



HAL
open science

Variabilité spatiale d'une parcelle cultivée : mise en évidence et conséquences agronomiques

M. Bernardini

► **To cite this version:**

M. Bernardini. Variabilité spatiale d'une parcelle cultivée : mise en évidence et conséquences agronomiques. Sciences du Vivant [q-bio]. 2001. hal-02828761

HAL Id: hal-02828761

<https://hal.inrae.fr/hal-02828761>

Submitted on 7 Jun 2020

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

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

Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier
2, Place Pierre VIALA,
34000, Montpellier.

**VARIABILITE SPATIALE D'UNE PARCELLE CULTIVEE :
Mise en évidence et conséquences agronomiques.**

Présenté par Marc BERNARDINI

Pour l'obtention du titre d'Ingénieur Diplômé par l'Etat
Spécialité Agriculture.

Présenté le 8 novembre 2001.

JURY

Président : P. RICARD

Membres : H. AUDEMARD
: P. HERRMANN
: R. METRAL
: L. PREVOT

Remerciements

Je tiens à remercier les cinq personnes qui ont bien voulu s'associer à ce travail et me guider à travers la complexité de la variabilité.

Tout d'abord Laurent Bruckler pour son encadrement, ses nombreuses relectures et ses encouragements. Merci aussi à André Chanzy pour son aide, et pour m'avoir accueilli au sein de son laboratoire. Merci encore à Claude Bruchou,, Yvon Dumas et Laurent Prévot pour leur aide et leur soutien.

Je voudrais aussi remercier toute l'équipe de l'Unité Expérimentale avec qui nous avons fait les mesures, les prélèvements et le reste dans la bonne humeur.

Remerciements aussi, à ceux qui de près ou de loin, m'ont apporté une aide technique ou bibliographique, je pense notamment aux scientifiques, ingénieurs et techniciens des services de Sciences du sol, de Bioclimatologie et de l'Unité Régionale de Documentation.

Pour terminer je voudrais remercier Paul Gérard Schoch et le service de formation permanente de l'INRA d'Avignon pour leur soutien.

Enfin, comment ne pas remercier Marylène de tout simplement m'avoir "supporté".

SOMMAIRE.

	Page
Table des sigles et abréviations.	5
Liste des annexes, tableaux et figures.	6
<u>1. INTRODUCTION.</u>	8
<u>2. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE.</u>	9
A/. MISE EN EVIDENCE DE LA VARIABILITE.	9
A.1. Variabilité du sol et de ses constituants.	9
A.2. Variabilité induite par les techniques culturales.	10
A.3. Combinaison des variabilités du milieu et d'origine biologique.	11
B/. CONSEQUENCES DE LA VARIABILITE.	11
B.1. Conséquences agronomiques.	11
B.2. Conséquences méthodologiques.	12
C/. METHODES STATISTIQUES ET ECHANTILLONNAGE.	12
D/. PRISE EN COMPTE OU CORRECTION DES EFFETS DE LA VARIABILITE.	13
D.1. Méthodes de prise en compte de la variabilité.	13
D.2. Méthodes de correction du milieu.	14
<u>3. MATERIELS ET METHODES.</u>	16
A/. LE SITE.	16
A.1. Localisation.	16
A.2. Historique.	16
B/. LE CONTEXTE CLIMATIQUE.	17
B.1. La pluviométrie.	17
B.2. La température.	17
B.3. L'évapotranspiration.	17

B.4. Les vents.	17
C/. LES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX.	18
C.1. En 1997.	18
C.1.1. L'itinéraire technique et les outils associés.	18
C.1.2. Le plan d'échantillonnage.	18
C.2. En 1998.	19
C.2.1. L'itinéraire technique et les outils associés.	19
C.2.2. Le plan d'échantillonnage.	19
D/. VARIABLES MESUREES ET METHODES ASSOCIEES.	19
D.1. Le sol.	19
D.1.1. Caractérisation et granulométrie.	19
D.1.2. Observation sur le sol et sa structure.	20
D.1.3. Teneur en eau et profils hydriques.	21
D.2. Conduite de l'irrigation.	23
D.3. La plante.	24
D.3.1. Biomasse végétative et reproductrice.	24
D.3.2. L'indice de végétation.	24
D.3.3. Rendements et composantes du rendement.	28
E/. MODELISATION DES CULTURES POUR L'INTERPRETATION.	30
F/. METHODES STATISTIQUES.	30
F.1. Analyse uni-variable.	30
F.2. Analyse spatiale.	31
F.2.1. Effet du passé cultural.	31
F.2.2. Dépendance spatiale.	31
F.2.3. Interpolation et cartographie.	31
F.3. Liaison entre variables.	32
F.3.1. Analyse exploratoire d'un ensemble de variables.	32

F.3.2. Modélisation d'une relation.	32
F.4. Analyse des composantes du rendement.	33
<u>4. RESULTATS ET DISCUSSION.</u>	34
A/. VARIABILITE LIEE AU SOL.	34
A.1. Présentation générale.	34
A.1.1. Texture et Structure du sol.	34
A.1.2. Profondeur de sol.	35
A.1.3. Contexte hydrologique et pente.	36
A.1.4. Composition chimique du sol.	37
A.1.5. Conduite des cultures antérieures.	38
A.2. Statistiques descriptives.	38
B/. VARIABILITE DE LA COUVERTURE VEGETALE.	41
B.1. Analyse statistique globale.	41
B.1.1. Expérimentation en 1997.	41
B.1.2. Expérimentation en 1998.	42
B.2. Analyse des composantes du rendement.	44
B.3. Recherche des facteurs ayant induit une variabilité du rendement.	46
B.3.1. L'eau.	46
B.3.2. L'azote.	48
B.4. Image de télédétection	49
<u>5. CONCLUSIONS.</u>	51
Bibliographie.	52
Annexes.	55

Table des sigles et abréviations.

Biomgrain	Biomasse grains
Biomrep	Biomasse reproductrice
Biomtot	Biomasse totale
C/N	Rapport Carbone sur Azote
CaA	Calcaire Actif
CaT	Calcaire Total
CC	Capacité au Champ
CEC	Capacité d'Echange Cationique
Cu	Cuivre
ETM	Evapotranspiration Maximale
ETP	Evapotranspiration Potentielle
JAS	Jours Après Semis
JCAL	Jours Calendaires
K	Potassium
k	Coefficient de consommation en eau applicable à chaque culture en fonction de son stade physiologique
Matrice CCD	Elément sensible de la caméra sur lequel est projeté l'image issue de l'objectif
N	Azote
Nbépis	Nombre d'épis
Nbpieds	Nombre de pieds
NDVI	« Normalized Difference Vegetation Index » Différence Normalisée d'un index de végétation
N° plac.	Numéro de placette
P	Phosphore
pF	Point de flétrissement
pH	Potentiel Hydrogène
PIR-R	Proche Infra Rouge-Rouge
Pixels	Plus petit élément de couleur homogène constituant une image
PMG	Poids de mille grains
Rdt	Rendement
RTOT	Réserve Totale
RU	Réserve Utile
Sonde LCPC	Sonde du laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Liste des annexes, tableaux et figures.

ANNEXE n° :	1	Plan des anciens blocs
	2	Triangle des textures
	3	Fichier composantes du rendement STICS
	4	Texture du sol
	5	Composition chimique du sol
	6	Historiques culturaux sur maïs
	7	Historiques culturaux sur blé dur
	8	Légende des Historiques culturaux
	9	Corrélations entre variables sol
	10	Corrélations entre variables blé dur
	11	Mesures d'humidité gravimétrique
	12	Humidité du sol et réserve en eau
	13	Pluviométrie et ETP
	14	Fichier bilan STICS
	15	Rendement maïs 1997
	16	Rendement blé du 1998
TABLEAU n° :	1	Longueur onde filtre caméra
	2	Stades végétatifs du blé dur
	3	Profondeur de sol
	4	Hauteur de la nappe hydrologique
	5	Eléments chimiques majeurs
	6	Stress hydrique
	7	Stress azoté
	8	Relation rendement profondeur de sol
FIGURE n° :	1	Subdivision parcellaire
	2	Plan échantillonnage 1997
	3	Plan échantillonnage 1998
	4	Réflectance des feuilles
	5	prise de vue du canal 4 (Rouge)
	6	prise de vue du canal 6 (Proche Infra rouge)
	7	prise de vue de l'indice NDVI
	8	NDVI géorectifié
	9	colorisation de l'image
	10	Histogrammes sols
	11	Variogrammes sols
	12	Krigeage sol
	13	NDVI
	14	Histogramme 1997
	15	Effet du passé cultural 1997
	16	Variogramme 1997
	17	Histogramme 1998

18	Effet du passé cultural 1998
19	Variogramme 1998
20	Poids d'1 grain
21	Nombre de grains
22	Nombre d'épis
23	Nombre de grains/épi
24	Nombre de pieds/placette
25	Nombre d'épis/pied
26	Eau totale du sol dans les horizons
27	Eau disponible dans les horizons
28	Relation NDVI et Nombre de grains
29	Relation rendement et profondeur de sol.

VARIABILITE SPATIALE D'UNE PARCELLE CULTIVEE : mise en évidence et conséquences agronomiques.

1. INTRODUCTION.

L'expérimentation agronomique, de manière générale, a pour objet de comparer les effets de différents traitements appliqués au sol ou à la plante. Elle est utilisée pour tester des hypothèses agronomiques.

Chaque expérimentation agronomique, qu'elle soit réalisée au laboratoire ou sur le terrain, doit être menée de façon rigoureuse. C'est ainsi que toute comparaison nécessite de s'assurer qu'elle sera réalisée dans la mesure du possible dans des conditions de sol, de climat et de pratiques culturales identiques.

L'existence des diverses sources d'hétérogénéité et de leur localisation est une difficulté qu'il faut contourner. Pour cela, des nouvelles technologies ont été mises au point notamment «l'agriculture de précision». Elles permettent d'ajuster les pratiques culturales aux besoins des plantes en fonction des hétérogénéités locales, tout en améliorant leur efficacité et en respectant le mieux possible l'environnement.

Dans le cadre de ma fonction de Directeur de l'unité expérimentale du centre de recherche de l'INRA d'Avignon, une de mes principales activités est de mettre en place et de conduire des expérimentations pour sept unités de recherche.

Sur la partie du domaine réservée aux "cultures annuelles", une parcelle unique a été constituée en 1997 par le regroupement d'anciens sous-ensembles utilisés antérieurement par différentes unités de recherche avec différentes cultures et un grand nombre de protocoles expérimentaux. La variabilité spatiale induite en partie par les activités expérimentales antérieures a été observée au cours des années de mise en culture d'homogénéisation.

Mon rôle étant de mettre à disposition des expérimentateurs des parcelles dont la variabilité est soit négligeable, soit connue, il m'est apparu utile d'entreprendre une étude, qui, au-delà de mon activité professionnelle, me permettait de réaliser un travail personnel en le validant par le titre d'Ingénieur DPE (Diplômé Par l'Etat).

Ce travail a donc pour but d'analyser la variabilité spatiale, de la préciser, et d'analyser si des corrections de cette variabilité sont possibles ou envisageables.

2. ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE.

A/. MISE EN EVIDENCE DE LA VARIABILITE.

En sciences agronomiques, de nombreux expérimentateurs ont constaté qu'il existait dans une parcelle une variabilité plus ou moins importante. Cette variabilité provenant du matériel biologique, du sol, de l'environnement ou induite par les techniques culturales, doit être identifiée et quantifiée afin de pouvoir être prise en compte dans l'interprétation des résultats.

A.1. Variabilité spatiale du sol et de ses constituants.

La variabilité spatiale du sol et de ses constituants a été mise en évidence dans un grand nombre d'essais agronomiques. Il arrive fréquemment qu'une expérimentation puisse avoir un aspect visuel "homogène", et que malgré tout, la variabilité soit toujours présente (GOUMARI, 1986, BERTUZZI *et al.*, 1987).

Les principales sources de variabilité du sol peuvent être identifiées sous cinq rubriques:

- la texture,
- la structure,
- la composition chimique,
- la pente,
- le contexte hydrologique.

A.1.1. La **texture** est constituée de particules de taille différentes. Ainsi plusieurs classes granulométriques (sables, limons et argile) ont été définies permettant un classement synthétique du sol ("argilo-limoneux" ou "sablo-limoneux" par exemple). La texture peut avoir subi au cours du temps, des altérations plus ou moins fortes sous l'action du climat et donc présenter une variabilité spatiale. La connaissance de la texture, à elle seule, ne permet pas de prévoir précisément les propriétés physiques d'un sol, mais ses tendances globales. On sait, par exemple, que les sols où dominent les sables sont filtrants et que des éléments fins de type "limon" auront tendance à rendre le sol "battant".

A.1.2. La **structure** du sol reflète le mode d'assemblage des différents constituants du sol. Elle est susceptible d'évoluer dans le temps sous l'influence du climat, de la faune, et des techniques culturales. La structure particulière, fragmentaire ou compacte est caractérisée par la taille, la forme, et l'assemblage des éléments structuraux.

La structure du sol joue un rôle considérable sur la localisation racinaire (TARDIEU et MANICHON, 1987). En effet, la progression des racines dans le sol dépend de l'assemblage des éléments puisque la phase solide et l'espace poral sont organisés de manière hétérogène et discontinue (MONNIER, 1968; CABIBEL ET HOROYAN, 1985; PAPY *et al.*, 1990). En outre, l'arrangement des éléments détermine les caractéristiques de l'espace poral et donc le stockage et le transfert d'eau et de chaleur dans le sol (MONNIER, 1987; GUERIF, 1990; RICHARD et BOIFFIN, 1990) conditionnant ainsi la germination des plantes lors de leur implantation. Enfin, la qualité de l'absorption racinaire dépend de la qualité du contact entre racines et sol ainsi que de l'absence d'obstacles (MONNIER, 1968; TARDIEU et MANICHON, 1987).

Au total, la structure du sol peut donc entraîner une variabilité de l'enracinement et donc de l'absorption par les plantes.

La structure peut être caractérisée par un profil cultural, qui permet d'observer la succession des différents horizons, la présence de zones compactes et la quantité de racines présentes, la

décomposition des matières organiques et l'importance de l'activité biologique. Ce profil peut constituer un des éléments relatif à la variabilité spatiale du sol (GAUTRONNEAU, MANICHON, 1983; BILLOT, 1987; PAPY, *et al.*, 1990).

L'évolution de la structure peut être appréciée à l'aide de critères morphologiques révélant le compactage ou la fragmentation (MANICHON et ROGER ESTRADE, 1990), mais il est quelquefois difficile de caractériser la structure moyenne des horizons superficiels du fait de la complexité de leur organisation structurale et de leur grande variabilité (STENGEL, 1990). Certains auteurs comme LEDIEU (1985), BILLOT (1987), MONNIER (1987), BOIFFIN *et al.*, (1990), TARDIEU et MANICHON (1987) se sont attachés à décrire les effets des techniques culturales sur la structure du sol, et notamment le compactage, en notant qu'il était préjudiciable au bon déroulement de l'implantation des cultures. Les techniques culturales peuvent ainsi avoir des effets sur la genèse d'une variabilité spatiale consécutive au travail du sol.

A.1.3. La composition chimique résulte de deux origines : la première dépend du fond géochimique du sol et la seconde des apports réalisés par l'agriculteur.

C'est grâce à l'analyse de sol que sont connues les concentrations en éléments chimiques. Leur absorption étant fortement liée à la teneur en eau du sol, toute hétérogénéité de l'alimentation hydrique peut induire une hétérogénéité de l'alimentation minérale (BOIFFIN *et al.*, 1990; BRUCKLER *et al.*, 1997). Des variations locales fortes de concentration peuvent provoquer des toxicités surtout dans le cas d'oligo-éléments. L'exemple de précédents culturaux de types vignes ou vergers illustre bien ce propos, car la présence de cuivre peut localement entraîner une réduction de croissance des parties aériennes et racinaires, l'épaississement des racines et la diminution de leurs ramifications et enfin, un aspect chlorotique des feuilles (BONNEAU et SOUCHIER, 1979).

A.1.4. La pente a pour conséquence essentielle l'évacuation de l'eau mais une déclivité trop prononcée peut accentuer l'érosion par entraînement des éléments fins. Cette érosion peut provoquer des variabilités parcellaires par modification de la composition du sol, d'autant qu'en général les écoulements sur la pente sont hétérogènes, contribuant à aggraver la variabilité à l'échelle de la parcelle ou du bassin versant.

A.1.5. L'existence d'une nappe peut être une source de variabilité. En effet, les fluctuations de la profondeur de la nappe peuvent constituer une source de variabilité supplémentaire en faisant varier la profondeur de sol exploitable par les racines et les réserves en eau disponibles. Par ailleurs, les "battements" de la nappe peuvent provoquer un engorgement du sous sol.

A.2. Variabilité spatiale induite par les techniques culturales.

La répartition spatiale des contraintes opérées par l'ensemble tracteur-outil est discontinue et ceci induit l'existence d'une variabilité d'origine technique. La variabilité la plus étudiée dans ce domaine est probablement celle ayant des effets sur la structure, et notamment sur le compactage. Les effets des techniques culturales sur la structure du sol (notamment au travers du compactage) provoquent indirectement un risque de variabilité supplémentaire, exprimé éventuellement par le comportement de la culture.

En plus des modifications saisonnières de l'état physique du sol par les interventions culturales, la succession des cultures peut "superposer" au cours des années diverses sources de variabilité comme par exemple des compactations répétées.

L'historique culturel de la parcelle permet de conserver des traces sur les sources possibles de variabilité liées à la culture, aux interventions agricoles ou au climat. Ces informations sont particulièrement utiles pour expliquer la variabilité ou les accidents cultureux (GAUTRONNEAU et MANICHON, 1983).

A.3. Combinaison de la variabilité spatiale du milieu et de la variabilité d'origine biologique.

La combinaison de la variabilité liée au milieu avec celle d'origine biologique s'exprime visuellement mais reste à interpréter : ainsi, une culture de maïs de hauteur irrégulière peut laisser penser à une variabilité d'origine biologique alors que des conditions hydriques localement variables peuvent en être la cause.

A l'échelle d'une parcelle la variabilité peut être induite par des différences intra variétales et par une variabilité intra-parcellaire (HAMMER, 1981; GOUMARI, 1986; VAN WESENBEEK et KACHANOSKI, 1988; BRUCE *et al.*, 1990; SCHUELLER, 1992). L'existence d'un gradient de fertilité peut donner lieu à un effet directionnel. GASCUEL ODOUX (1984), GOUMARI (1986), BRUCE *et al.* (1990) et SCHUELLER (1992) se sont par exemple attachés à analyser les rendements de parcelles en montrant qu'ils étaient classés selon un gradient de fertilité. Enfin, les gradients de fertilité peuvent être périodiques (RUSSO, 1986; BERTUZZI *et al.*, 1994; BRUCKLER *et al.*, 1997)

Au total, la variabilité peut s'exprimer différemment en fonction de son origine et des combinaisons possibles. Mais avant d'en chercher l'origine, deux questions doivent être posées:

- Cette variabilité est-elle gênante ?
- Pour qui ?

B/. CONSEQUENCES DE LA VARIABILITE.

B.1. Conséquences agronomiques.

B.1.1. Pour l'agriculture.

