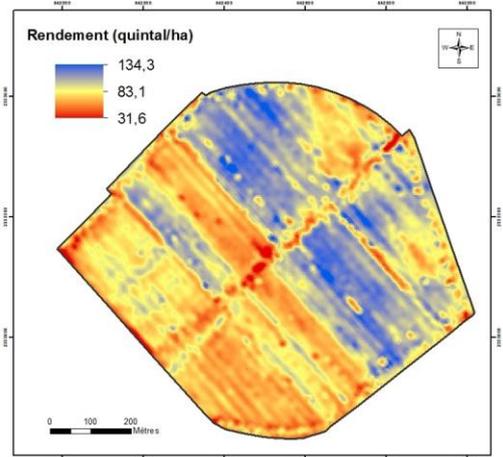
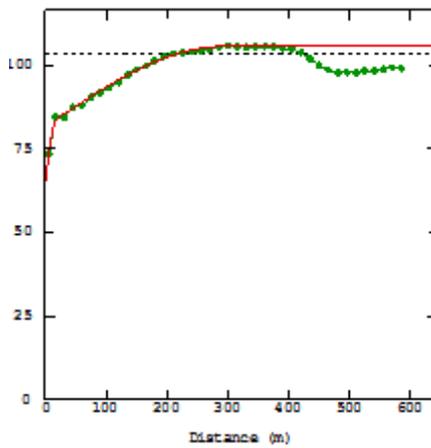
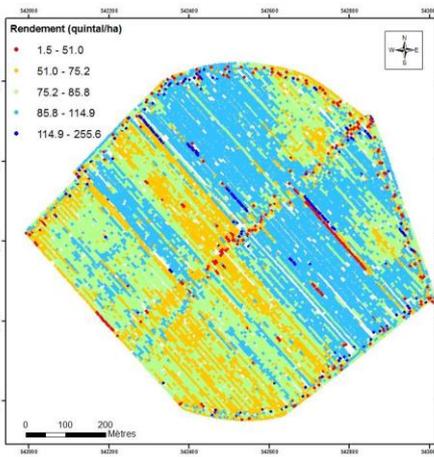
PARCELLE 2- BLE

(a)

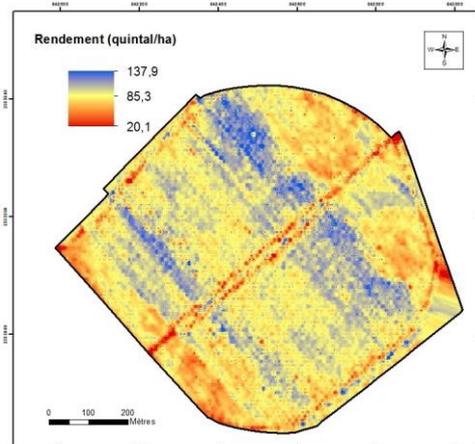
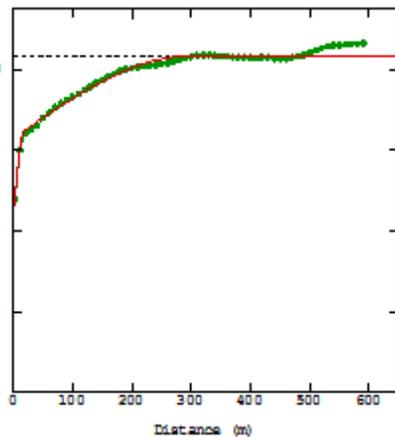
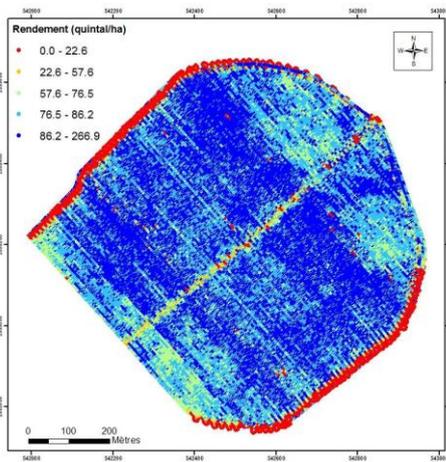
(b)

(c)