La principale conséquence de la variabilité pour l'agriculture est la difficulté de gérer de façon " moyenne " et homogène une parcelle agricole. Le niveau de fertilité d'une parcelle n'est en général pas homogène, et le fait de la gérer de façon moyenne peut conduire à des défauts d'alimentation chimique pour les plantes ou à des excès dans certaines zones, préjudiciables à l'environnement par les infiltrations dans les nappes et le ruissellement dans les cours d'eau.

Les agriculteurs ont un rôle d'observateur en localisant des variabilités dans les parcelles agricoles. Les adaptations portent en premier lieu sur la prise en compte de cette variabilité dans l'exécution des travaux, comme les " zones de mouillères " par exemple.

Ces dernières années un nombre croissant d'agriculteurs utilise des nouvelles technologies mises à leur disposition, et s'appuie par exemple sur des cartographies aériennes de la densité de couverture du sol pour essayer de corriger ces variabilités avec des interventions agricoles localisées et adaptées.

B.1.2. Pour la recherche.

Les conséquences de la variabilité pour la recherche sont importantes. La variabilité de rendement rencontrée dans les parcelles expérimentales est du même ordre de grandeur que

celle rencontrée dans les parcelles agricoles. Le contrôle des expérimentations nécessite alors la mise en place de dispositifs qui permettent de tenir compte de cette variabilité qui peut masquer les effets que l'on souhaite mettre en évidence.

B.2. Conséquences méthodologiques.

B.2.1. Pour l'agriculture.

Les outils récents comme la cartographie aérienne et le GPS (Global Positioning System), peuvent permettre aux agriculteurs de prendre en compte une variabilité et même de la corriger avec des outils adaptés. Toutefois le coût de tels investissements ne les prédispose pas à une large utilisation auprès d'une clientèle hésitante en raison du manque d'informations disponibles actuellement.

B.2.2. Pour la recherche.

Les expérimentations nécessitent l'utilisation de plans d'échantillonnage selon les principes de répétition, de randomisation pour appréhender les termes aléatoires, ou encore la définition de "sous zones" lorsque des éléments de la variabilité sont connus (rang, inter rang, chemin, haie). Plus la parcelle est hétérogène, plus la variance résiduelle est importante et plus il sera difficile d'extraire des différences significatives entre traitements. La cartographie des résidus issus d'un modèle statistique (régression linéaire par exemple) permet d'apprécier l'ordre de grandeur, la variation et le caractère aléatoire de ceux ci. Une cartographie des résidus identique plusieurs années de suite peut s'interpréter comme une source stable et permanente de variabilité spatiale (GOUMARI, 1986).

C/. METHODES STATISTIQUES ET ECHANTILLONNAGE.

R.A. FISHER a ouvert la voie des analyses statistiques dans les sciences agronomiques. Il postulait, de même que NIELSEN et ALEMI (1989), que les observations dans les champs pouvaient être considérées comme indépendantes les unes des autres, chacune ayant la même probabilité de réalisation.

La variabilité existante dans une parcelle peut donner naissance à une "erreur" dans les résultats, qualifiée "d'aléatoire" ou appelée "erreur expérimentale". La réduction de cette variabilité vise à améliorer la représentativité de l'essai et le degré de généralisation des résultats (HERVE, 1988). En conséquence, la taille de l'échantillon doit être suffisamment importante pour être représentative de la population (SCHUELLER, 1992).

Dans un contexte de variabilité spatiale intra-parcellaire, il est important de raisonner simultanément la taille et la localisation de l'échantillonnage (HAMMER, 1981; GASCUEL ODOUX, 1984; RUSSO, 1986; JAINES et HUNSAKER, 1988; VAN WESENBEEK et KACHANOSKI, 1988; BRUCE et al., 1990; BERTUZZI et al., 1994; BRUCKLER et al., 1997). La localisation de l'échantillon peut être fixe ou mobile au cours du temps et se faire selon un quadrillage de terrain régulier ou aléatoire.

Certains auteurs comme HAMMER en 1981, GOUMARI en 1986, VAN WESENBEEK et KACHANOSKI en 1988 et BRUCKLER en 1997 ont montré que le quadrillage régulier était préférable à la randomisation. D'autres auteurs comme GASCUEL ODOUX en 1984 et JIM YEN et al. en 1986 suggèrent que la randomisation, surtout à grande échelle, soit plus facile à mettre en place sur de grands dispositifs expérimentaux. Enfin, selon BERTUZZI et al. en

1987, le déplacement aléatoire des sites de mesures à chaque nouveau prélèvement est préférable en moyenne à une randomisation figée dans laquelle les nouveaux prélèvements se font aux mêmes emplacements que les précédents.

La géostatistique est aussi une méthode qui permet de caractériser la variabilité spatiale d'un phénomène sous forme cartographique et elle repose sur la notion de "variables régionalisées". A titre d'exemple GASCUEL ODOUX (1984) dresse une cartographie de la couverture pédologique et de la dynamique de l'eau dans le sol pour ensuite l'analyser à l'aide de méthodes géostatistiques.

La mise en évidence de la variabilité spatiale du milieu peut faire appel aux nouvelles technologies du type " GPS " - Global Positioning System - utilisant la triangulation sur trois satellites (RIVET, 1987, LORENDEAU, 1998). Cette méthode permet de localiser un point dans une parcelle avec une précision de l'ordre du mètre et d'effectuer ainsi des cartographies précises. Associée à la méthode précédente, l'utilisation de capteurs sur les machines de récoltes par exemple, peut permettre de dresser des cartographies du rendement (RIVET, 1987; BOISGONTIER et ARIAUX, 1998). Dans le cadre du pilotage de l'irrigation ou de la caractérisation des surfaces HATFIELD *et al.* en 1980, RIVET en 1987 et GUYOT en 1993 ont utilisé "l'IRT" (l'infrarouge thermique). Cette méthode est basée sur l'émission de température d'une surface et permet de mesurer le flux de rayonnement émis par un couvert végétal.

La mise en évidence de la variabilité du milieu peut aussi faire appel aux mesures au sol. En fonction des éléments étudiés, les mesures à mettre en place seront différentes. Dans le cas de l'humidité des sols par exemple, plusieurs méthodes peuvent être utilisées : de la simple pesée d'échantillon jusqu'aux sondes neutroniques en passant par la mesure de conductivité électrique. Cette dernière méthode permet de caractériser la conductivité électrique apparente d'un sol très influencée par la teneur hydrique du sol.

Dans le cas de l'échantillonnage des plantes, les outils courants pour mesurer la variabilité sont : la randomisation et la duplication avec l'utilisation de " blocs " (HAMMER, 1981) qui peuvent permettre de s'affranchir partiellement de la variabilité environnementale (pente, hétérogénéité du sol, vent dominant, haies, etc.).

La télédétection permet de recueillir une information spatialisée exhaustive. Elle permet par exemple dans l'infra rouge thermique de détecter des zones souffrant de déficit hydrique. Toutefois il faut rester conscient que la télédétection offre des observations indirectes des variables bio-géophysiques (température de surface pour appréhender un stress hydrique par exemple) et que la résolution spatiale des instruments peut être inadaptée à la variabilité que l'on cherche à caractériser.

Au total, il existe des procédures d'échantillonnage et des méthodes statistiques ou géostatistiques nombreuses permettant d'analyser la variabilité observée. Dans tous les cas, il convient de rester prudent dans l'interprétation des résultats qui par définition ne peuvent être que " probables ".

D/. PRISE EN COMPTE OU CORRECTION DES EFFETS DE LA VARIABILITE.

D.1. Méthodes de prise en compte de la variabilité.

Le but de l'expérimentateur doit toujours être de réduire l'hétérogénéité des conditions expérimentales (Y. HERVE, 1988). Or, la pluralité des facteurs non contrôlables mis en jeu à chaque essai (pente, fertilité du sol, climat) est telle, qu'à la limite, un essai agronomique

n'aurait de validité que pour l'endroit et l'année mêmes de sa réalisation. Dans ce cas il faut dégager des indications permettant une certaine généralisation.

Le rôle de la statistique est ici de décrire, d'analyser et de prédire. La démarche statistique est basée sur le choix d'un modèle fixé à priori, comme par exemple :

Rendement espéré Y
Sur la parcelle i
de la fumure j

$$= \text{Potentiel de cette parcelle } i + \text{Effet dû à la fumure } j$$

$$Y_{ij} = \alpha_i + \beta_j$$

Ceci est un modèle théorique mais dans la pratique on constate un écart entre le rendement mesuré de la parcelle et le rendement calculé par ce modèle. Cet écart est l'erreur résiduelle. Elle contient tous les facteurs non contrôlés (reliquat de fumure).

En réalité et compte tenu de l'erreur résiduelle (χ_{ij}), le modèle devrait s'écrire :

$$Y_{ij} = \alpha_i + \beta_j + \chi_{ij}$$

Le modèle étant défini, l'interprétation statistique repose en général sur l'analyse de variance et la mise en évidence de différences avec le test F de Fischer-Snédecor :

$$F = \frac{\text{variance factorielle (liée au traitement)}}{\text{variance résiduelle (facteurs non contrôlés)}}$$

Les tests statistiques s'efforcent donc d'établir si les différences observées entre traitements sont réelles au sens statistique (significatives) ou seulement des artéfacts de l'expérimentation. Pour cela, différentes méthodes existent en expérimentation agronomique qui permettent de contrôler, plus ou moins, l'hétérogénéité. Parmi ces méthodes, rappelons la méthode de randomisation, s'effectuant par des répétitions aléatoires, et la méthode des blocs qui consiste à établir une stratification de l'aire expérimentale en unités appelées blocs.

Dans le cas des blocs, le modèle statistique devient :

Rendement espéré
d'une parcelle

$$= \text{Effet moyen du champ d'essai} + \text{Effet dû à la variété} + \text{Effet dû au bloc}$$

Il existe par ailleurs de nombreux dispositifs couramment utilisés tels que la méthode des carrés latins ou gréco-latins qui permet de contrôler plusieurs facteurs, et le "split-plot" et "confounding" qui permettent un contrôle de l'hétérogénéité confondue avec une ou plusieurs sources de variation.

Tous ces plans d'expérience théoriques doivent être adaptés à chaque situation individuelle et aux contraintes pratiques. Pour définir la taille des parcelles, la prise en compte de la taille du matériel agricole est nécessaire et de la même façon, la taille des blocs peut être limitée par d'autres contraintes comme le système d'irrigation ou la taille de la parcelle par exemple.

D.2. Méthodes de correction du milieu.

Les méthodes de correction de la variabilité spatiale peuvent porter sur les sources de variabilités permanentes et sur les sources de variabilités induites.

Les sources de variabilité permanentes :

Elles sont liées à l'origine de la constitution du sol. Sous certaines conditions ou pour des impératifs majeurs d'expérimentation, des corrections peuvent être envisagées : un champ en pente peut être sujet à nivellement, l'état chimique d'un sol peut être modifié par des amendements massifs.

Les sources de variabilité induites:

Elles sont en nombre plus important et provoquées par des interventions de l'homme. Ces interventions peuvent porter sur l'amélioration de la structure du sol, sur la modification mineure de sa composition chimique et sur le choix des itinéraires techniques.

La structure du sol ainsi que sa stabilité structurale peuvent être améliorées par des apports humiques ou calciques ainsi que par le travail du sol.

La composition chimique peut être modifiée par des amendements minéraux et organiques qui corrigent un déséquilibre identifié. Les carences importantes ne peuvent pas être corrigées rapidement.

Les sources de variabilité induites par les itinéraires techniques peuvent être partiellement corrigées par modification d'un outil, d'un réglage ou par introduction d'une technique (irrigation par exemple).

Conclusions :

Nous avons vu dans cette partie l'importance de l'échantillonnage pour caractériser la variabilité. Afin d'être efficace celui-ci doit exploiter au mieux les informations connues sur cette variabilité. Pour cela nous prendrons en compte dans le plan d'échantillonnage :

- un échantillonnage aléatoire pour caractériser la variabilité de grandeurs dont la répartition n'est pas connue à priori (profondeur du sol).
- un échantillonnage " supervisé " pour mieux appréhender les effets de certains facteurs comme les antécédents cultureux.

Toutes les mesures doivent être géo-référencées afin de pouvoir faire ressortir des structures spatiales.

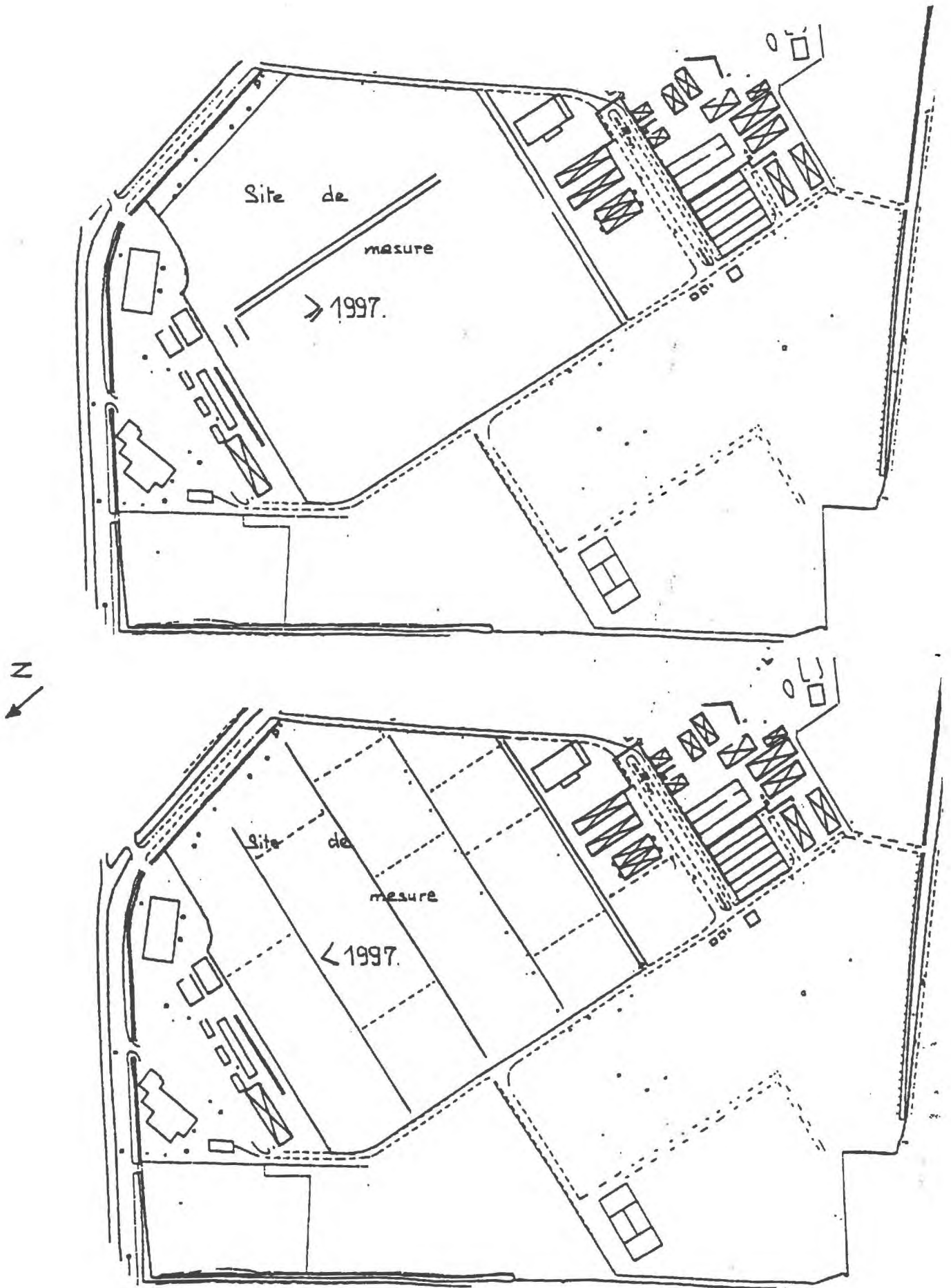


Figure 1. Le site de mesure

3. MATERIELS ET METHODES.

La parcelle sur laquelle ce travail a été réalisé se situe sur le domaine expérimental de l'INRA d'Avignon. Elle a fait l'objet, sur deux années d'un remembrement pour des raisons scientifiques et on se propose d'en caractériser la variabilité sur les deux premières années de culture après le remembrement. En 1997, la première partie remembrée (Ouest) est plantée en maïs et en 1998, la totalité de la parcelle (Ouest et Est) est plantée en blé dur.

A/. LE SITE.

A.1. Localisation.

La parcelle étudiée est localisée sur le Domaine St. Paul situé en région Provence Alpes Côte d'Azur, à 5km au Sud-Est de la ville d'Avignon et à une altitude de 30 m au-dessus du niveau de la mer. Avignon a été construite sur la rive gauche du Rhône, dans une plaine constituée par les apports alluviaux de la Durance. Au confluent du Rhône, limite du département du Gard, et de la Durance, limite du département des Bouches du Rhône, Avignon est située à l'extrême Sud-Ouest du département du Vaucluse.

A.2. Historique.

C'est en 1953 que l'INRA quitte les murs d'Avignon pour s'installer sur le Domaine St. Paul situé à 2 km à l'Est de la ville. Constitué au départ de 5 ha, le domaine en compte aujourd'hui une trentaine. Très vite se pose le problème de l'antagonisme de certains programmes de recherches nécessitant des interventions et des environnements différents. En effet, pour réaliser un certain nombre de mesures de flux atmosphériques, les unités du Département Environnement et Agronomie souhaitent un terrain dégagé, sans brise-vent et avec des cultures "basses". En revanche, les programmes en arboriculture fruitière nécessitent de conserver des haies brise-vent. Il est donc décidé de procéder en 1995 au regroupement des espèces sur le domaine en transférant les vergers dans la partie Est et en regroupant les anciennes subdivisions de la partie Ouest en un seul site de mesures. L'implantation d'une grue roulante sur un rail de 120 m de long, orienté N/S, complète le dispositif pour les mesures aériennes.

Ce site de mesures permet de disposer d'un outil commun à plusieurs équipes de recherche. Les souhaits communs aux différentes unités utilisatrices du site de mesures sont de deux ordres:

- disposer d'un certain nombre de mesures connues sur la parcelle.
- s'assurer que la variabilité intra-parcellaire peut être réduite au minimum.

Antérieurement à notre étude, la subdivision parcellaire permettait de disposer d'une zone d'essai, sous forme modulaire, avec au départ une unité de base de 2500 m² évoluant selon la demande (figure 1). Le regroupement de la totalité de ces modules a permis d'obtenir une surface de 2,6 ha.

La mise en place de cultures annuelles sur ce site a nécessité l'arrachage des vergers et des haies de cyprès sur les parties Ouest pendant l'automne et l'hiver 1994. Un nivellement au laser a été réalisé sur cette zone au cours de l'été 1995. Simultanément, des mesures de niveau ont été prises pour que le nivellement de la partie Est puisse être réalisé après l'arrachage des vergers et des cyprès pendant l'automne et l'hiver 1996. Le nivellement de cette zone a été

réalisé en juillet 1997. Au total, la diversité des espèces mises en place, les différentes durées d'implantation, les itinéraires techniques différents, les haies de cyprès et les anciens chemins ont induit une hétérogénéité du site, traité aujourd'hui de manière uniforme quant aux techniques culturales.

La variabilité présente sur ce site peut être liée à l'histoire des précédents culturels, au sol et à la climatologie. Pour la climatologie, on ne s'attend pas à d'importantes hétérogénéités hormis les problèmes de bordure liés au vent, caractéristique du climat Avignonnais, et éventuellement le ruissellement qui peut redistribuer les apports d'eau lors des fortes précipitations, dont l'occurrence est loin d'être négligeable. Le sol est composé de matériaux alluviaux avec une stratification nette d'alluvions grossières en profondeur et des matériaux plus fins en surface. L'examen de quelques fosses montre très clairement la forte variabilité de l'épaisseur des matériaux fins pouvant varier d'un ou deux mètres sur des distances très courtes. Les sondages réalisés ne mettent pas en évidence une organisation de ses sols sur laquelle nous pourrions nous appuyer pour cartographier la variabilité.

Les facteurs à priori qui vont être abordés par la suite concernent essentiellement l'histoire culturelle et les propriétés des sols que l'on essaiera de caractériser et dont on évaluera les impacts sur le développement des cultures présentes en 1997 et 1998.

B/. LE CONTEXTE CLIMATIQUE.

Le climat est de type méditerranéen avec des étés chauds et des hivers frais. Le vent (Mistral) est un des caractères dominants du climat qui abaisse la température et augmente l'évaporation. Les chiffres présentés dans les paragraphes suivants résultent d'un enregistrement sur une période trentenaire (1967-1998) et sont issus des relevés du service AGROCLIM de l'INRA d'Avignon.

B.1. La pluviométrie.

Le cumul annuel moyen est de 691 mm/an avec un minimum de 325 mm/an en 1989 et un maximum de 1020 mm/an en 1994. Le mois d'octobre reste le plus arrosé avec un maximum journalier ayant atteint 159 mm en 1992. Les mois de mai à août constituent une période de faible pluviométrie avec parfois des déficits hydriques importants. Le nombre de jours de précipitation oscille entre 65 et 116 jours.

B.2. La température.

Elle reste relativement douce avec des moyennes minimales de + 8,9 ° C (minima de - 12 ° C en janvier 1985) et des températures moyennes maximales de + 19 ° C (maxima de + 39,7 ° C en juillet 1983).

B.3. L'évapotranspiration.

La moyenne annuelle est de 1004,82 mm avec un écart type de 66,4mm. Les maxima moyens donnent 8,42 mm/jour avec un écart type de 0,63 mm.

B.4. Les vents.

La fréquence moyenne (de 40 %) est importante dans le cas du vent dominant qui souffle dans le sens Nord/Sud. Il s'agit du Mistral qui peut atteindre 140 km/h mesuré à 10 m de hauteur.

placettes 1997

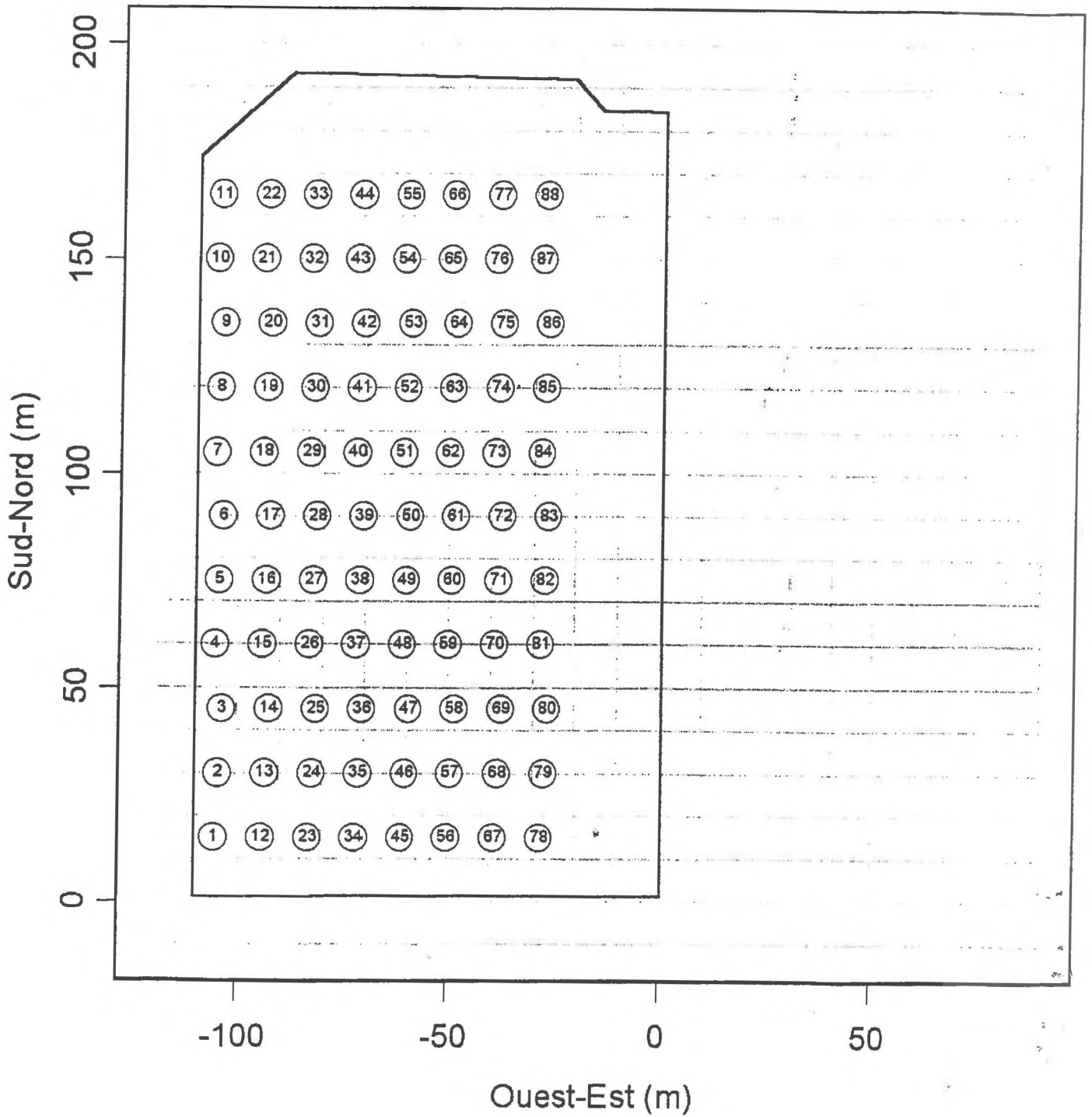


Figure 2. Le plan d'échantillonnage en 1997 sur maïs

Le nombre de jours annuel moyen de Mistral sur la période trentenaire est de 143 jours. D'autres vents sont moins fréquents, d'orientation Nord-Ouest/Sud-Est pour 18% et Sud-Est/Nord-Ouest pour 12 %. Les derniers vents d'orientations diverses inférieurs à 10 %, sont également moins violents.

C/. LES DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX.

Les analyses ont porté sur deux années de culture:

- 1997 caractérisation de la variabilité du rendement sur maïs
- 1998 analyse des inter-actions des variables entres elles.

C.1. En 1997.

Un maïs de type très précoce est implanté tardivement (25 juin) sur la partie Ouest du dispositif expérimental après une culture de colza. La récolte menaçant d'être tardive, il a été décidé de broyer la culture avant maturité pour planter la culture suivante (blé dur).

C.1.1. L'itinéraire technique et les outils associés.

10/06/97 déchaumage du colza au cover-croop,
 11/06/97 labour avec charrue trisocs réversible,
 13/06/97 épandage engrais 15.15.15. (N.P.K.) à raison de 90 unités/ha avec un appareil pendulaire,
 16/06/97 préparation lit de semences avec cover-croop,
 25/06/97 semis maïs variété Eva à 87000 pieds/ha avec semoir pneumatique,
 21/07/97 épandage engrais 33,5 (N) à raison de 67 unités/ha et binage mécanique,
 29/07/97 désherbage au moyen de *Bentazone* (Basagran) à raison de 600 cc/hl avec rampe,
 25/08/97 épandage engrais 33,5 à raison de 134 unités/ha,
 06/10/97 récolte et mesures des placettes,
 16/10/97 broyage maïs.

Enfin 560 mm d'eau ont été apportés par aspersion sur l'ensemble du cycle de la plante. Les apports d'eau ont été raisonnés à l'aide d'un bilan hydrique faisant appel à une connaissance de la réserve utile (RU), des quantités d'eau nécessaires à la plante tout au long de son cycle, et enfin, des ETP et des pluies.

C.1.2. Le plan d'échantillonnage (figure 2).

La parcelle choisie ayant autrefois porté trois haies de cyprès, trois échantillons de deux mètres linéaires de maïs seront prélevés dans chaque ancienne " sous-division ", excepté dans le bloc situé au nord qui n'en comptera que deux étant donné sa taille plus réduite. Le premier échantillon est situé à 10 mètres des deux bords du champ de maïs pour éviter les effets de bordure. Le second échantillon est situé sur la ligne de maïs voisine et séparé du premier échantillonnage par une distance de deux mètres. Le troisième échantillon est situé sur la ligne voisine à l'est et séparé du second échantillonnage par une distance de deux mètres. Cette procédure a permis de récolter 11 prélèvements dans le sens N/S et a été répétée 8 fois d'Ouest en Est sur la parcelle, pour aboutir à 88 échantillons.

placettes 1998

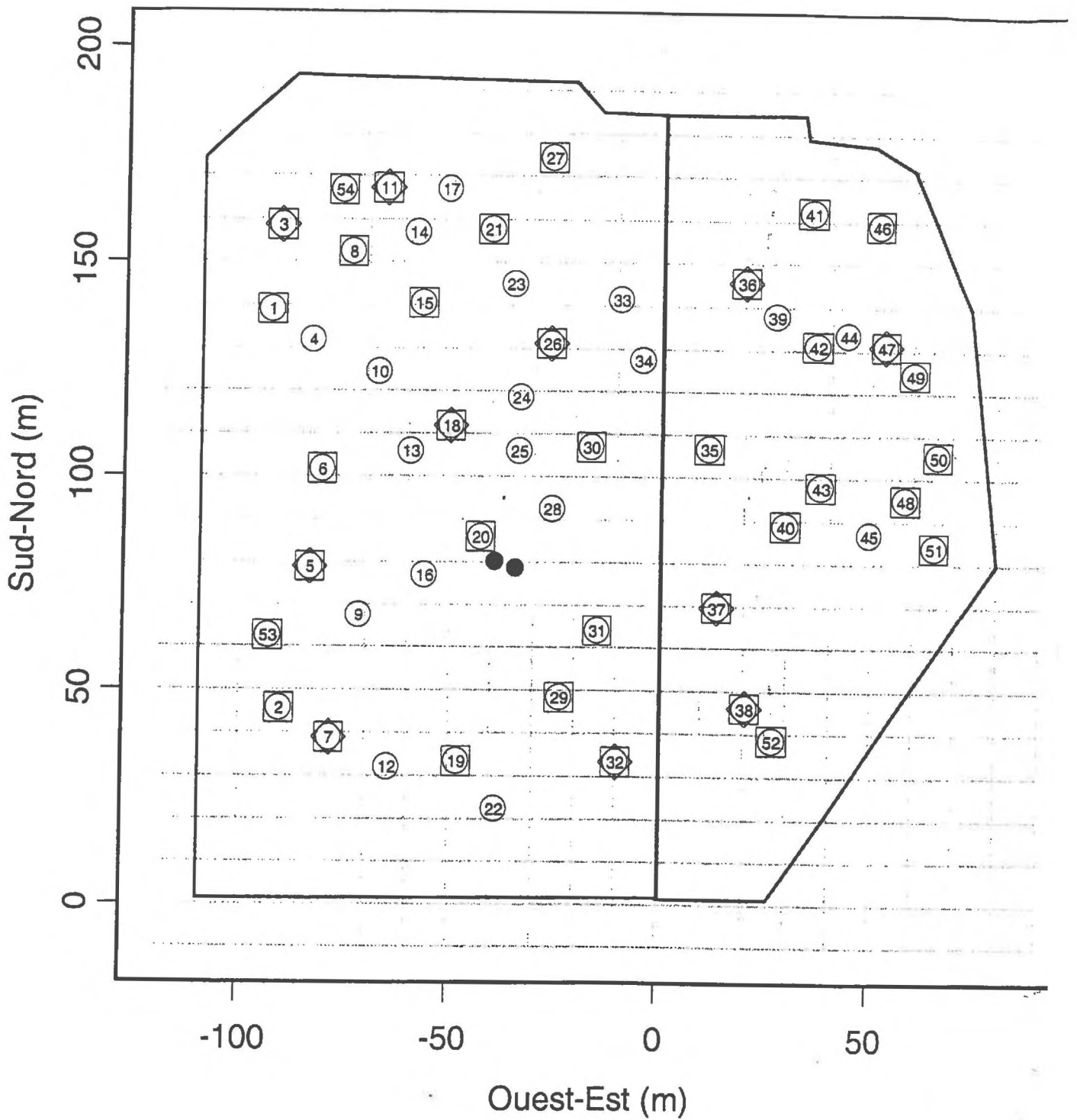


Figure 3. Le plan d'échantillonnage en 1998 sur blé dur

C.2. En 1998.

La culture implantée en 1998 est un blé dur. La parcelle implantée en 1998 est plus grande que celle implantée en 1997 puisqu'elle comprend la partie Ouest du dispositif expérimental (semée en maïs en 1997) et la partie Est du dispositif expérimental qui venait d'être mise à disposition en 1998. En conséquence, l'augmentation du nombre de paramètres mesurés avec des moyens constants sur la culture en 1998, n'a pas permis de réaliser comme en 1997 un quadrillage total de la parcelle. Un dispositif randomisé de 50 placettes, réparties de part et d'autre du rail de la grue, a été mis en place.

C.2.1. L'itinéraire technique et les outils associés.

18/10/97 "déchaumage " au cover-croop,
 21/10/97 labour avec charrue trisocs réversible,
 22/10/97 "affinage" au cover-croop,
 24/10/97 épandage engrais 0.25.25. (N.P.K.) à raison de 100 unités/ha,
 27/10/97 préparation du lit de semences avec cover-croop,
 28/10/97 semis blé dur variété Armet à 200 kg/ha et passage du rouleau croskilette,
 20/02/98 désherbage au moyen de *metsulfuron méthyl* (Allié) à raison de 6 g/ha,
 25/02/98 épandage engrais 33,5 (N) à raison de 67 unités,
 21/04/98 épandage engrais 33,5 (N) à raison de 50 unités,
 07/07/98 récolte des placettes.
 Enfin, 30 mm d'eau ont été apportés le 27 mars et 20 mm le 4 avril par aspersion.

C.2.2. Le plan d'échantillonnage (figure 3).

La position des placettes d'observation sur le terrain (marqués d'un \odot) a été définie selon deux critères :

- représentativité de la parcelle (parties Est et Ouest) en tenant compte des anciennes subdivisions.
- prise en compte des trois anciennes haies de cyprès arrachées avant mise en culture.

Au total, 50 placettes ont été disposées sur la totalité de la parcelle et réparties de la façon suivante: mise en place dans la partie Ouest du rail de 38 placettes et de 12 dans la partie Est qui est de taille moins importante. Une placette sur quatre est disposée sur les anciennes haies (annexe 1). Chaque placette comprend 5 lignes d'un mètre et représente une surface de 0,75 m². Chacune a été repérée sur le terrain en utilisant le rail de la grue comme axe des ordonnées et la haie de cyprès située au sud de la parcelle comme axe des abscisses. Ces coordonnées ont été utilisées pour positionner les placettes sur un plan issu d'une photographie aérienne.

D/. VARIABLES MESUREES ET METHODES ASSOCIEES.

D.1. Le sol.

D.1.1. Caractérisation et granulométrie.

Après étude des précédentes analyses de sol (M. Bourlet en 76 et 92 et Fondasol en 96) réalisées sur le domaine de l'INRA, ayant porté sur un nombre très limité de sites, nous avons refait une série de prélèvements (marqués d'un \square figure 3).

Ces analyses ont été réalisées par le Laboratoire de Sciences du Sol de l'INRA d'Arras et ont concerné, dans un premier temps, 10 placettes réparties sur le site avec 4 horizons différenciés dans les prélèvements: 0-30, 30-60, 60-100 et 100-150. Les prélèvements de sol ont été effectués à la tarière avec une caractérisation systématique de la profondeur de l'horizon caillouteux. Le positionnement des prélèvements a été systématiquement choisi en fonction de l'emplacement des placettes de mesures biologiques (1 m au sud du marquage sud-ouest de la placette), de façon à pouvoir les localiser ultérieurement. Une variabilité chimique notable ayant été décelée dans l'horizon 0-30, la série d'analyses d'origine a été complétée par une série de 20 prélèvements dans les horizons 0-30 et 30-60.

Sur tous les prélèvements, ont été mesurés :

- La granulométrie qui a permis de classer le sol par référence au "triangle des textures" (d'après le Soil Survey Manual, annexe 2).

- Le rapport Carbone/Azote (C/N) (méthode ANNE) qui renseigne sur la richesse de l'humus en azote et peut permettre d'analyser la qualité de la décomposition de la matière organique.

- La Capacité d'Echange en Cations (C.E.C.) mesurée selon la méthode METSON qui donne la quantité maximale de cations retenue pour 100 g de terre.

- Le Calcaire Total (CaT) et le Calcaire Actif (CaA) mesurés selon la méthode DROUINEAU-GALLET.

- Les macro-éléments :

N (azote organique total) mesuré selon la méthode KJELDHAL,

P₂O₅ mesuré selon la méthode OLSEN,

K₂O extrait à l'acétate d'ammonium.

Les trois éléments majeurs n'ont été dosés que dans les 60 premiers centimètres de sol car leur localisation (par les techniques culturales) ainsi que leur absorption (par les cultures), se font préférentiellement dans cet horizon.

- Les oligo-éléments : le Magnésium (Mg) échangeable à l'acétate d'ammonium et le Cuivre (Cu) extractible à l'EDTA (Ethylène Di-amine Tetra-Acétique) car les analyses réalisées antérieurement présentaient des teneurs en cuivre importantes.

D.1.2. Observations sur le sol et sa structure.

- L'état structurel de surface:

L'observation du lit de semence sur les cinquante placettes a mis en évidence une structure superficielle hétérogène directement liée à l'état hydrique du sol au moment de la dernière intervention culturale. Une note pouvant varier de 1 à 3 a été attribuée aux placettes, représentant l'état structurel de surface en fonction de son état motteux :

1 = pas de motte,

2 = mottes < à 5cm

3 = mottes > à 5 cm.

Ces notes ont été attribuées lors de la mise en place des placettes et ont permis d'expliquer des décalages à la levée de la culture, lors du comptage du nombre de pieds par placette.

- La profondeur de sol:

Les études précédentes menées en 1976, 1992 et 1996 avaient mis en évidence un "plancher" caillouteux qui oscillait à différents niveaux dans la parcelle de 0,65 m à 3 m. Le faible nombre de sites de mesures sur la parcelle a été complété par notre étude avec 20 caractérisations simultanées aux prélèvements de sol destinés à l'analyse chimique. Quatre

caractérisations ont été ajoutées à la suite de l'observation de l'indice NDVI géo-rectifié pour contrôler la relation entre image et profondeur de sol.

- Les fosses d'observation :

L'observation du sol et du sous-sol est apparue indispensable dans la recherche de l'origine de la variabilité sur notre parcelle. Il a donc été décidé de creuser deux fosses d'observation dans des zones visiblement hétérogènes sur la photo à l'infrarouge thermique après la récolte du blé dur le 6 Juillet 1998.