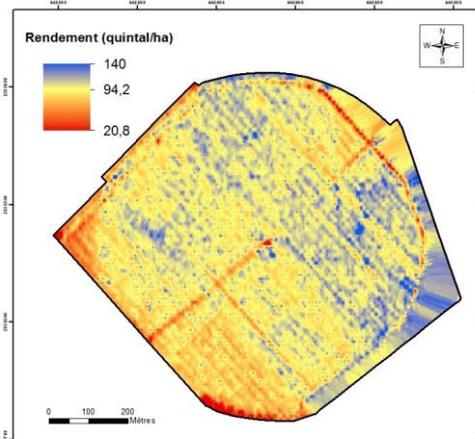
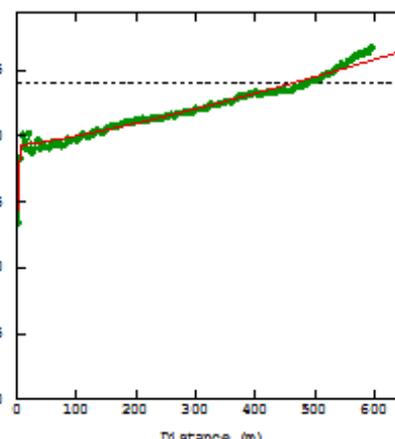
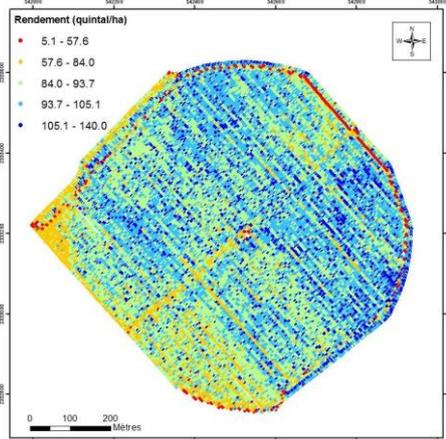
1998



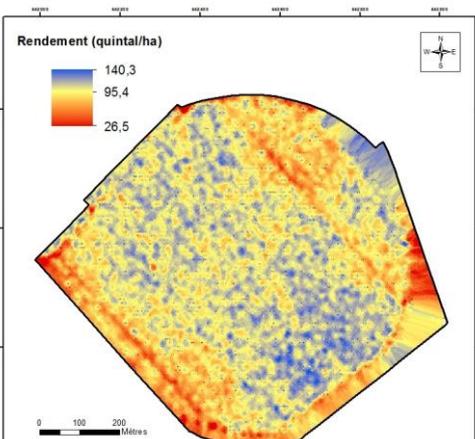
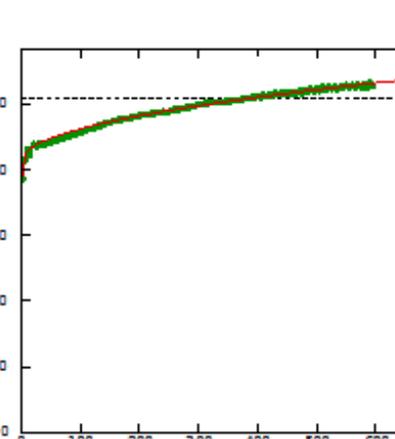
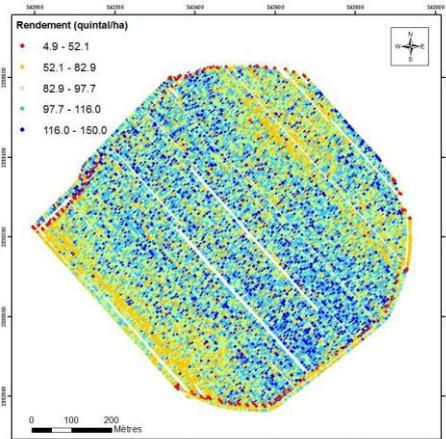
2000



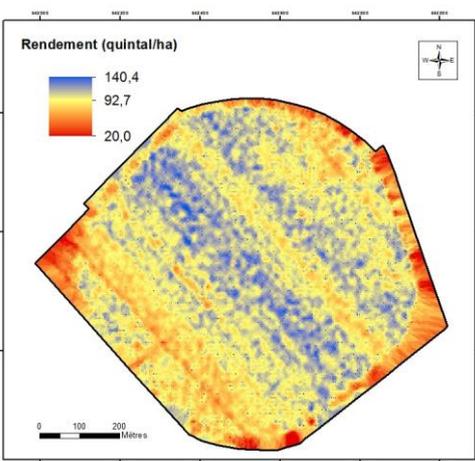
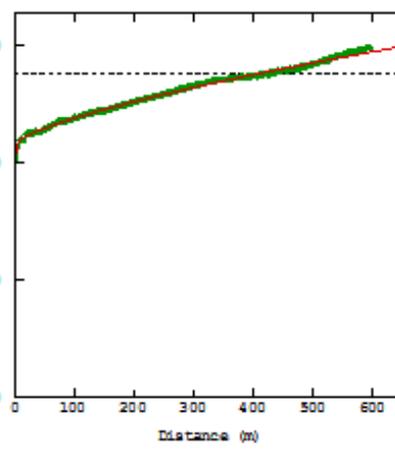
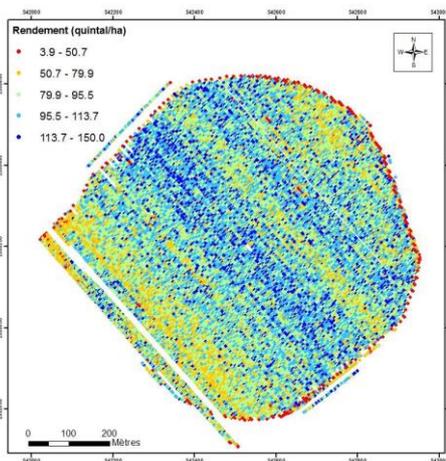
2002



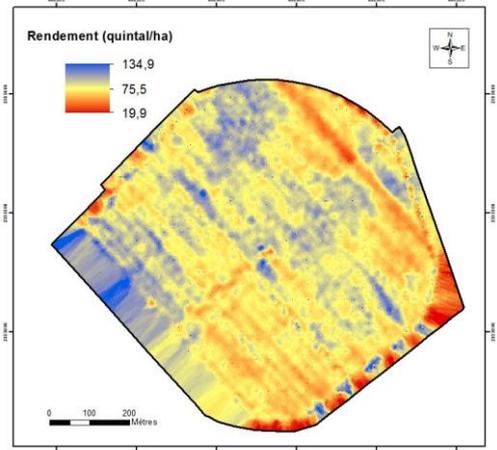
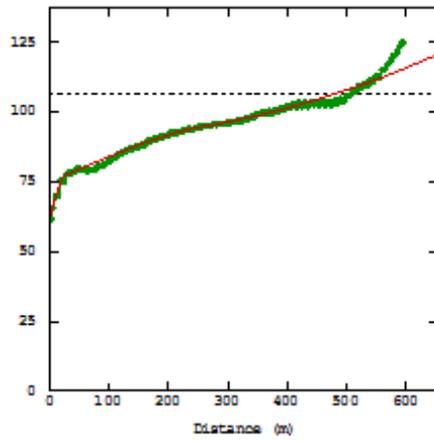
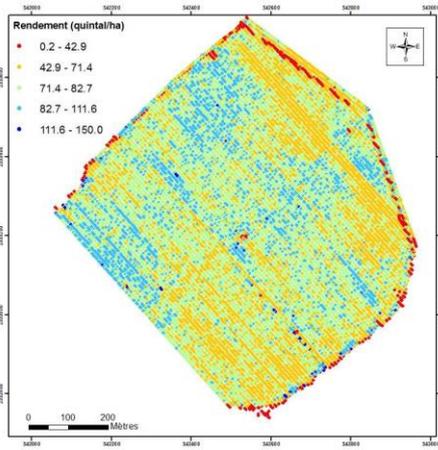
2004



2006



2008



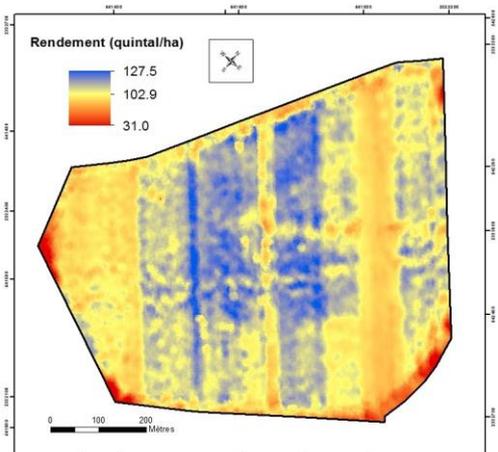
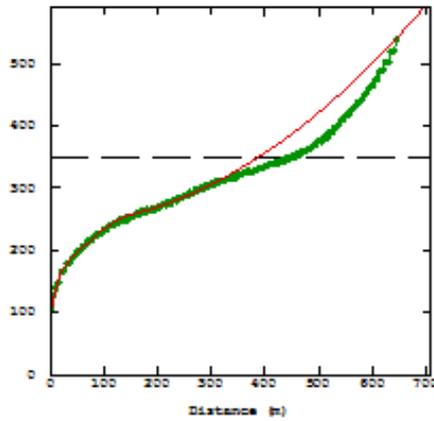
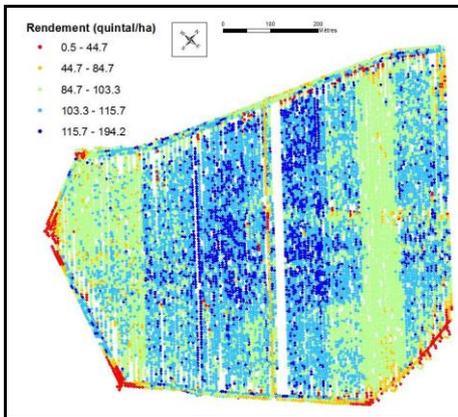
PARCELLE 1- MAIS