Après repérage des 2 sites, les fosses ont été creusées perpendiculairement au labour et au semis, en intégrant un passage de roue de tracteur de la dernière façon culturale. Les dimensions des fosses étaient de 1,60 m pour la longueur, 1,50 m pour la largeur, 2 m pour la profondeur du profil Nord et 1 m pour la profondeur du profil Sud. Dans ce dernier cas, la profondeur de creusement n'a pu aller au-delà d'1 m car à ce niveau, on observait un lit de cailloux difficilement franchissable.

L'observation des profils culturaux dans l'horizon labouré, puis des profils pédologiques dans les horizons plus profonds, a été réalisée selon la méthode mise au point par GAUTRONNEAU et MANICHON en 1983 en débutant par le fond pour remonter vers la surface et en identifiant les couches des différents horizons au fur et à mesure. Ces observations ont porté principalement sur la texture et la structure du sol, sur la colonisation des horizons par les racines, sur la présence éventuelle d'hydromorphie, et enfin sur la présence de cailloux et de débris végétaux.

D.1.3. Teneur en eau et profil hydrique.

La réserve utile du sol a été estimée par différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent : ces grandeurs sont mesurées sur des échantillons en laboratoire en utilisant la presse de Richard (presse à membrane). Les échantillons de terre saturée d'eau sont placés sur une plaque perméable à l'eau mais pas à l'air et sont soumis à une pression qui provoque le départ de l'eau. A l'équilibre, l'humidité est obtenue par pesée de l'échantillon après sa mise sous pression.

L'eau utilisable, appelée réserve utile (RU), est donnée par:

$$RU \text{ (mm)} = (\theta_{CC} - \theta_{pf}) \times P$$

Où θ_{CC} (thêta CC) est l'humidité à la capacité au champ, elle représente l'humidité volumique après ressuyage de 24 h ($m^3 m^{-3}$),

θ_{pf} est l'humidité au point de flétrissement, elle représente le seuil d'humidité volumique au-dessus duquel les plantes ne peuvent prélever l'eau du sol ($m^3 m^{-3}$),

P représente la profondeur de sol (mm).

Les profils hydriques :

Deux méthodes de mesures ont été utilisées pour caractériser les profils hydriques : une méthode gravimétrique et une méthode à base nucléaire.

- méthode gravimétrique:

La teneur en eau gravimétrique est définie par:

$$W = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse de sol}}$$

La masse d'eau est obtenue par différence de masse d'un échantillon de sol avant et après un séchage à l'étuve à 105° C pendant 24 heures. Toutefois cette méthode présente l'inconvénient d'être destructrice. Il n'est pas possible de faire du suivi temporel au même point. Les mesures gravimétriques mises en place avaient deux objectifs : l'étalonnage de sondes neutroniques d'une part et les mesures de variabilité spatiale de la teneur en eau d'autre part. Pour les mesures de variabilité spatiale, deux séries de mesures ont eu lieu le 12/01 et le 20/01/98. Les échantillons ont été prélevés avec un pas de 10 cm de profondeur (marqués d'un \diamond figure 3).

- méthode neutronique:

Le principe de la méthode neutronique est d'effectuer un comptage de neutrons à faible énergie au niveau du détecteur. Ceux ci sont initialement émis par une source radioactive et sont ralentis par des atomes d'hydrogène et des neutrons à faible énergie. Leur nombre, recueilli au niveau du détecteur, est proportionnel à la quantité d'atomes d'hydrogène dans le milieu dont la principale source de variation est la quantité d'eau.

Pour réaliser un profil hydrique on installe un tube en aluminium dans le sol dans lequel on fait coulisser un obus comprenant la source et le détecteur. L'obus peut être placé à différentes profondeurs et on peut ainsi réaliser un profil. Le volume d'investigation de la sonde est une sphère d'environ 10 à 15 cm de diamètre. Les mesures ont été réalisées sur deux sites choisis dans la parcelle et distants d'une dizaine de mètres (marqués d'un \bullet figure 3), à un pas de temps décadaire, débutant le 15 décembre 1997 et se terminant au 21 juillet 1998. Un étalonnage a été réalisé en reliant le comptage moyen des tubes avec l'humidité moyenne à l'échelle de la parcelle recueillie par la méthode gravimétrique.

La densité apparente du sol :

Elle a été mesurée au moyen de deux appareils :

D'une part avec la sonde gamma-métrique de type " LCPC ", particulièrement destinée à la mesure de la densité des 50 premiers centimètres, et d'autre part avec la sonde gamma-métrique de type " solo 40 " pour les horizons plus profonds.

L'utilisation de deux sondes différentes est rendue nécessaire par la précision de la mesure notamment dans les horizons superficiels où les couches sont fortement remaniées.

- Le principe de la sonde L.C.P.C. est de mesurer la transmission du rayonnement émis et d'établir une relation entre le nombre de photons transmis et la densité obtenue. Pour cela, elle est composée d'une source et d'un détecteur séparés par la couche de sol à mesurer.

- Le principe de la sonde solo 40 est de mesurer la rétro-diffusion du rayonnement émis qui est dépendant de la densité du sol. La sonde est composée d'une tête électronique programmable et d'une sonde à positionner sur un tube d'accès installé dans le sol. Les profondeurs de mesure couvrent une plage de 0,20 m à 6 m.

La profondeur de sol:

La profondeur moyenne de sol exploitable par les racines a été observée dans les fosses et estimée grâce à la localisation du plancher caillouteux lors des prélèvements de sols pour l'analyse. Le contrôle à posteriori de cette profondeur a été réalisé à l'aide du logiciel de modélisation STICS (cf plus loin).

Le calcul de la réserve en eau:

La réserve en eau du sol est déduite des mesures d'humidité par la méthode neutronique. La réserve en eau totale (RTOT) est définie par :

$$RTOT = (\theta \text{ moyen} - \theta \text{ pF}) \times \text{épaisseur du sol en mm.}$$

On évalue cette réserve par rapport à la RU en calculant le ratio :

$$\frac{RTOT \times 100}{RU}$$

Lorsque le ratio s'approche de 0, le sol ne permet plus une alimentation normale aux plantes, il y a stress hydrique.

D.2. Conduite de l'irrigation.

La méthode du bilan hydrique, couramment utilisée en agriculture, permet d'ajuster au mieux l'irrigation en fonction des besoins des plantes. Le bilan hydrique peut être calculé à un pas de temps journalier, hebdomadaire ou décadaire.

Il peut s'écrire sous la forme d'une équation:

$$(\Delta \text{ réserve en eau}) = (\text{pluie}) + (\text{irrigation}) - (\text{consommation des cultures}) - (\text{drainage}).$$

- équation dans laquelle le drainage a été négligé car insignifiant.
- la pluie est connue par les données météorologiques enregistrées sur le site par le Service AGROCLIM (INRA Avignon).
- la consommation en eau des cultures est donnée par l'évapotranspiration maximale, elle-même définie par:

$$ETM = ETP \times kc^*.$$

Son calcul nécessite donc la connaissance de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et des coefficients culturaux (kc) propres à chaque culture. Dans le calcul de l'ETM on considère que l'évaporation est maximale et donc qu'il n'y a pas de déficit hydrique. Nous avons considéré que le rendement potentiel de la parcelle serait donc systématiquement atteint avec une conduite de l'irrigation à l'ETM. Pour cela, j'ai calculé la dose hebdomadaire en fonction des pertes par ETM et des apports par la pluie, les apports d'irrigations étant réalisés la semaine suivante sur le maïs.

*Coefficient " kc " utilisé pour le maïs :

Entre 6 et 8 feuilles :	0,8.	
Entre 9 et 10 feuilles :		1,0.
Stade laiteux :	1,2.	
Stade pâteux :	0,6.	

(source Bulletin irrigation et drainage, FAO)

Cette technique n'a pas été utilisé sur la culture de blé dur qui n'est généralement pas irrigué.

D.3. La plante.

D.3.1. Biomasse végétative et reproductrice.

- En 1997:

Les mesures de biomasse ont concerné 88 échantillons de maïs et ont été réalisées lors de la maturité physiologique de la plante. Elles se sont déroulées sur la parcelle avec une balance précise au gramme, et ont concerné:

- la biomasse totale fraîche (Biomtot),
- la biomasse reproductrice fraîche (Biomrep) (épis de maïs de l'échantillon),
- le nombre de pieds (Nbpieds).

- En 1998:

Les mesures sur les 50 échantillons de blé se sont déroulées chronologiquement comme suit:

- lors de la levée de la culture et après le choix de l'emplacement des placettes d'observation. Celles-ci ont été délimitées par la mise en place de quatre baguettes. L'installation d'une cordelette, tendue au sol entre les baguettes a augmenté la précision du comptage du nombre de pieds (NbPieds).

- Avant la moisson de la parcelle: comptage du nombre d'épis (NbEpis) par placette.

- Après la moisson et en laboratoire : pesée de la biomasse totale (BiomTot) avec une précision du gramme.

- Après battage et nettoyage des échantillons, pesée au centigramme de la biomasse des grains (BiomGrain) et du poids de mille grains (PMG).

D.3.2. L'indice de végétation.

Pour améliorer notre connaissance de la variabilité spatiale au sein de la parcelle, une série d'images aériennes couvrant la totalité de la parcelle a été acquise le 18 mai 1998. Le capteur utilisé est une caméra vidéo multi-spectrale *Xybion MSC-02*, qui comprend une matrice CCD de 376*240 pixels (zone utile de 315*238 pixels) devant laquelle tourne une roue portant 6 filtres couvrant les domaines du visible et du proche infrarouge (Tableau 1). Cette caméra est fixée dans la trappe d'un avion volant à environ 1000 m d'altitude et à une vitesse d'environ 56 m/s, sur un axe ouest-est au-dessus de la parcelle. Les six images correspondant aux six filtres sont acquises en 0.1 s, ce qui entraîne un décalage de moins d'un mètre entre chaque image spectrale acquise.

Compte tenu de la taille de la matrice CCD, de l'altitude de l'avion et de l'ouverture de l'objectif de la caméra, la résolution spatiale (taille des pixels) des images brutes est de 0.9 mètres.

Filtre	long. d'onde centrale (nm)	largeur à 50% (nm)	"couleur"
1	465	64	Bleu
2	559	77	Vert
3	603	78	Orange
4	650	88	Rouge
5	751	81	proche IR
6	863	103	proche IR

Tableau 1. Longueur d'onde et couleur associée

Le traitement de ces images comprenait trois étapes :

- calcul d'un indice de végétation
- rectification géométrique
- extraction des valeurs de l'indice de végétation sur les placettes.

a) Calcul d'un indice de végétation:

L'examen des propriétés spectrales (principalement la réflectance dans notre étude) des feuilles dans le domaine solaire (visible et proche infrarouge) (figure 4) montre l'existence de deux domaines bien différenciés : la réflectance des feuilles est très faible (quelques %) dans le domaine visible (400-700 nm) à cause de la forte absorption par les pigments foliaires. Dans le domaine du proche infrarouge (700-1300 nm), la réflectance des feuilles est très élevée (proche de 50 %).

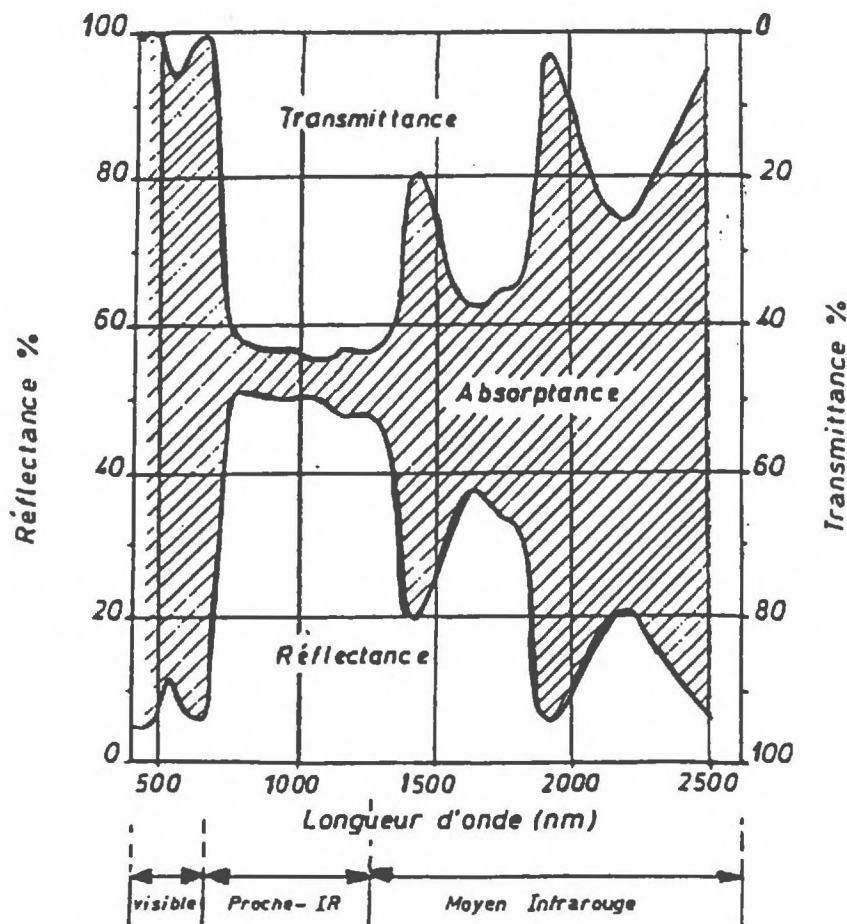


Figure 4. Spectre de réflectance d'une feuille de blé en bonne santé

Au contraire, les spectres de réflectance des sols sont beaucoup plus continus, avec une augmentation quasi-monotone de la réflectance avec la longueur d'onde (phénomènes de diffusion). En conséquence, au cours de la croissance de la végétation, la réflectance d'un couvert végétal augmente dans le proche infrarouge et diminue dans le visible, et l'inverse se produit au cours de la sénescence du couvert, les propriétés spectrales de la végétation sénescente étant assez proches de celle des sols nus.

Ces propriétés sont couramment utilisées pour quantifier le développement de la biomasse végétale (taux de couverture du sol ou indice foliaire) à l'aide de données de télédétection acquises dans le domaine solaire (visible et proche infrarouge). Une des méthodes les plus classiquement utilisées consiste à construire des combinaisons mathématiques des valeurs de réflectance mesurées dans les différents canaux, appelées " indices de végétation " (*vegetation index*). L'indice de végétation choisi dans notre étude est l'un des plus fréquemment employé, la différence normalisée (*NDVI* pour *normalised difference vegetation index*).

Cette différence normalisée est définie par :

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$$

où *PIR* est la réflectance du couvert mesurée dans le proche infrarouge (maximum de réflectance de la végétation), et *R* est celle mesurée dans le rouge (minimum de réflectance de la végétation). La différence normalisée augmente ainsi de façon continue avec la couverture du sol par la végétation, avec des valeurs de l'ordre de 0.1 à 0.2 pour les sols nus et de l'ordre de 0.7 à 0.9 au plein développement de la végétation.

Lors des prises d'images de 1998, la caméra n'était pas étalonnée en réflectance, mais l'un des avantages de la différence normalisée est de s'affranchir partiellement de ce problème, grâce à la normalisation par la somme des réflectances. Les images du canal 4 (rouge) figure 5 et du canal 6 (infra rouge) figure 6 montrent une végétation plus sombre dans le canal rouge et plus claire dans le canal proche IR.

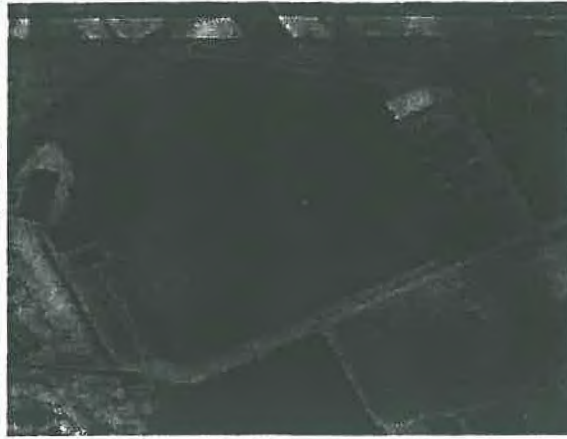


Figure 5. canal 4 (rouge)

Figure 6. canal 6 (proche IR)

L'indice NDVI calculé (figure 7) présente un sol sombre et une végétation claire.

b) Rectification géométrique des images:

La rectification géométrique d'une image consiste à appliquer une transformation géométrique permettant de la rendre superposable à un plan, une carte ou une autre image. Dans notre cas, l'image d'origine a été rendue superposable au plan de la parcelle. Le système de coordonnées finales est défini comme suit :

- l'axe des ordonnées est le rail ouest du chemin de roulement de la grue, qui est orienté selon un axe nord-sud (moins de 1° d'écart avec le nord géographique) ;

- l'origine du repère est l'intersection du prolongement du rail ouest avec la haie de cyprès située au sud de la parcelle. Les coordonnées sont ici exprimées en mètres.



Figure 7. NDVI calculé



Figure 8. NDVI géorectifié

La rectification consiste à appliquer à l'image une fonction de transformation des coordonnées images initiales (x, y) aux coordonnées finales (X, Y) . La fonction de transformation utilisée ici est un polynôme du second degré :

$$\begin{aligned} X &= a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy \\ Y &= a' + b'x + c'y + d'x^2 + e'y^2 + f'xy \end{aligned}$$

Les coefficients a, b, c, \dots, f' sont déterminés par régression sur une série de points dits "points d'amer" de coordonnées connues, bien identifiables sur l'image et bien répartis spatialement sur celle-ci. La rectification a été effectuée à l'aide du logiciel de traitement d'images ERDAS-Imagine, l'image rectifiée et ré-échantillonnée avec une résolution de 1 mètre est présentée sur la figure 8.

c) Extraction des valeurs d'indice de végétation:

L'image étant projetée dans le même repère géométrique ayant servi à déterminer la position des placettes de prélèvements sur le terrain, elle se présente comme une matrice de valeurs d'indice de végétation dont on extrait facilement celles correspondant aux placettes.

La figure 9 présente un codage des couleurs du type "arc en ciel" où les violet/bleu correspondent à de faibles valeurs du NDVI, les vert/jaune à des valeurs moyennes et enfin les orange/rouge à de fortes valeurs.

Remarque: A la suite de l'observation de ces photos aériennes, il a semblé utile de mettre en place 4 placettes d'observation supplémentaires (n° 51 à 54), situées dans des zones correspondant à des valeurs extrêmes de l'indice de végétation ou apparaissant comme très différentes de leur environnement immédiat. Ces placettes amènent une information complémentaire sur la relation entre NDVI, rendement et profondeur de sol et il sera utile de poursuivre les investigations dans des zones qui apparaissent différentes.