(a)

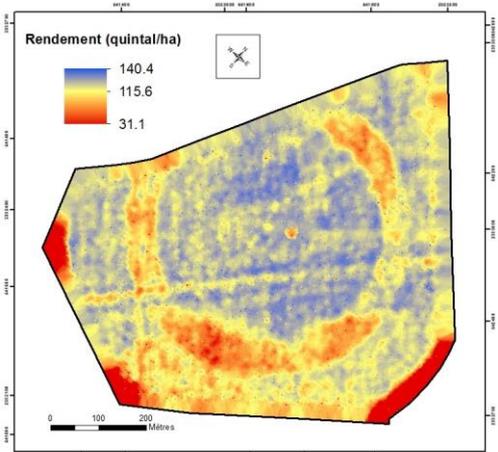
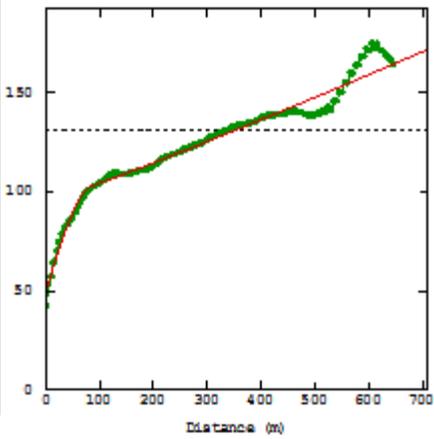
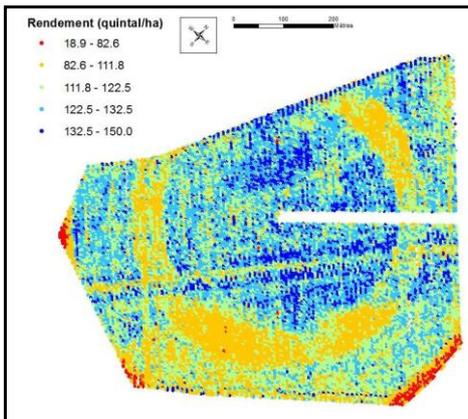
(b)

(c)

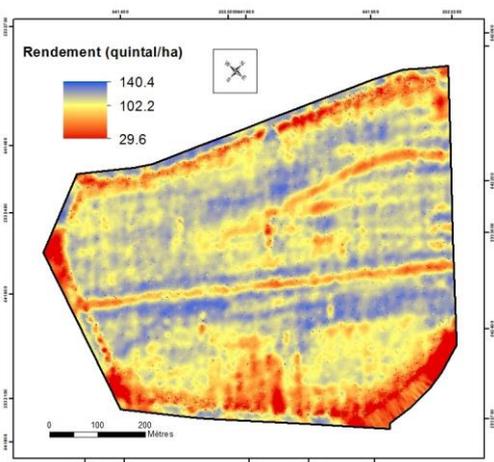
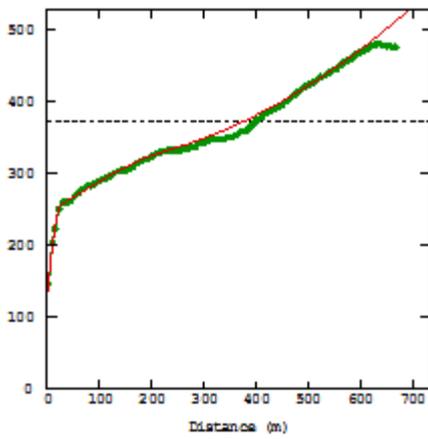
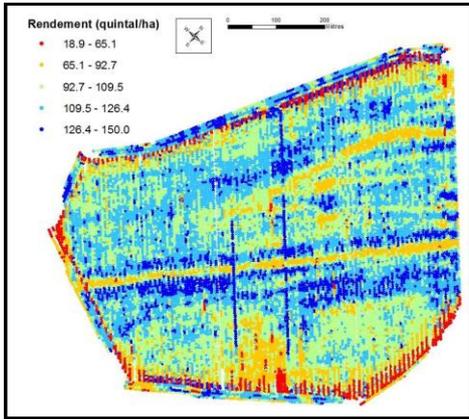
1998



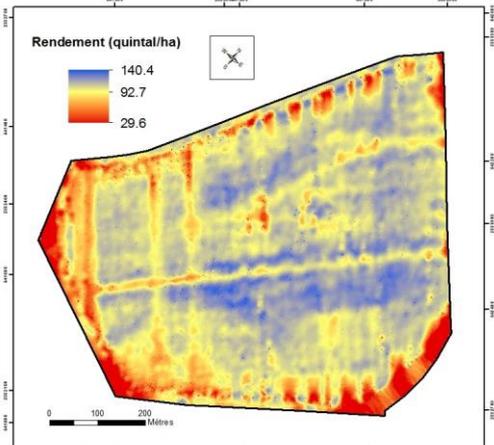
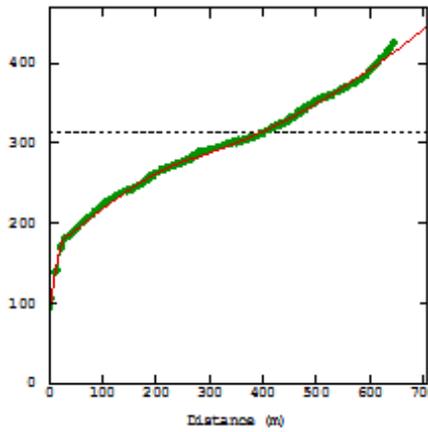
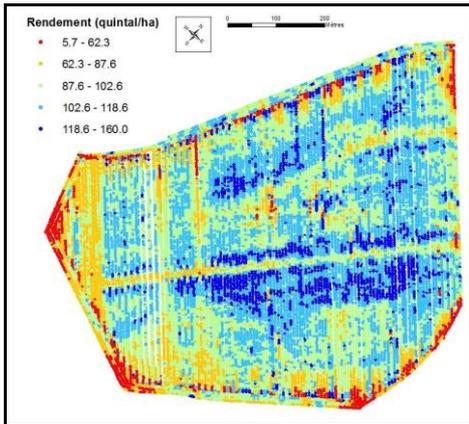
2000



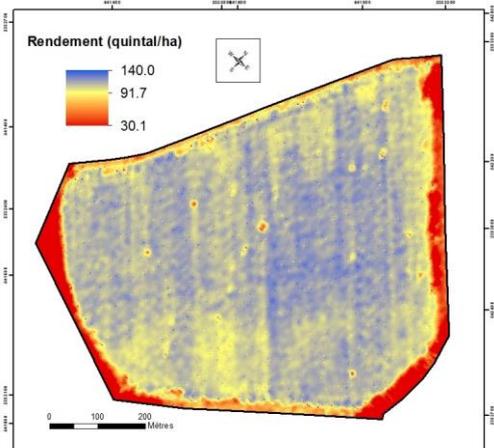
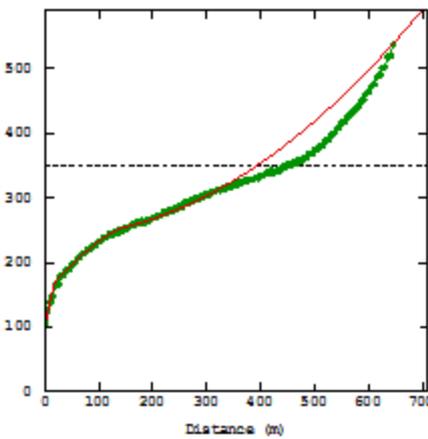
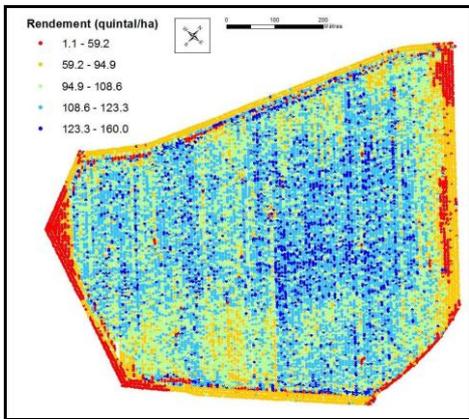
2002