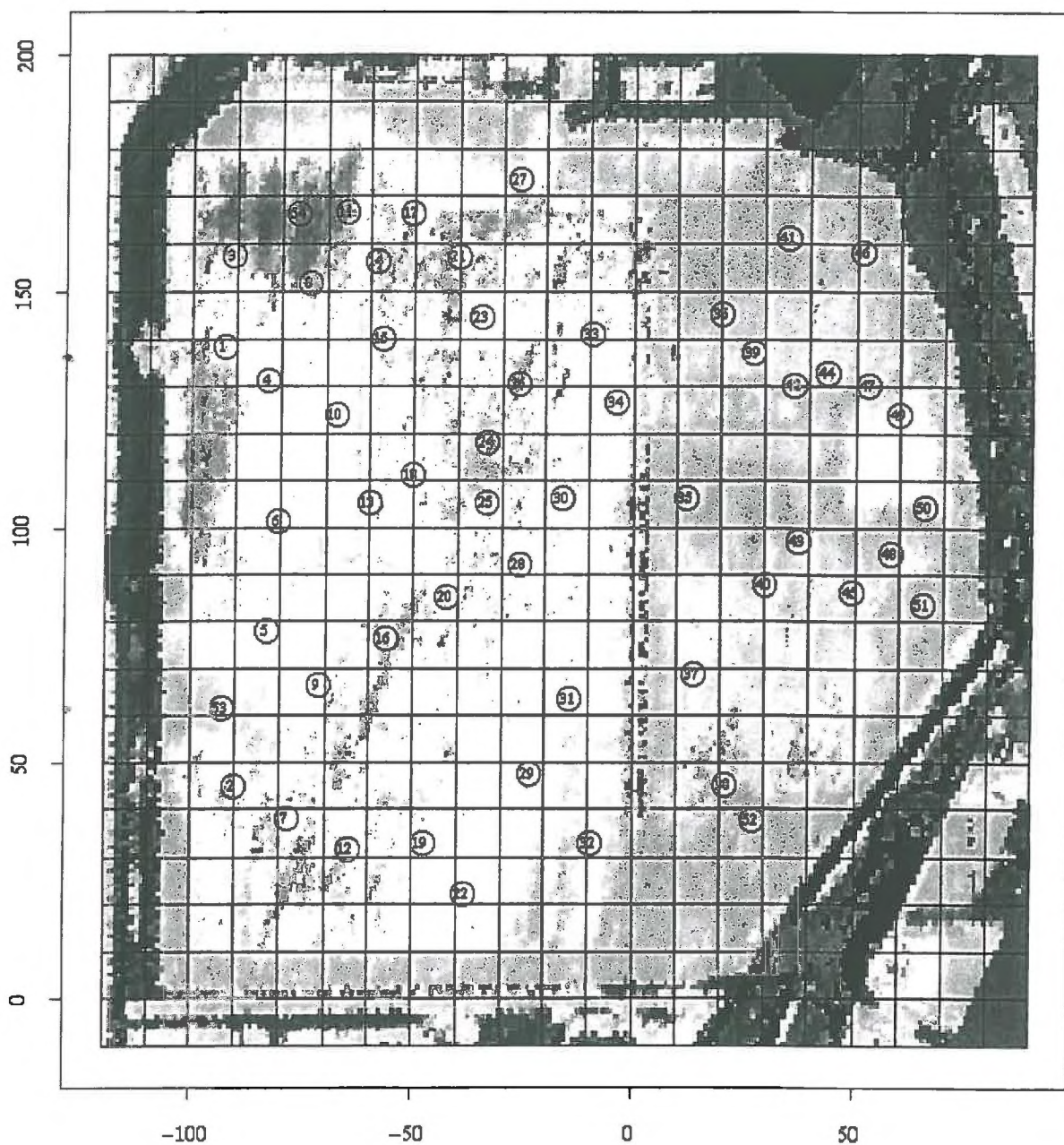


Figure 9. Image NDVI et position des placettes en 1998

D.3.3. Rendement et composantes du rendement.

L'étude des composantes du rendement permet d'analyser l'élaboration du rendement au cours des différents stades physiologiques d'une culture. Elle peut aussi permettre de déceler un accident de végétation comme une limitation de l'alimentation hydrique par exemple. Comme le montre le tableau 2, un suivi des stades physiologiques a été entrepris sur le blé pour permettre de définir à quel stade précis de la croissance de la plante une limitation pourrait être intervenue.

STADE	JAS*	DATE
Jour semis:	0	28/10/97
Levée:	23	20/11/97
Tallage:	56	23/12/97
Epis 1 cm:	127	04/03/98
Montaison:	147	24/03/98
Gonflement:	162	08/04/98
Epiaison:	182	28/04/98
Floraison:	204	20/05/98
Début stade grain laiteux:	214	30/05/98
stade grain laiteux:	216	01/06/98
Fin stade grain laiteux:	223	08/06/98
Début stade grain pâteux :	227	12/06/98
stade grain pâteux :	230	15/06/98
Fin stade grain pâteux :	234	19/06/98
Début stade grain dur :	237	22/06/98
stade grain dur :	241	26/06/98
Fin stade grain dur :	maturité: 250	06/07/98
Récolte:	261	17/07/98

*Jours Après Semis

Tableau 2. Stade végétatif et JAS associé

La décomposition du rendement par composantes peut s'écrire sous la forme :

- Rendement/ha = Poids d'un grain x Nombre de grains/ha.

Le poids d'un grain est élaboré pendant la phase de remplissage qui est conditionnée par deux facteurs : l'alimentation hydrique au cours du remplissage et les besoins en différents éléments nutritifs tout au long de la croissance jusqu'aux translocations.

Le nombre de grains par hectare dépend du nombre de sites potentiels de remplissage qui sont élaborés pendant la phase de croissance et de floraison-fécondation. Là encore, l'alimentation hydrique et les éléments nutritifs sont prépondérants.

L'élaboration du poids d'un grain ne peut pas être plus décomposée mais on peut par contre décomposer le nombre de grains/ha de la façon suivante:

- nombre de grains/ha = nombre d'épis/ha x nombre de grains par épi.

Le nombre d'épis par hectare est élaboré pendant la phase levée, tallage montaison.

Le nombre de grains par épi est essentiellement lié à la fécondation, période courte et ciblée.

L'élaboration du nombre de grains par épi ne peut pas être plus décomposé mais on peut par contre décomposer le nombre d'épis/ha:

- nombre d'épis/ha = nombre de pieds/ha x nombre d'épis /pied.

Le nombre de pieds/ha est élaboré pendant la phase germination-levée qui est une période courte influencée par l'état structurel du sol, la densité de semis, l'humidité à la levée et les attaques possibles de maladies.

Le nombre d'épis /pied est élaboré pendant la phase de croissance correspondant au tallage et à la montaison. Pendant cette période, les quantités d'eau et d'azote conditionnent essentiellement le phénomène.

E/. MODELISATION DES CULTURES POUR L'INTERPRETATION DES VARIABLES.

Le modèle STICS (version 4,0) qui est un logiciel de modélisation du fonctionnement des cultures a été utilisé pour valider les résultats. L'objet simulé par STICS est la situation culturale pour laquelle on peut définir un milieu physique (relatif au climat et au sol) et un itinéraire technique de culture. Les grands processus simulés sont relatifs à la production de la culture (croissance, développement et rendement), à l'évolution des caractéristiques du sol sous l'effet de la culture et enfin aux bilans hydrique et azoté. Son originalité réside dans son adaptation à divers types de plantes et à sa modularité (BRISSON N., 1999).

Après avoir saisi dans les différents modules :

- les paramètres " climat " comme la température, la pluviométrie et l'ETP,
- les paramètres " sol " avec le pH, la granulométrie et les concentrations en quelques éléments majeurs,
- les paramètres " cultures " avec les techniques utilisées, l'irrigation, la fertilisation et le calendrier des différents travaux,
- les paramètres " plante " avec l'espèce, la variété, la précocité et le précédent cultural.

deux types de fichiers de sorties peuvent être réalisés :

Le fichier " composantes du rendement " (annexe 3) reprend toutes les informations citées précédemment et donne des informations sur :

- le cycle de développement de la culture avec les dates théoriques d'apparition des différents stades,
- les composantes du rendement avec des repères théoriques de production et une estimation des résidus pour la culture suivante,

Le fichier " bilan " analyse chronologiquement dans le cycle de la culture les éventuels déficits en eau et en azote exprimés avec un indice compris entre 0 et 1. Les indices tendant vers 0 indiquent une période de stress, inversement, ceux tendant vers 1 montrent une alimentation optimale.

F/. METHODES STATISTIQUES.

F.1. Analyse uni-variable.

Chacune des variables est caractérisée par sa distribution à l'aide d'un histogramme et de deux paramètres classiques : la moyenne et l'écart type.

F.2. Analyse spatiale.

Il s'agit de mettre en évidence la dépendance statistique des observations en fonction de leur distance.

Nous allons présenter des outils statistiques plus ou moins habituels dans la pratique agronomique, notamment les outils d'analyse spatiale, en insistant plus sur les principes que sur les développements mathématiques hors de propos de ce travail. On donnera des références utiles pour tout lecteur désireux d'approfondir ces notions.

F.2.1. Effet du passé culturel.

L'effet bloc a été analysé d'abord graphiquement à l'aide de la " boîte à pattes " (boxplot) qui est une représentation synthétique de la distribution de données. La boîte proprement dite est construite à l'aide du premier et du troisième quartile et contiendra par conséquent 50 % des observations. On représente la médiane par un trait dans la boîte. Les pattes délimitent, de part et d'autre de la boîte, les données proches selon un critère statistique simple (1,5 fois au maximum la longueur de l'intervalle inter-quartile) qui permet de regrouper avec la boîte 98 % des observations dans le cas d'une loi normale (CHAMBERS J.M., CLEVELAND W.S., KLEINER B. et TUKEY P.A., 1983). Les données au-delà des pattes sont individualisées par le symbole " - ". Un test de comparaison des moyennes à l'aide de l'analyse de variance à un facteur dont les modalités seront les blocs, complètera l'analyse graphique.

F.2.2. Dépendance spatiale.

Soit une variable aléatoire Z qui sera dans notre étude une variable agronomique ou une caractéristique du sol. On note $Z(s)$ sa réalisation en un point s de la parcelle dont les coordonnées (x, y) ont été mesurées. L'analyse de la variabilité des incréments $Z(s+h) - Z(s)$ du processus entre deux points distants d'un vecteur h (en pratique, on utilisera la distance métrique), sera effectuée sous l'hypothèse de leur espérance nulle et de l'existence d'une covariance fonction de la distance entre points et non des positions. L'outil privilégié de l'analyse spatiale est le variogramme défini par la variance des incréments, soit:

$$2\gamma(h) = \text{Var}\{[Z(s+h) - Z(s)]^2\} = E\{[Z(s+h) - Z(s)]^2\}.$$

C'est une fonction de la distance h entre les points sous l'hypothèse ci-dessus. Une discontinuité à l'origine signale une corrélation qui n'est pas parfaite entre points très proches, une valeur nulle signalant une corrélation égale à un. On appelle la valeur du variogramme à l'origine **l'effet pépité**. Le variogramme est souvent caractérisé par une partie croissante sur un intervalle de distances $[0, a]$ avant d'aboutir à un plateau. La valeur " a " est appelée **portée** et mesure la zone d'influence autour d'un point. Le **plateau**, ou valeur constante du variogramme au-delà de la portée, indique la variance du processus quand les points sont indépendants.

F.2.3. Interpolation et cartographie.

La méthode d'interpolation utilisée est le krigeage ordinaire, méthode consistant à estimer la valeur du processus Z en un point à l'aide d'une somme pondérée des réalisations. Le krigeage a la propriété d'interpoler exactement les points observés. Les pondérations

prendront en compte la distance du point estimé aux points observés (ARNAUD M. et EMERY X., 2000; ISAAKS E.H. et SRIVASTAVA R.M., 1989).

Soit $\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1,n} w_i Z(s_i)$ l'interpolation en s_0 à partir des n observations.

Pour garantir le non-biais de l'estimation, on imposera la contrainte sur les poids: $\sum_{i=1,n} w_i = 1$.

Les calculs, effectués sur une grille fine recouvrant la parcelle, permettront d'établir la carte de la variable étudiée.

Pour l'interpolation, il est nécessaire de modéliser le variogramme à l'aide d'une fonction théorique garantissant que toute combinaison linéaire de valeurs $Z(s)$ a une variance positive (définie positivité). Le choix s'est porté sur le modèle gaussien définie par :

$$\gamma(r) = P_0 + C (1 - \exp(-r^2/a^2))$$

où P_0 est l'effet pépite, C le plateau et $a/\sqrt{3}$ la portée utilisée en pratique.

Le variogramme sur les points observés distants de h est estimé par le variogramme empirique:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{(i,j)} (z(s_i) - z(s_j))^2$$

La sommation étant effectuée sur les paires (i,j) telles que $s_i - s_j = h$, et $N(h)$ le nombre de ces paires.

Le modèle théorique est ajusté sur le variogramme empirique par la méthode des moindres carrés pondérés.

F.3. Liaison entre variables.

F.3.1. Analyse exploratoire d'un ensemble de variables.

Nous utiliserons le diagramme de corrélation qui permet de visualiser les nuages de points de chaque paire de variables sur une page et de repérer la forme d'une relation et notamment linéaire. Toutes les corrélations linéaires seront présentées au seuil de 5 % ($p \leq 0,05$).

F.3.2. Modélisation d'une relation.

L'approche exploratoire consistera à construire une relation en faisant glisser une fenêtre au voisinage des observations et d'estimer ensuite la régression linéaire locale (SCHERRER B., 1984 ; TOMASSONE R., LESQUOY E. et MILLIER C., 1983). Ceci afin d'évaluer la pertinence d'un modèle linéaire global.

La liaison linéaire entre deux variables X et Y est exprimée par :

$$Y = a + bX + \text{erreur.}$$

Y est la variable expliquée par X . L'estimation de la pente et de l'ordonnée à l'origine consiste à minimiser la somme des carrés des écarts entre valeurs observées et les valeurs prédites par la droite.

F.4. Analyse des composantes du rendement.

L'analyse des composantes du rendement a été réalisée à l'aide d'une régression linéaire simple. Cette analyse a porté sur la décomposition de la formation du rendement par la formule : poids d'un grain x nombre de grains, puis la décomposition de l'élaboration du nombre de grains par la formule: nombre d'épis x nombre de grains par épi et enfin la décomposition de l'élaboration du nombre d'épis par la formule: nombre de pieds x nombre d'épis par pied.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

L'analyse de la variabilité a porté sur celle liée au sol et celle liée à la couverture végétale.

A/. VARIABILITE LIEE AU SOL.

A.1. Présentation globale.

A.1.1. Texture et structure (annexe 4).

Pour les horizons 0-30 cm, 30-60 cm et 60-100 cm la texture (estimée sans décarbonatation) est de type " argile limono-sableuse " avec des teneurs comprises entre 28,7 et 37,8 %. Pour l'horizon 100-150 cm la variabilité est plus importante car sur 8 prélèvements on dénombre : 1 texture de type argilo-limono-sableux (21,6 % d'argile), 5 textures de type argile limono-sableux (28,4 à 39,9 % d'argile) et 2 textures de type argileux (teneur en argile supérieure à 40 %).

Au total, les textures sont assez homogènes dans les horizons jusqu'à 1 m de profondeur, de type " argile limono-sableux ". En revanche les couches plus profondes semblent perturbées par les oscillations du plancher caillouteux qui varient de 0,60 m à 2,00 m (les sondages n'ont pas été réalisés au-delà de 2 m). On peut noter enfin que les différents horizons sont dépourvus d'éléments grossiers sauf lorsqu'il apparaît un lit de gravier ou de galets.

La synthèse des observations sur la structure des deux profils est présentée dans les tableaux suivants :

a/ PROFIL NORD :

Profondeur :	Observations :
0-10 cm	Le sol est brun clair, fragmentaire, meuble et sec. On note la présence de terre fine et de mottes compactes; aucune trace de roues de tracteur.
10-45 cm	L'identification de bandes de labour est possible (" lissage" à 45 cm). La structure présente des mottes assez cohérentes mais poreuses. On note la présence de matière organique (essentiellement maïs) entre 25 et 45 cm en état de décomposition avancée (reste des fibres). Cet horizon présente un aspect hétérogène avec mottes et terre fine; colonisation racinaire importante.
45-55 cm	La structure massive possède peu de fissures et a probablement gêné le passage et la croissance des racines. La présence d'un lissage à 55 cm pourrait être dû à un passage ancien de sous-soleuse. La colonisation de l'horizon par les racines est toutefois correcte.
55-120 cm	La structure est ici massive avec des fissures et une forte porosité structurale, on note également la présence de fentes de retrait. Le sol est frais, devenant sec vers le haut; texture limono-argileuse avec présence de sable.
120-170 cm	On note la présence d'une légère hydromorphie ancienne qui semble héritée des différents battements de la nappe phréatique. D'une manière générale, l'horizon est bien colonisé par les racines; texture limono-sableuse
170-195 cm	Les racines sont dans des pores assez gros de 3 à 4 mm, tapissés à l'intérieur de matière organique descendue soit par les racines ou par les cavités qu'elles ont laissées, soit par des galeries d'animaux ou des fissures. L'humidité est assez élevée laissant la terre se compacter à la main; texture sablo-limoneuse.

Au total la structure du sol du profil Nord semble assez favorable à un bon enracinement excepté dans les horizons où la structure est massive (45-55 et 55-120 cm). La culture précédente a été enfouie en totalité (maïs) et le sol présente en conséquence une importante teneur en matière organique encore non décomposée.

b/ PROFIL SUD :

Profondeur :	Observations :
0-10 cm	Agrégats de terre fine et aspect grumeleux, lissage constaté sur mottes cohérentes imputable au passage d'un outil de type houe rotative. Présence importante de racines ayant colonisé l'horizon; pas de trace de roue de tracteur.
10-40 cm	
40-75 cm	Les bandes de labour sont massives et fissurées, le reste est fragmentaire. Les mottes sont compactes et sèches alors que les zones poreuses sont plus fraîches, présence d'une zone humide à 35 cm avec gradient plus sec vers le bas. La matière organique est présente dans tout l'horizon mais plus concentrée dans la zone 25-40 cm. Les racines sont présentes sur tout l'horizon, tous les 3 à 4 cm et on dénombre peu de cailloux; texture limono-argileuse.
75-100 cm	La structure est polyédrique, massive avec des fissures. Le sol est fortement cohérent et sec, les fissures sont remplies de racines uniformément réparties. Encore quelques cailloux et graviers de 2 à 5 cm; texture limono-argileuse. On note ici un mélange de terre fragmentaire polyédrique en faible quantité et de graviers et cailloux arrondis (de 2 à 20 cm) très abondants. L'ensemble est sec et peu cohérent, garni de radicelles; texture limono-argileuse. Il existe un cailloutis dans le fond du profil, quasi impénétrable aux outils, mais bien colonisé par les racines.

Au total, dans le profil Sud, la colonisation est généralisée et semble s'étendre dans la zone caillouteuse. En deux endroits dans l'horizon 10-40 cm, la compacité est assez marquée sous le labour avec un lissage/découpage par la charrue et localisation de la matière organique (colza, maïs) sur le fond de labour. Comme dans l'autre profil, la présence importante de matière organique est due à l'enfouissement des cultures précédentes.

En conclusion, les profondeurs du plancher caillouteux sont différentes dans les deux sites de creusement des profils. Les racines, dont la présence semble généralisée, présentent un état sanitaire correct. Le sol présente une sensibilité au phénomène de "battance" en surface dans les deux localisations et semble assez marqué par des passages d'outils en condition peu favorable (mottes compactes). La matière organique est présente dans tous les horizons.

A.1.2. Profondeur de sol.