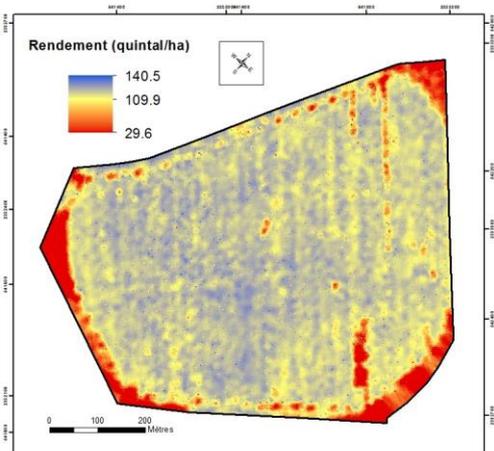
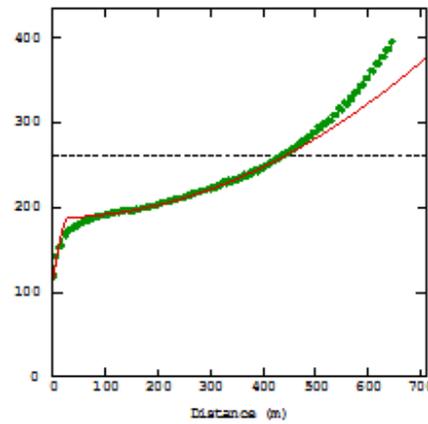
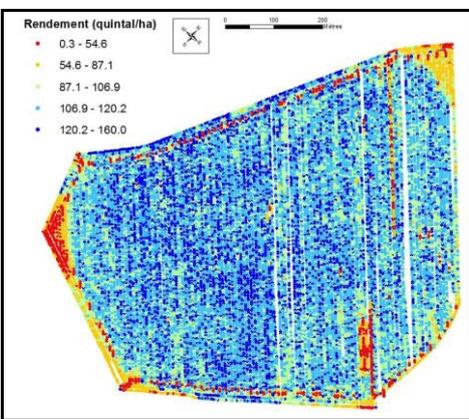
2004



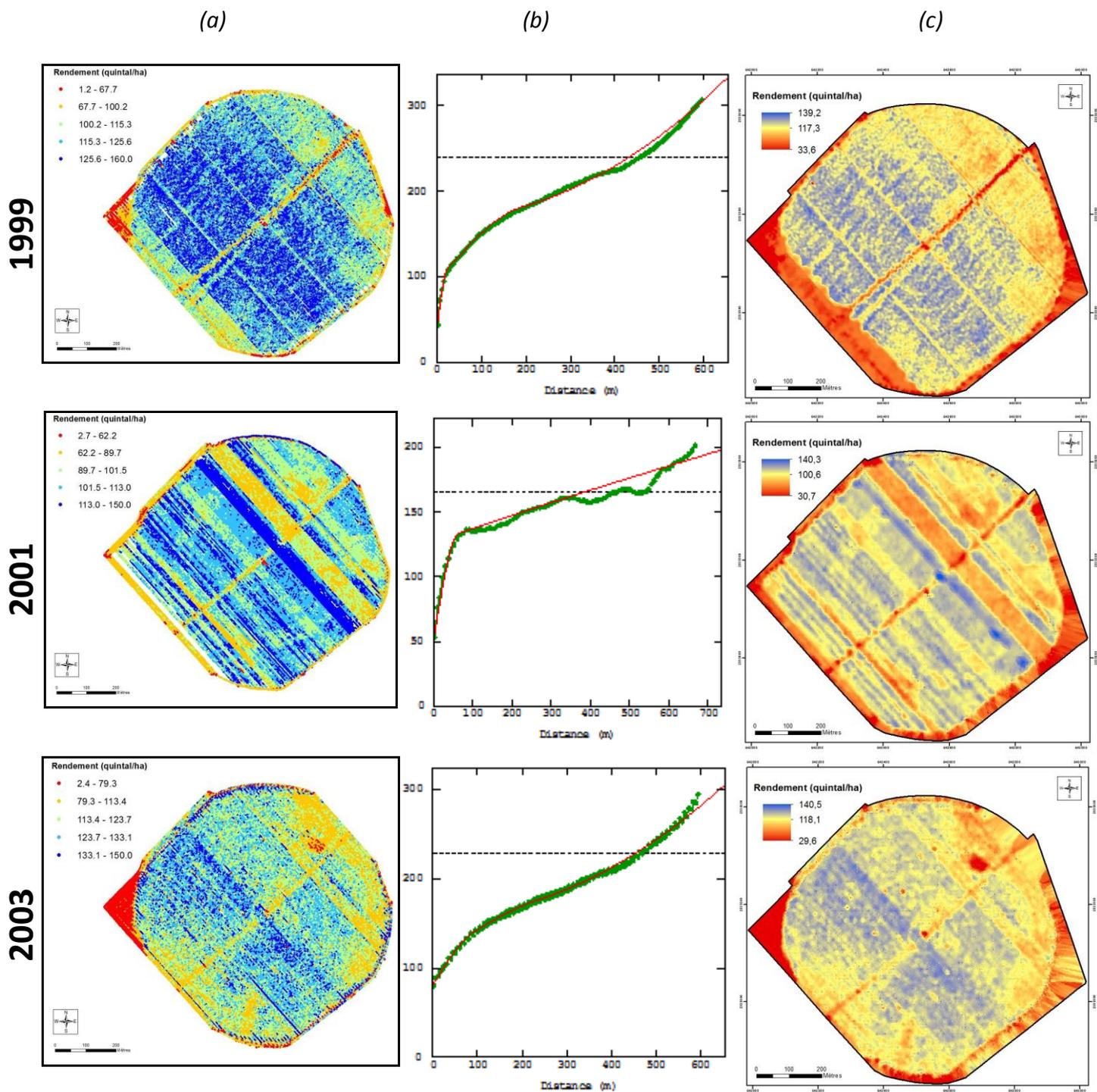
2008



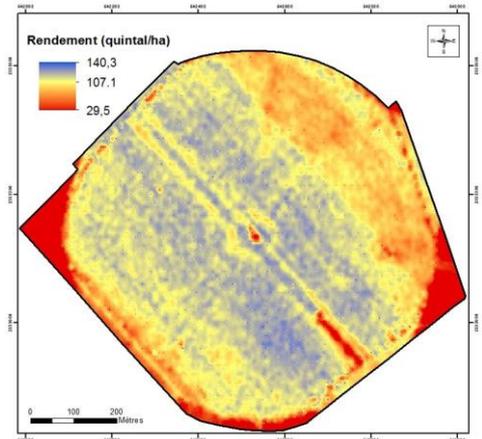
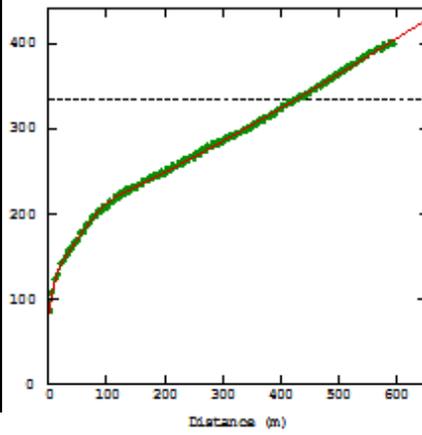
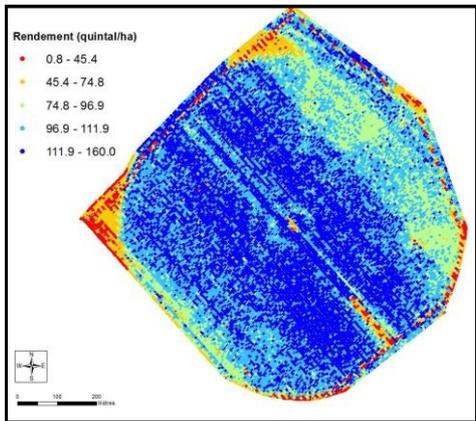
2010



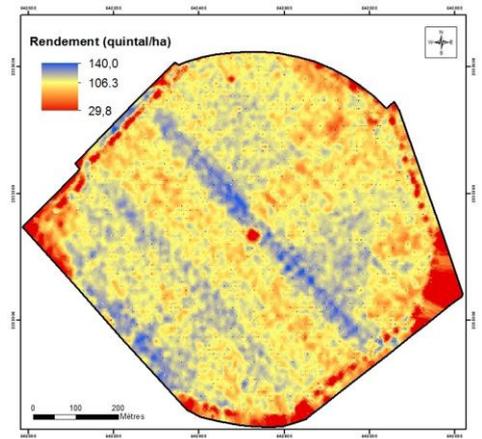
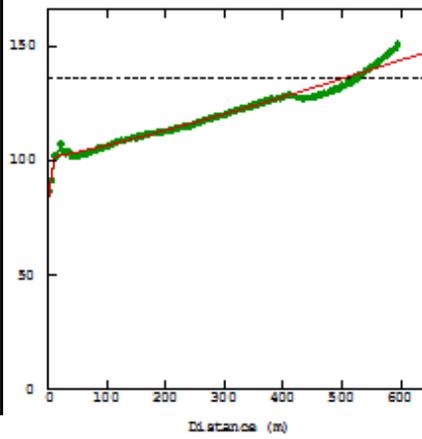
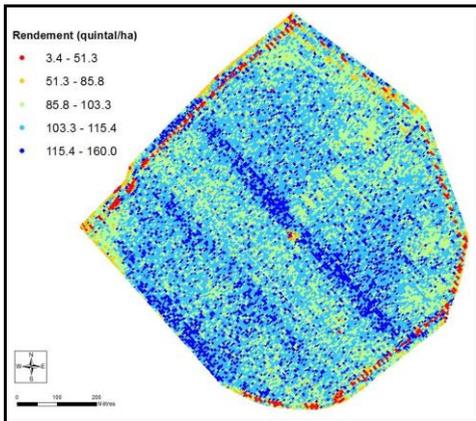
PARCELLE 2- MAIS



2009



2011



**ANNEXE 3 : Statistiques relatives aux propriétés des sols (profondeur des sols et réserve utile) en fonction du zonage issu de l'analyse fréquentielle pour le blé (a) et le maïs (b)**