La profondeur moyenne de sol exploitable par les racines a été observée dans les deux fosses (195 cm et 100 cm) et mesurée grâce à la localisation du plancher caillouteux (tableau 3) lors des prélèvements de sol pour l'analyse. Au cours d'un sondage lorsque la tarière buttait sur un obstacle un second sondage était systématiquement réalisé à proximité.. Dans le tableau 3, tous les sondages ne figurent pas (x) car ils ne sont pas accolés à des placettes de mesure numérotées. Ils sont cependant géoréférencés et ont permis de constater que les variations de profondeur pouvaient être très rapides sur de courtes distances. Ils ont aussi permis de mettre à

profondeur pouvaient être très rapides sur de courtes distances. Ils ont aussi permis de mettre à jour une ancienne voie romaine constituée d'empilement régulier de pavés entre les placettes 20, 28 et 31 à 0,65 m de profondeur.

Les profondeurs des côtés Est et Ouest de la parcelle sont relativement homogènes et on ne peut établir de différence. Il existe toutefois des zones peu profondes (0,60) dans lesquelles l'indice NDVI semble indiquer de faibles rendements. Cette hypothèse n'étant pas systématique sur toutes les placettes situées sur ce type de zone, il serait bon de sonder de façon plus détaillée ces zones.

N° plac.	Prof.(m):
2	0,70
3	1,85
5	0,95
7	1,90
8	≥ 2,00
11	1,90
13	≥ 2,00
18	≥ 2,00
21	0,90
26	1,20
29	≥ 2,00
31	1,30
32	1,80
35	≥ 2,00
36	1,20
37	≥ 2,00
38	≥ 2,00
40	≥ 2,00
41	≥ 2,00
42	1,70
46	1,70
47	1,60
49	≥ 2,00
53	0,60

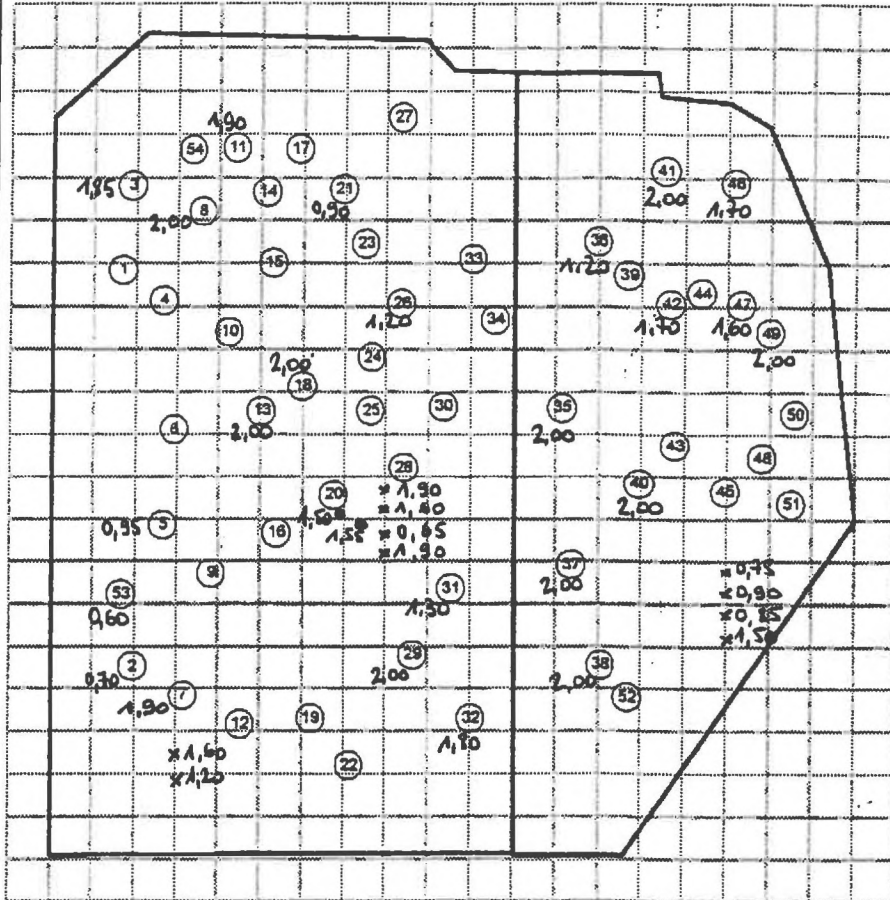


Tableau 3. Profondeur et localisation du plancher caillouteux

A.1.3. Contexte hydrologique et pente.

Comme le montre le tableau 4, les battements de la nappe phréatique sont respectivement de 1,26 m en 1997, de 0,87 m en 1998 et de 1,01 m en 1999. Les hauteurs d'eau en 1998 oscillent de 5,48 m à 6,35 m et en 1997 de 5,24 m à 6,5 m. Un certain nombre de données manquantes ne permet pas de comparer les battements de 1996 et de 1999 avec ceux de 1997 et 1998, mais dans l'ensemble, ces résultats indiquent une stabilité globale du contexte hydrologique entre les deux années et celle-ci semble être confirmée par le début de l'année 1999.

La profondeur de la nappe est située bien en dessous du lit de graviers et il semble difficile de penser que cette nappe ait pu jouer un rôle dans la variabilité du rendement.

MOIS	1996	1997	1998	1999
Hauteur en m.				
Janvier		5,24	6,29	6,24
Février		5,25	6,35	6,78
Mars	5,42	5,42	6,28	6,61
Avril	5,71	5,95	6,19	6,25
Mai	5,84	6,50	6,10	5,77
Juin	5,88	5,98	5,72	5,80
Juillet	5,79	5,87	5,68	
Août	5,51	5,97	5,50	
Septembre	5,53	5,63	5,48	
Octobre	5,50	5,74	5,68	
Novembre	5,46	5,69	5,96	
Décembre	5,63	5,98	6,34	

Battements	0,46	1,26	0,87	1,01
------------	------	------	------	------

D'après " l'usine de production d'eau potable de la Saignonne ".

Tableau 4. Hauteur de la nappe hydrologique d'Avignon

En ce qui concerne les pentes, les faibles courbes de niveau existantes et le nivellement entrepris ont permis d'obtenir une pente de 2 ‰ dans le sens E/O et d'1 ‰ dans le sens N/S. Cette pente est régulière sur la parcelle et semble suffisante pour évacuer les excès d'eau.

A.1.4. Composition chimique du sol (annexe 5).

La teneur en matière organique varie de 14,3 ‰ à 25,8 ‰. Les différences locales sont en partie dues aux précédents culturaux dont les restitutions au sol peuvent être variables. Le rapport C/N (de 7 à 9) montre que le sol possède un degré d'humification élevé. La capacité d'échange cationique ou CEC est peu variable et relativement élevée (sols argileux). Les teneurs en calcaire total (Ca T) classent le sol comme " très calcaire " (> 200 ‰) et les teneurs de calcaire actif (Ca A) comme " chlorosant " avec des teneurs supérieures à 120 ‰. Enfin le magnésium est peu variable sur toutes les analyses avec des teneurs " normales à élevées " de 0,1 ‰ à 0,2 ‰.

Au total, le sol possède un potentiel chimique sans caractère limitant majeur. Le sol est globalement homogène, seuls les écarts de teneurs en m.o. (14,3-25,8 ‰) sont importants.

Concernant les principaux éléments (tableau 5) les teneurs d'azote sont relativement proches d'une placette à l'autre. En revanche, les teneurs en phosphore (de 0,016 ‰ à 0,079 ‰) et potassium (de 0,13 ‰ à 0,42 ‰) reflètent en partie des apports différents dans l'historique cultural. L'observation régulière du feuillage des plantes n'a pas permis de déceler de symptôme caractéristique de carence ou d'intoxication par le cuivre.

Les teneurs couramment admises pour celui-ci se situent autour de 0,4 ‰. Les teneurs de nos échantillons pourraient être toxiques pour les plantes si le pH était voisin de 5 et 6 car c'est à ce potentiel que l'assimilation y est maximale. Le pH de nos échantillons, voisin de 8, bloque l'élément dans le sol, le rendant indisponible pour les plantes.

Elément :	Teneurs extrêmes:	Moyenne:	Commentaire:
N	1,07-1,91 ‰	1,41 ‰	Teneur élevée (moyenne > à 1,2 ‰).
P2 O5	0,016-0,079 ‰	0,06 ‰	Teneur faible (moyenne < à 0,12 ‰).
K2 O	0,13-0,42 ‰	0,35 ‰	Teneur élevée (moyenne > à 0,3 ‰).
Cu	3,6-22,4 ‰	11,6 ‰	Teneur très élevée.

Tableau 5. Eléments chimiques majeurs et Cuivre

A.1.5. Conduite des cultures antérieures.

La diversité des cultures présentes jusqu'à la réunification finale du parcellaire a pu provoquer une variabilité structurale et chimique du sol (enfouissement de quantité de m.o. différentes, accumulation de cuivre). De la même façon que des espèces différentes se sont succédées sur cette parcelle, des itinéraires techniques différents y ont été associés.

L'historique cultural des placettes d'échantillonnage est présenté en annexe 6 pour 1997 et en annexe 7 pour 1998. L'annexe 8 présente la légende utilisée les deux années.

Au total, ces rotations parcellaires associées à des opérations de mise en place et d'entretien de cultures ont probablement contribué à la variabilité observée.

A.2. Statistiques descriptives.

Les histogrammes des variables " carbone ", " matière organique ", " azote ", " phosphore " et " potassium " sont asymétriques (figure 10), signifiant que la fréquence des effectifs dans chaque classe et pour chaque variable est très hétérogène.

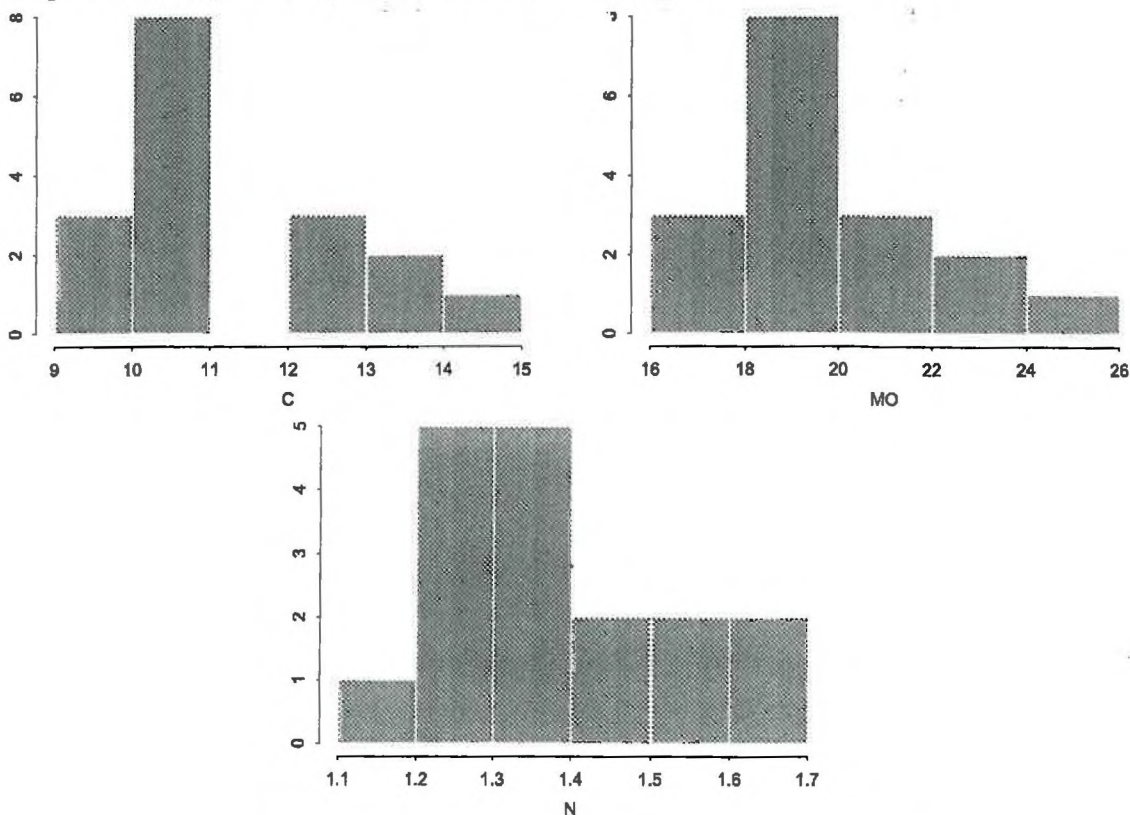


Figure 10. Histogrammes des variables sol C, MO, N

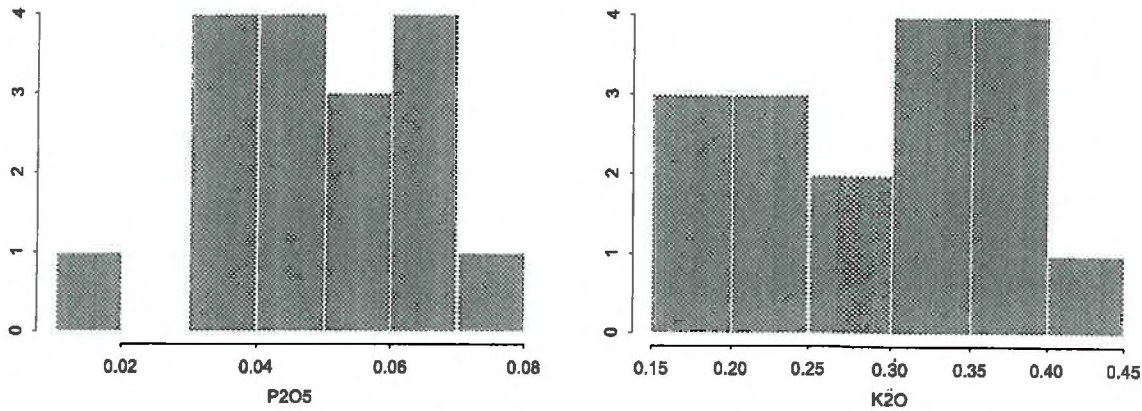


Figure 10 (suite). Histogrammes des variables sol P2 O5 et K2 O

L'analyse des variogrammes (figure 11) sur ces mêmes variables montre qu'ils sont relativement semblables. Ils indiquent des corrélations spatiales pour toutes les variables avec des zones d'influence assez larges, la portée étant de l'ordre d'une quarantaine de mètres.

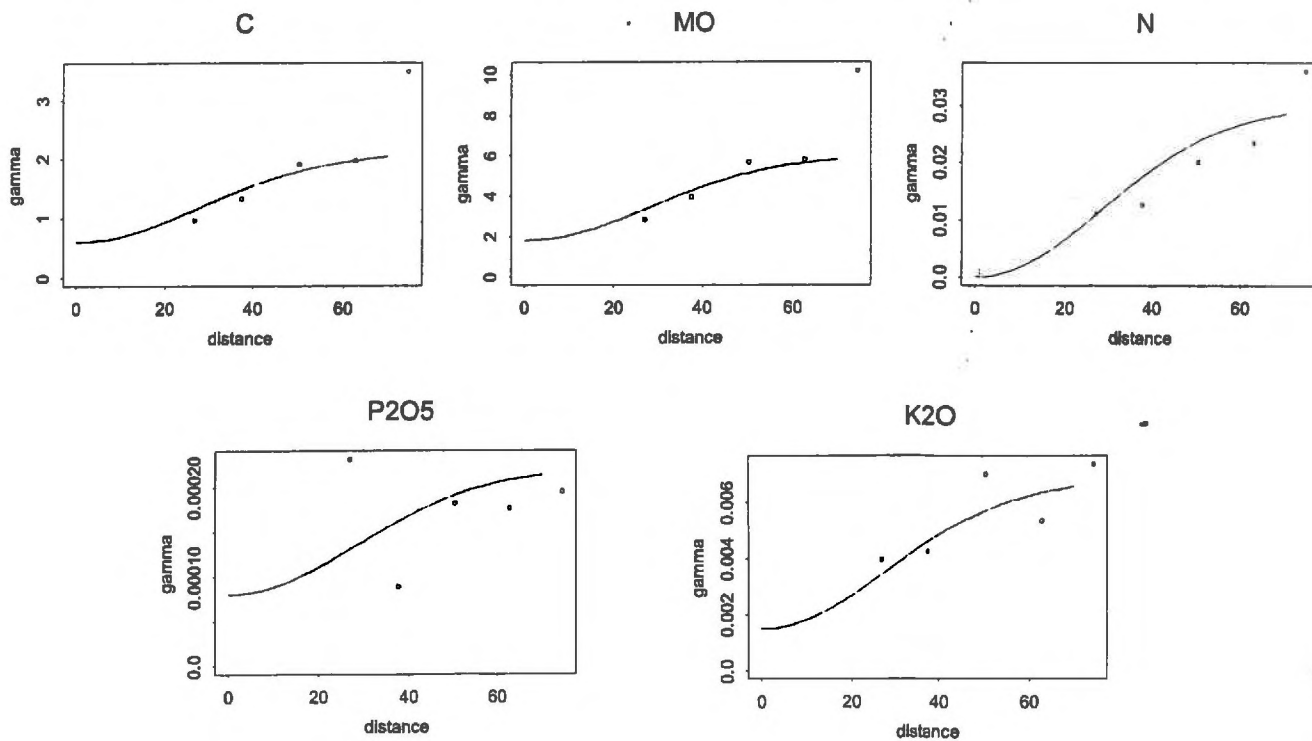


Figure 11. Variogrammes des variables sols

Les cartes réalisées à l'aide du krigeage (figure 12) mettent en évidence deux structures assez semblables entre P_2O_5 et K_2O et entre C et N. Ceci indique que les itinéraires techniques réalisés sur les anciennes parcelles ont probablement contribué à créer cette répartition spatiale comparable pour P et K d'une part et C et N d'autre part. Les axes des cartes sont ici gradués en mètres.