(a)

<b>PARCELLE 1 - BLE</b>	<b>classe 0</b>			<b>classe 1</b>			<b>classe 2</b>		
<b>Type sol - regroupement</b>	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)
CALCISOLS	0	nd	nd	18	98	142	17	87	123
CALCOSOLS caillouteux	0	nd	nd	39	50	80	42	50	79
CALCOSOLS non caillouteux	100	88	141	43	96	139	41	75	111
<b>moyenne pondérée totale</b>		<b>88</b>	<b>141</b>		<b>79</b>	<b>116</b>		<b>66</b>	<b>99</b>
<b>PARCELLE 1 - BLE</b>	<b>classe 3</b>			<b>classe 4</b>			<b>classe 5</b>		
<b>Type sol - regroupement</b>	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)
CALCISOLS	15	119	167	66	120	166	99	120	168
CALCOSOLS caillouteux	13	45	70	0	nd	nd	0	nd	nd
CALCOSOLS non caillouteux	72	83	122	34	114	155	1	120	166
<b>moyenne pondérée totale</b>		<b>83</b>	<b>122</b>		<b>118</b>	<b>162</b>		<b>120</b>	<b>169</b>

<b>PARCELLE 2 - BLE</b>	<b>classe 0</b>			<b>classe 1</b>			<b>classe 2</b>		
<b>Type de sol -regroupement</b>	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)
CALCISOLS	0	nd	nd	10	119	168	32	120	168
CALCOSOLS caillouteux	61	54	78	33	44	68	31	56	80
CALCOSOLS non caill.	38	75	120	58	92	133	37	101	148
<b>moyenne pondérée totale</b>		<b>62</b>	<b>94</b>		<b>78</b>	<b>114</b>		<b>93</b>	<b>133</b>
<b>PARCELLE 2 - BLE</b>	<b>classe 3</b>			<b>classe 4</b>			<b>classe 5</b>		
<b>Type de sol -regroupement</b>	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)
CALCISOLS	25	120	168	22	119	165	88	120	157
CALCOSOLS caillouteux	21	53	79	11	75	104	0	nd	nd
CALCOSOLS	54	88	135	68	93	139	12	105	153
<b>moyenne pondérée totale</b>		<b>88</b>	<b>132</b>		<b>97</b>	<b>141</b>		<b>118</b>	<b>157</b>

(b)

<b>PARCELLE 1 - MAIS</b>	<b>classe 0</b>			<b>classe 1</b>			<b>classe 2</b>		
<b>Type sol - regroupement</b>	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)
CALCISOLS	0	nd	nd	10	120	171	0	nd	nd
CALCOSOLS caillouteux	18	50	80	74	50	80	81	50	80
CALCOSOLS non caillouteux	82	75	113	16	70	105	19	101	138
<b>moyenne pondérée totale</b>		<b>71</b>	<b>107</b>		<b>60</b>	<b>93</b>		<b>60</b>	<b>91</b>
<b>PARCELLE 1 - MAIS</b>	<b>classe 3</b>			<b>classe 4</b>			<b>classe 5</b>		
<b>Type sol - regroupement</b>	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)
CALCISOLS				35	103	146	36	120	167
CALCOSOLS caillouteux		nd		6	42	63	15	49	79
CALCOSOLS non caillouteux				58	77	112	49	91	136
<b>moyenne pondérée totale</b>		<b>nd</b>			<b>84</b>	<b>120</b>		<b>95</b>	<b>138</b>

<b>PARCELLE 2 - MAIS</b>	<b>classe 0</b>			<b>classe 1</b>			<b>classe 2</b>		
<b>Type de sol -regroupement</b>	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)
CALCISOLS	12	120	171	13	120	162	0	110	173
CALCOSOLS caillouteux	44	70	94	23	35	53	31	35	52
CALCOSOLS non caillouteux	43	92	131	64	92	135	69	108	156
<b>moyenne pondérée totale</b>		<b>85</b>	<b>118</b>		<b>82</b>	<b>120</b>		<b>85</b>	<b>124</b>
<b>PARCELLE 2 - MAIS</b>	<b>classe 3</b>			<b>classe 4</b>			<b>classe 5</b>		
<b>Type de sol -regroupement</b>	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)	% sols	Prof. (cm)	RU (mm)
CALCISOLS	20	116	164	22	119	166	94	120	171
CALCOSOLS caillouteux	1	40	64	22	55	82	0	nd	nd
CALCOSOLS non caillouteux	79	82	130	56	91	136	6	89	133
<b>moyenne pondérée totale</b>		<b>88</b>	<b>136</b>		<b>89</b>	<b>131</b>		<b>118</b>	<b>168</b>