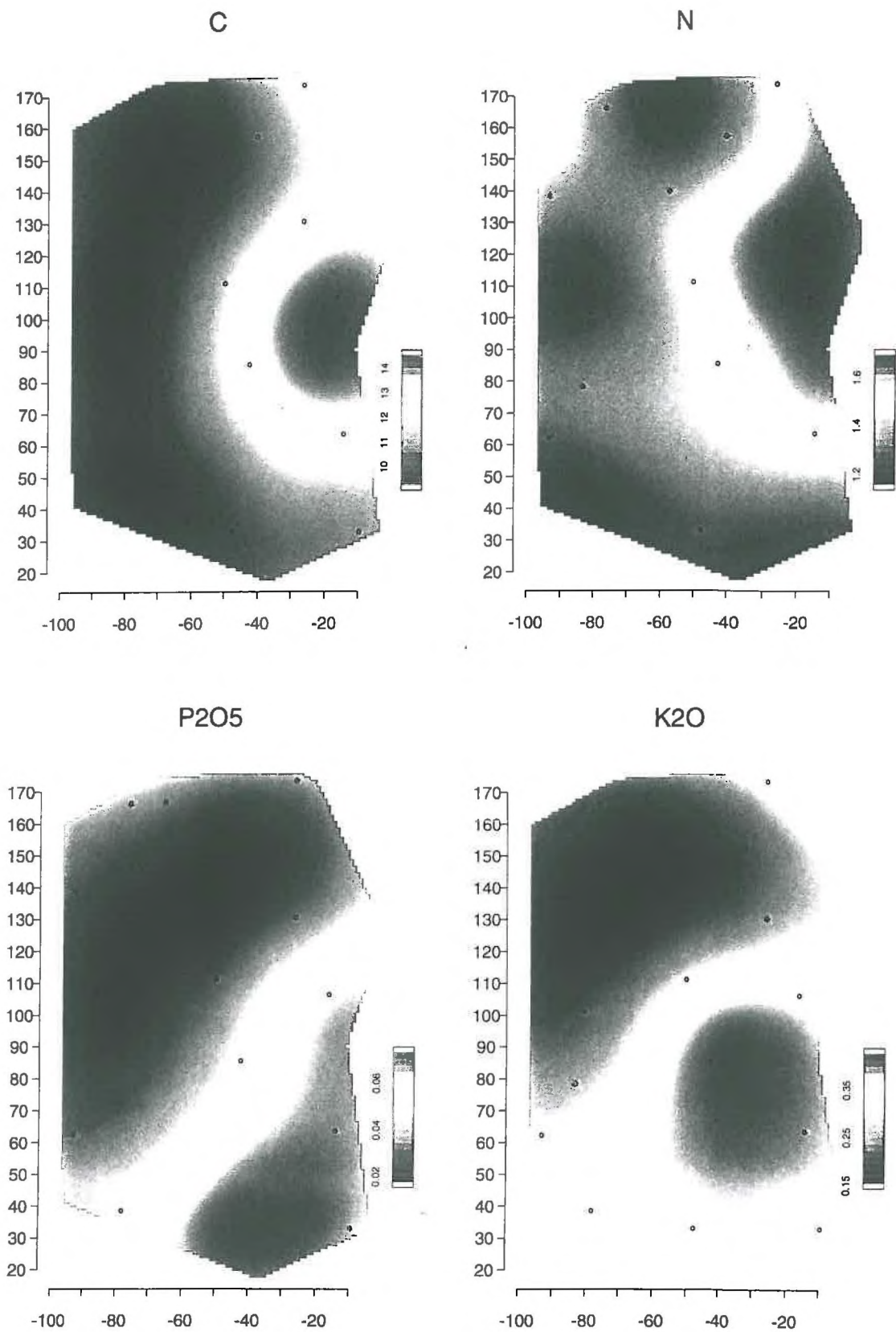


Figure 12. Représentation des richesses en éléments majeurs

Enfin l'analyse exploratoire d'un ensemble de variables mesurées sur le sol est présentée en annexe 9 mais ne sera pas commenté ici.

B/. VARIABILITE DE LA COUVERTURE VEGETALE.

B.1. Analyse statistique globale.

Remarque préliminaire sur la qualité de l'échantillonnage :

L'analyse graphique comparative des données NDVI globales et des NDVI "placettes" montre des distributions proches (figure 13) semblant signifier que l'échantillonnage par placette est bien réalisé. On peut considérer qu'il est représentatif de la population pour pouvoir estimer les paramètres de position et de dispersion de la distribution. Le nombre beaucoup plus important de données de l'image globale permet de mieux affiner la distribution de celle ci.

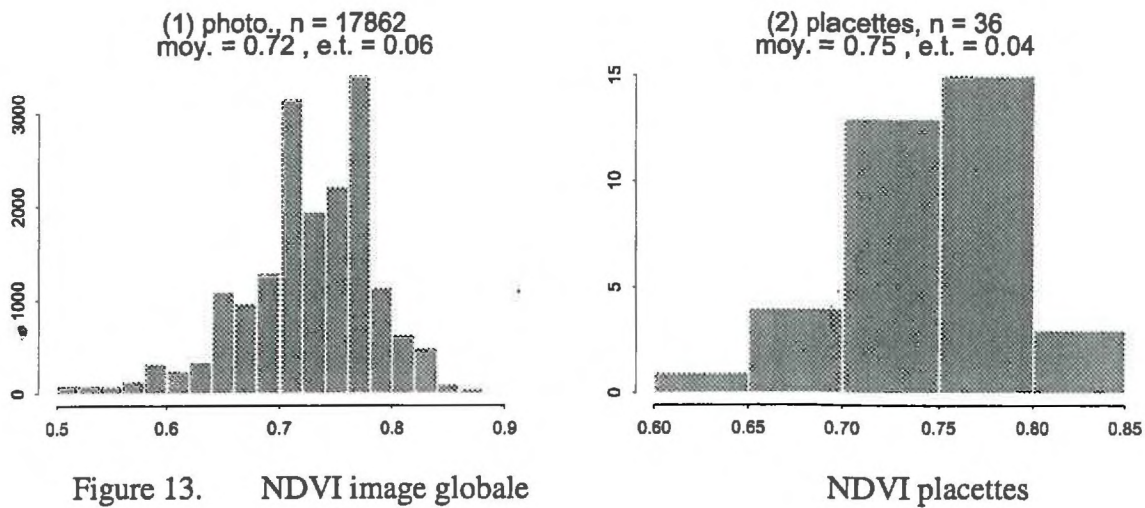


Figure 13. NDVI image globale

NDVI placettes

B.1.1. Expérimentation en 1997.

Les histogrammes des trois variables " biomasse totale ", " biomasse des épis " et " nombre de pieds " sont à peu près symétriques (figure 14).

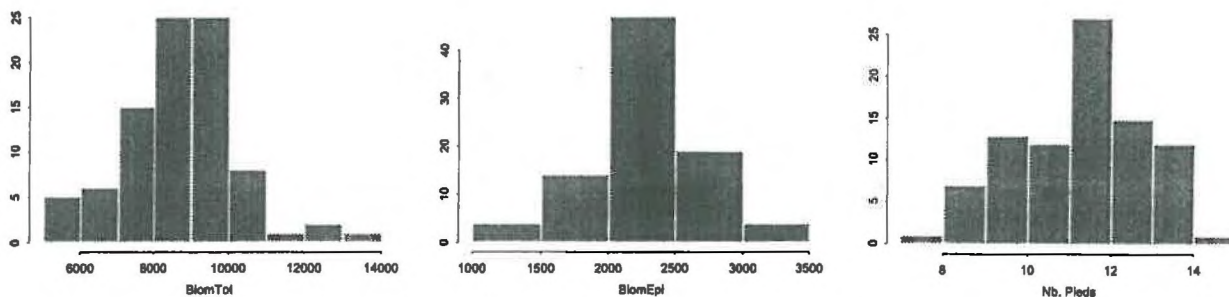


Figure 14. Histogrammes de biomasse totale, biomasse des épis et nombre de pieds

Les analyses de variance ne permettent pas de déceler d'effet bloc dû à l'ancienne subdivision parcellaire pour les variables " biomasse totale " et " biomasse des épis " (figure 15). Seul l'effet bloc pour la variable " nombre de pieds " est significatif, indiquant que les blocs situés le plus au nord de la parcelle présentent des valeurs plus importantes que ceux situés au sud.

Cet écart entre nord et sud est peut être lié à une différence d'état structural déterminant en partie le nombre de pieds.

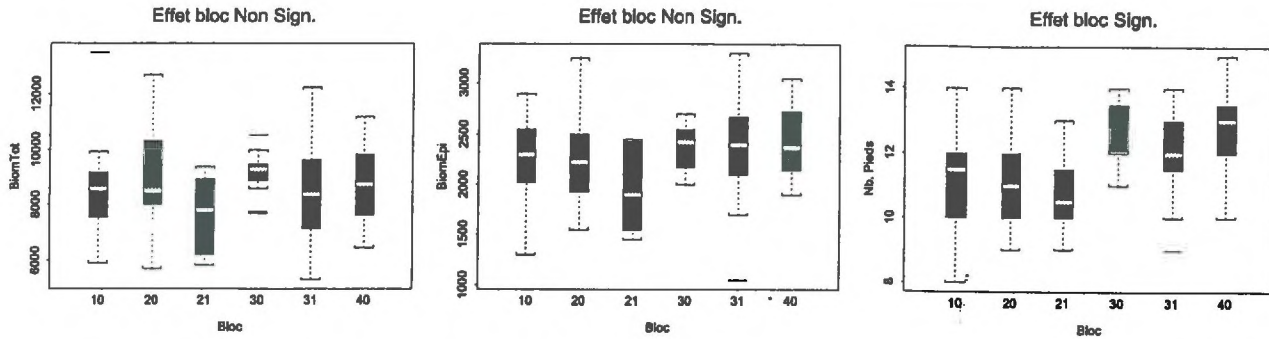


Figure 15. Analyse de l'effet bloc de biomasse totale, biomasse des épis et nombre de pieds

L'analyse des variogrammes (figure 16) montre une forte discontinuité à l'origine (effet pépité). Le rapport effet pépité/plateau est assez élevé indiquant une dépendance spatiale faible dans nos échantillons. Les portées semblent indiquer de faibles zones d'influence autour des points d'échantillonnage et les plateaux indiquent une faible variance du processus.

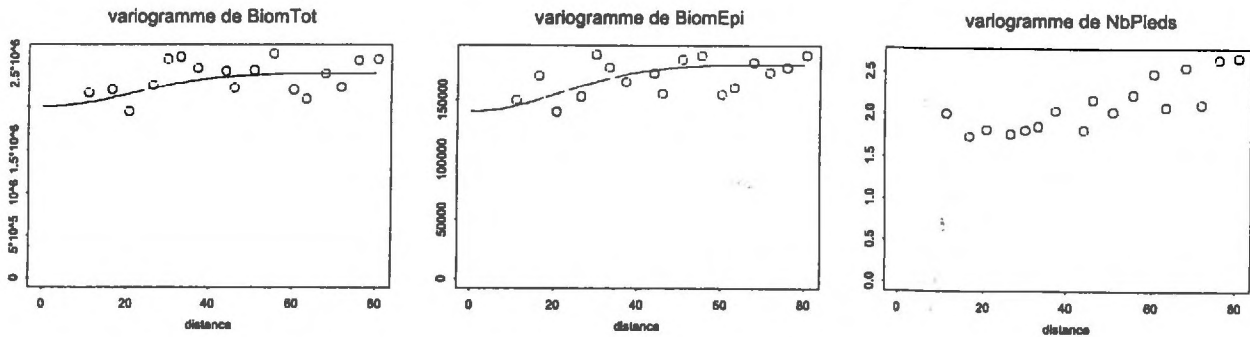


Figure 16. Analyse des variogrammes de biomasse totale, biomasse des épis et nombre de pieds

Au total, les variables biologiques mesurées ne présentent pas de structure spatiale marquée contrairement à des variables caractérisant l'état chimique du sol (figure 11). En conséquence, on peut émettre l'hypothèse que ce n'est pas l'état chimique du sol qui a contribué fortement à la variabilité spatiale du rendement.

B.1.2. Expérimentation en 1998.

Les histogrammes des variables " biomasse des grains ", " nombre d'épis ", " poids de mille grains " et " NDVI " sont sensiblement symétriques (figure 17) et suivent une distribution Gaussienne excepté pour la variable "nombre de pieds".

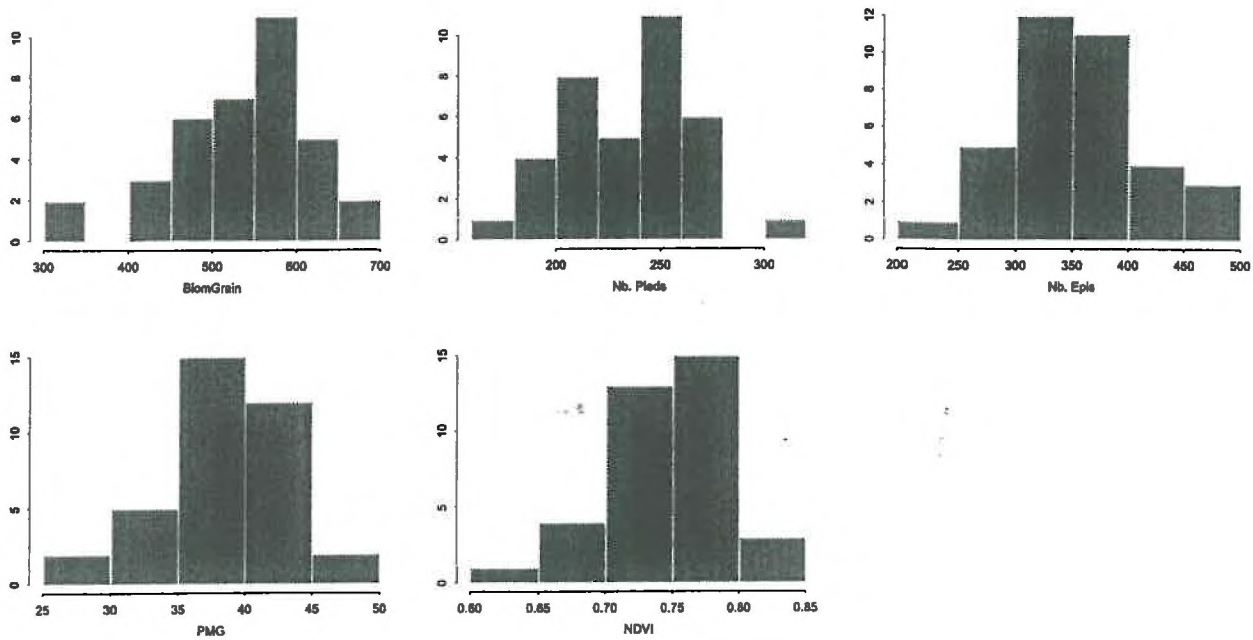


Figure 17. Histogrammes de biomasse grains, nombre de pieds, nombre d'épis, PMG et NDVI

Les analyses de variance ne permettent pas de déceler d'effet dû à l'ancienne subdivision parcellaire (sauf dans le cas du NDVI). Les dispersions à l'intérieur des boîtes à pattes présentent une variabilité importante mais on ne peut ici remarquer de différence entre les blocs situés le plus au nord de la parcelle et ceux situés au sud (figure 18).

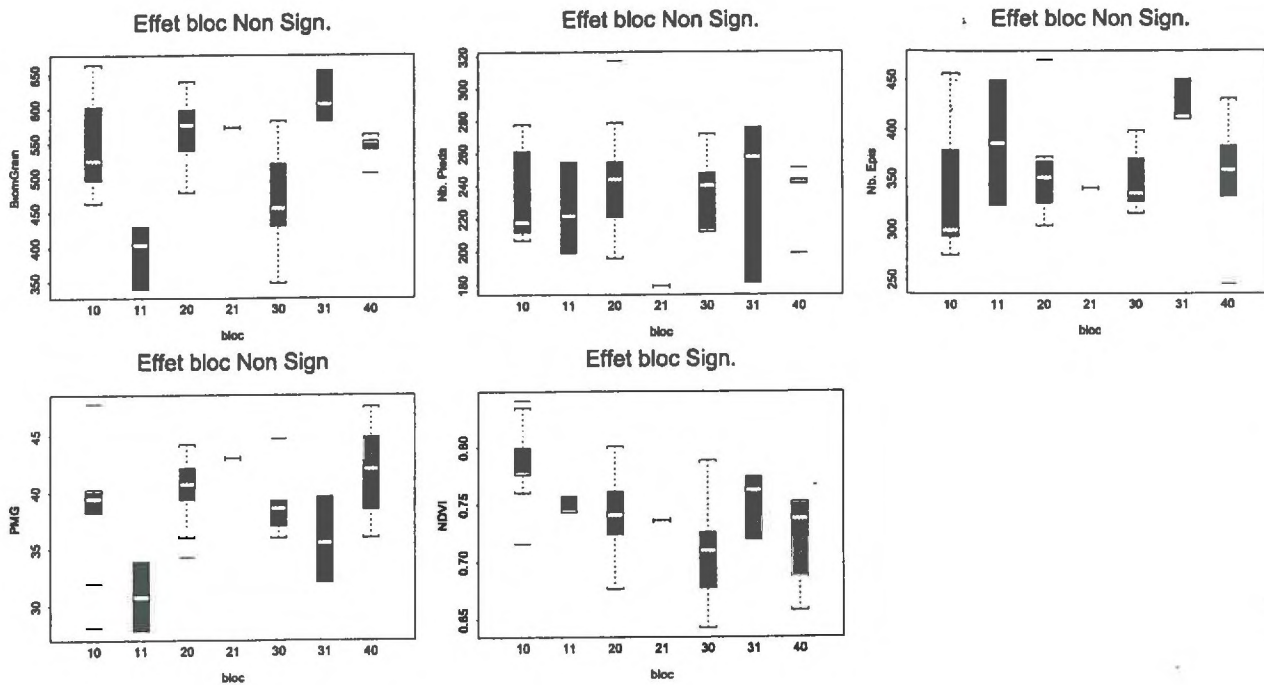


Figure 18.

Analyse de l'effet bloc de biomasse grains, nombre de pieds, nombre d'épis, PMG et NDVI

L'analyse des variogrammes (figure 19) montre peu de corrélation entre les points d'échantillonnage très proches, sauf dans le cas du NDVI qui présente un faible effet pépète relatif. Aucune structure spatiale n'est clairement mise en évidence dans nos échantillons, ce qui tend à montrer leur indépendance. Il faut toutefois relativiser ce résultat étant donné le faible nombre de points de mesures.

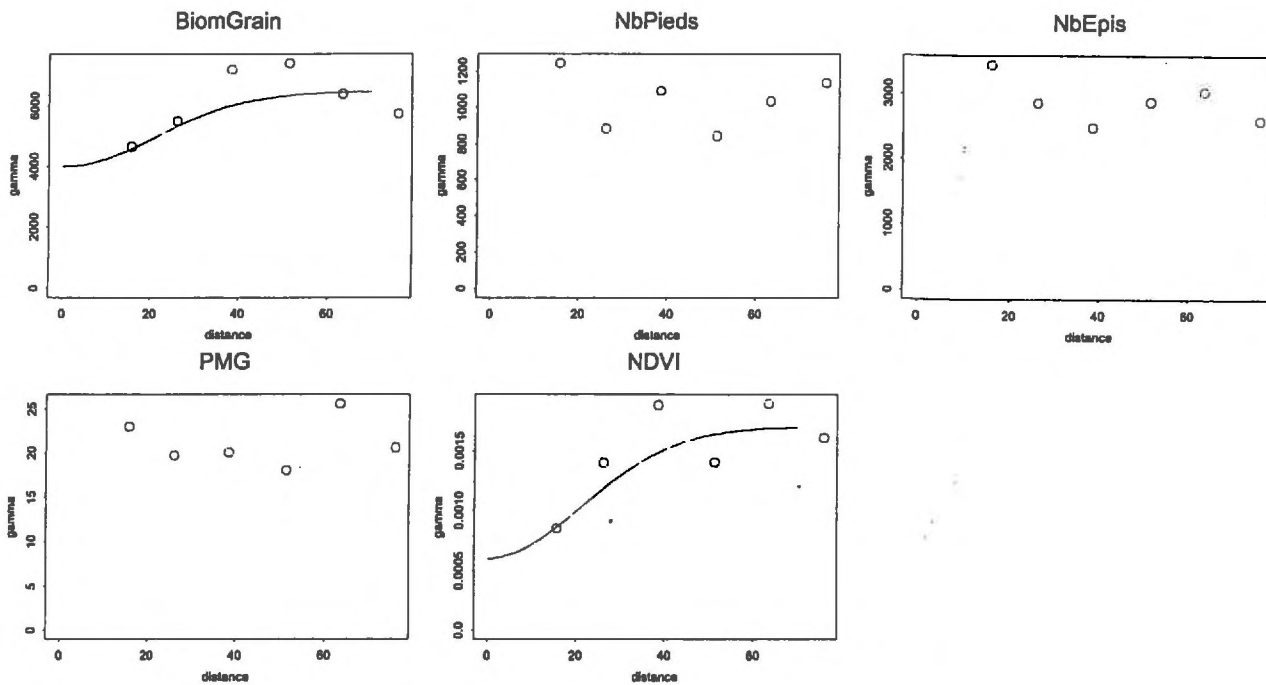


Figure 19. Variogrammes de biomasse grains, nombre de pieds, nombre d'épis, PMG et NDVI

L'analyse exploratoire d'un ensemble de variables mesurées sur le blé dur est présentée en annexe 10 mais ne sera pas commentée ici.

Au total, en 1998 comme en 1997, aucune structure spatiale nette ne peut être mise en évidence statistiquement sur ces variables biologiques.

B.2. Analyse des composantes du rendement.

La mise en relation du rendement avec le poids d'un grain (figure 20) et le nombre de grains (figure 21) montre que le poids d'un grain ne semble pas, ou peu, influencer le rendement ($r^2 = 0,06$). Il faut quand même noter qu'il existe sur la figure 20 une relation non linéaire dans le poids d'un grain semblant indiquer que l'augmentation du rendement est associée à l'augmentation du poids d'un grain jusqu'à un certain seuil. Le nombre de grains par unité de surface est quant à lui nettement plus corrélé avec le rendement ($r^2 = 0,46$).

Puisque le nombre de grains par unité de surface est déterminé pendant la période comprise entre la levée et la floraison, on en conclut que la variabilité du rendement d'un point à un autre de la parcelle a été déterminée pendant cette période alors que la phase post floraison jusqu'à la récolte n'a joué qu'un rôle mineur.

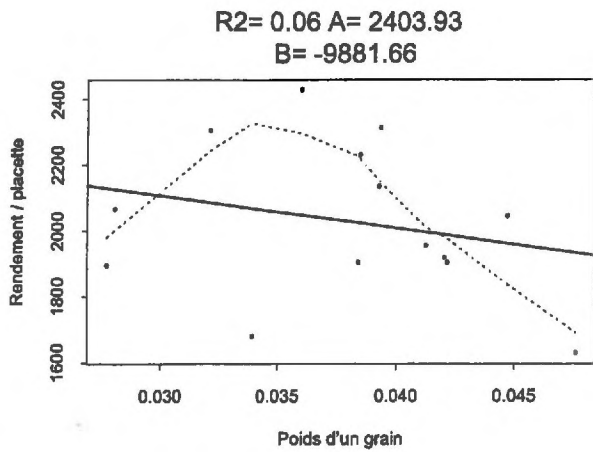


Figure 20. Poids d'un grain

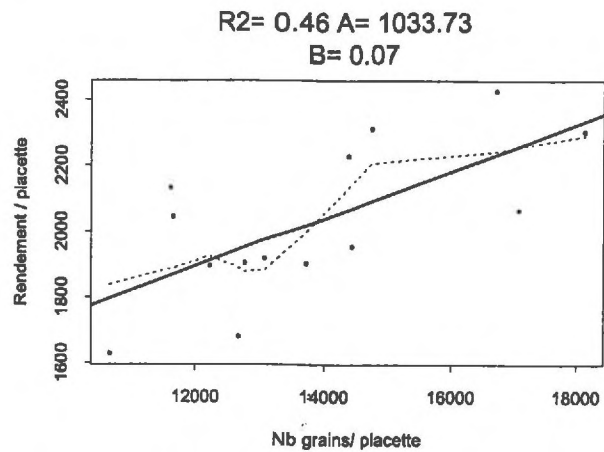


Figure 21. Nb. Grains/placette

L'analyse de la décomposition du nombre de grains par unité de surface en fonction du nombre d'épis par unité de surface (figure 22) et du nombre de grains par épi (figure 23) montre que seul le nombre d'épis par unité de surface influence fortement le nombre de grains par unité de surface ($r^2 = 0,48$). Le nombre de gains par épi ($r^2 = 0,03$) n'intervient que très peu dans la constitution du nombre de grains par unité de surface.

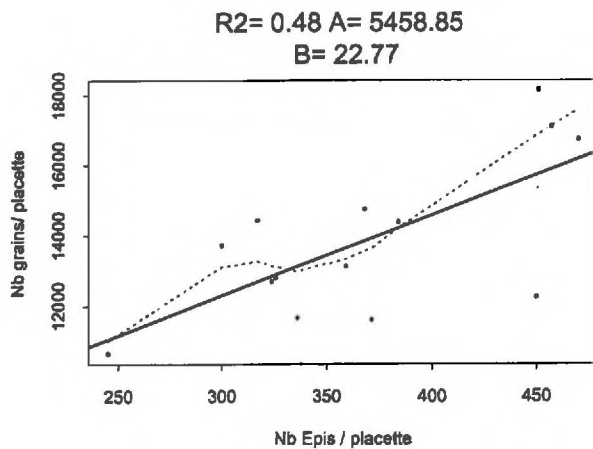


Figure 22. Nb. Epis /placette

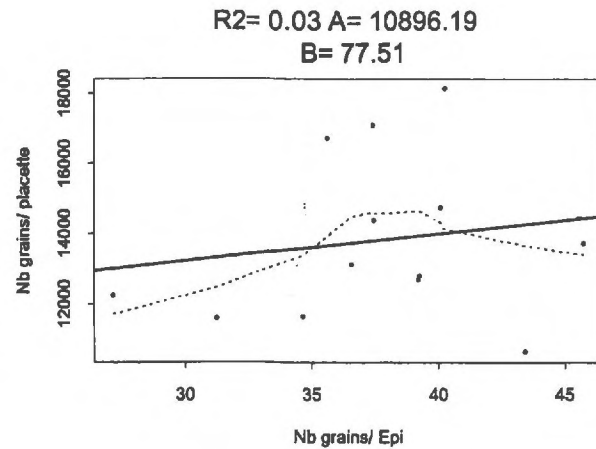


Figure 23. Nb. Grains/épi

Ainsi, la période comprise entre la levée et l'épiaison déterminant le nombre d'épis par unité de surface joue ici un rôle prépondérant alors que la fécondation ne semble pas mise en cause.

Enfin, l'analyse de la décomposition du nombre d'épis en fonction du nombre de pieds par unité de surface (figure 24) et le nombre d'épis par pied (figure 25) montre que seul le nombre d'épis/pied influence fortement le nombre d'épis par unité de surface ($r^2 = 0,60$). Le nombre de pieds ($r^2 = 0,01$) n'intervient pas dans la constitution du nombre d'épis par unité de surface.

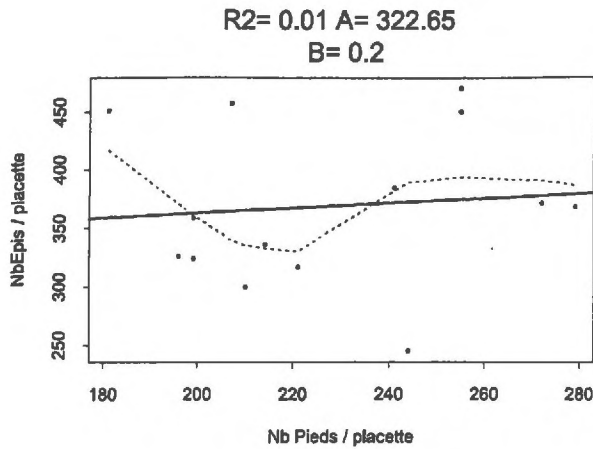


Figure 24. Nb. Pieds/placette

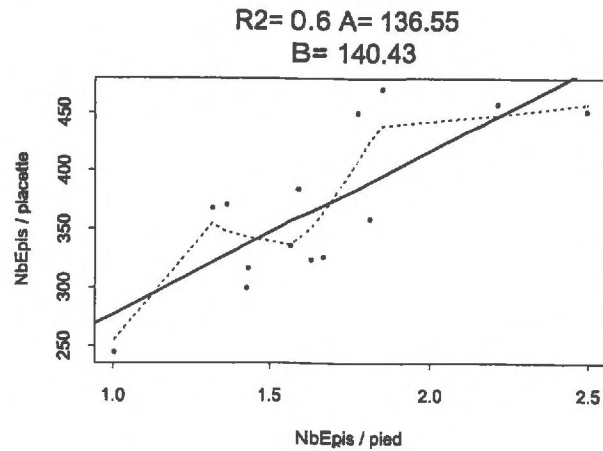


Figure 25. Nb. Epis/pied

Au total, ce sont essentiellement les phases du tallage et de la montaison, situées entre le 56ème jour après semis (JAS) et le 162ème JAS, qui semblent influencer majoritairement le rendement et la variabilité de celui-ci d'un point à un autre de la parcelle. Or, la détermination du nombre d'épis par unité de surface dépend essentiellement des conditions d'éclairement, de disponibilité en eau et en azote.

On peut donc en conclure que, l'éclairement ayant été identique sur la totalité de la parcelle, seuls l'eau et l'azote peuvent être invoqués parmi les variables ayant déterminé le rendement et sa variabilité. Par ailleurs, on peut penser qu'un déficit hydrique a entraîné une limitation de l'absorption azotée et il conviendra de rechercher si l'azote a aussi été un facteur limitant.

B.3. Recherche des facteurs ayant induit une variabilité de rendement.

B.3.1. L'eau.

Les mesures gravimétriques réalisées en 1998 (annexe 11) indiquent des teneurs moyennes en eau oscillant entre 22 à 28 % pour l'horizon [0/50] cm puis diminuant dans l'horizon [50/150] cm avec une amplitude de 10 à 24 % pour terminer au-delà de 150 cm entre 8 et 16 %. Par ailleurs il existe, au-delà de 50 cm, une différence entre l'est et l'ouest avec une amplitude de l'ordre de 10 % d'humidité. L'importance de la teneur en eau dans l'horizon superficiel semble due à la pluviométrie (25,5 mm) de la semaine précédant les mesures.

Les mesures réalisées au moyen des sondes sont présentées en annexe 12 avec les calculs de réserve en eau. Elles ont permis dans un premier temps d'observer globalement l'évolution de la réserve en eau et ensuite d'affiner les résultats en tenant compte de l'étalonnage et des points de repère que sont la capacité au champ et le point de flétrissement.

La figure 26 présente l'évolution de la réserve totale en eau (RTOT) disponible aux différentes profondeurs.

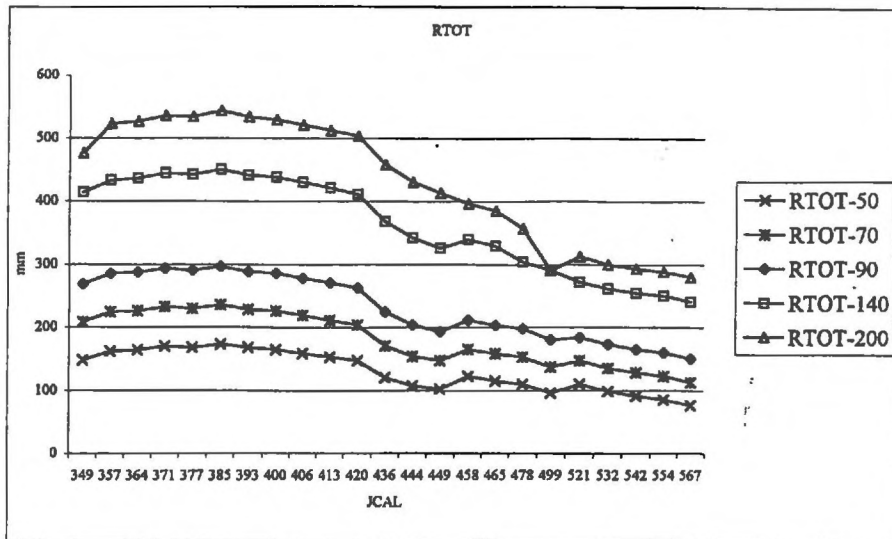


Figure 26. Evolution de la réserve totale en eau du sol

L'évolution de la réserve en eau (exprimée en % de la réserve utile) disponible aux différentes profondeurs, est présentée à la figure 27. Les courbes mettent en évidence une condition hydrique limitante au cours et en fin de montaison du blé. Les couches superficielles sont plus humides que les couches inférieures car l'eau n'a pas encore percolé. Cette eau n'est pas disponible pour la plante dont le système racinaire s'alimente dans les couches plus profondes.

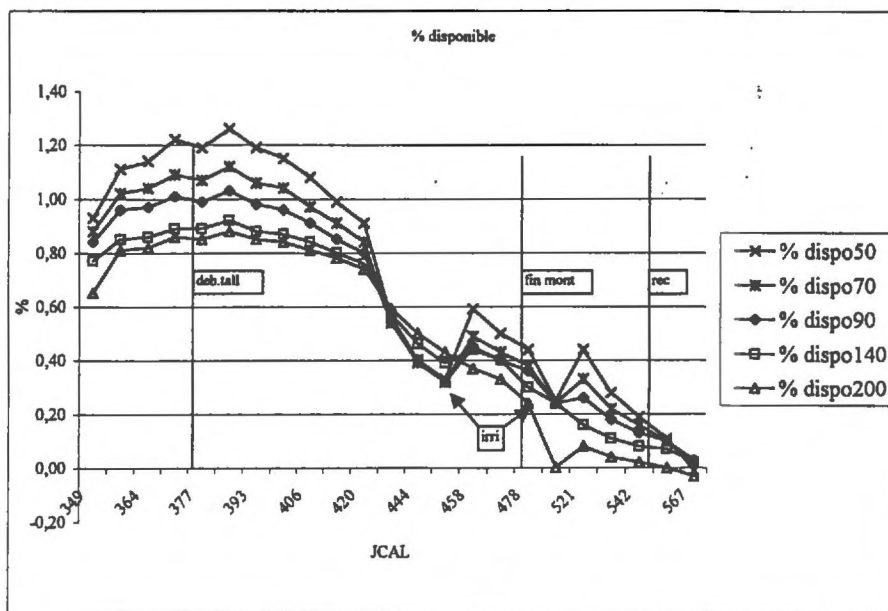


Figure 27. Evolution de la réserve en eau dans les différents horizons

Au total, les résultats présentés ici indiquent la présence d'une variabilité liée à la réserve en eau du sol ainsi qu'à une condition hydrique limitante pendant une phase du cycle végétatif de la culture. On peut penser que si l'eau a joué un rôle de facteur limitant, c'est sans doute au moment de la fin du tallage et d'une partie de la montaison. La pluviométrie ainsi que les ETP ne seront pas commentées mais figurent en annexe 13.

Cette analyse est confirmée par les simulations effectuées par le modèle STICS. L'analyse de l'indice de stress (annexe 14) est présentée sur le " fichier bilan " et montre qu'une période du cycle de la culture a enregistré un déficit hydrique puisque celui-ci est inférieur à 1. Les périodes de stress estimées par le modèle STICS sont présentées dans le tableau 6. On peut noter qu'au-delà de 90 cm le modèle ne met pas de stress en évidence. Le stress hydrique est confirmé entre 111 et 150 JAS correspondant à la partie finale du tallage et à la quasi-totalité de la montaison (128-162 JAS).

Profondeur (cm) :	Période (JAS)*:	Date calendaire :
50	111-113	21/04-23/04/98
	131-150	11/05-30/05/98
70	136-150	16/05-30/05/98
90	142-150	22/05-30/05/98

*JAS = jours après semis.

Tableau 6. Périodes de stress hydrique dans les différents horizons

B.3.2. L'azote.

L'analyse de l'indice de stress (annexe 11) montre qu'une période du cycle de la culture a enregistré des déficits azotés pour ces deux variables puisque celui-ci est inférieur à 1. Les périodes de stress estimées par le modèle STICS sont présentées dans le tableau 7.

Profondeur (cm) :	Période (JAS)*:	Date calendaire:
50	57-174	26/02-23/06/98
70	61-175	2/03- 24/06/98
90	65-175	6/03-24/06/98
140	65-175	6/03-24/06/98
200	65-175	6/03-24/06/98

*JAS = jours après semis.

Tableau 7. Périodes de stress azoté dans les différents horizons

L'analyse de ces résultats montre que les stress azotés sont confirmés par le modèle. Les périodes de stress mises en évidence aux différentes profondeurs sont relativement similaires. Le stress azoté est confirmé par le modèle entre 57 et 175 JAS à toutes les profondeurs englobant en totalité la phase tallage (56-127 JAS), la phase montaison (128-162 JAS) et se poursuivant pendant la phase gonflement/épiaison (163-182 JAS).

Au total, on constate un déficit hydrique et azoté pendant les phases du tallage et de la montaison jusqu'à épiaison. Si l'eau ne semble pas avoir été le premier facteur limitant précoce, elle a probablement contribué à la difficulté d'alimentation en azote de la plante pendant le tallage. De même, sa limitation pendant la phase montaison a provoqué un défaut d'alimentation azoté pendant cette période. En revanche l'azote a été un facteur limitant

pendant une longue période et a probablement joué un rôle important dans la variabilité spatiale observée.

B.4. Image de télédétection.

Des images aériennes couvrant le site de mesures ont été acquises le 18 Mai 1998 et ont permis d'extraire un indice de végétation nommé " NDVI ". Celui ci, couramment utilisé en télédétection, permet de mettre en évidence de façon aérienne la couverture du sol et peut laisser apparaître des variabilités au sein d'une parcelle agricole.

Dans le cas de notre étude, le contraste de l'image entre les parties Est et Ouest du site est très fort et semble s'expliquer de deux façons :

- la parcelle Est n'a pas été irriguée pendant un stade critique du blé, alors que la partie Ouest a bénéficié de deux irrigations, une de 30 mm le 27/03 et une de 20 mm le 4/04,
- les précédents culturaux des deux côtés ont été gérés différemment.

La profondeur de sol ne semble pas jouer de rôle dans le contraste Est-Ouest puisqu'elle présente la même variabilité sur la totalité du site.

La variabilité intra-parcellaire, qu'elle soit sur la partie Est ou sur la partie Ouest, est marquée et semble corrélée au rendement (figure 28).

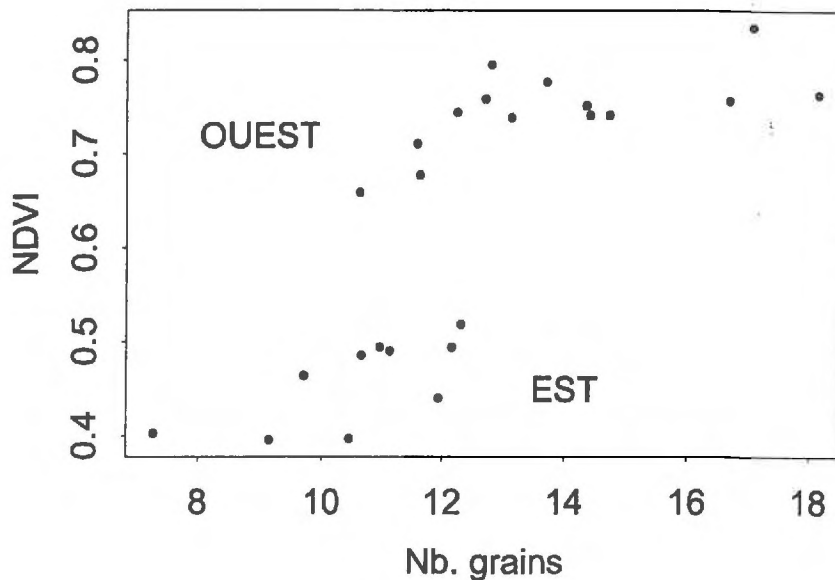
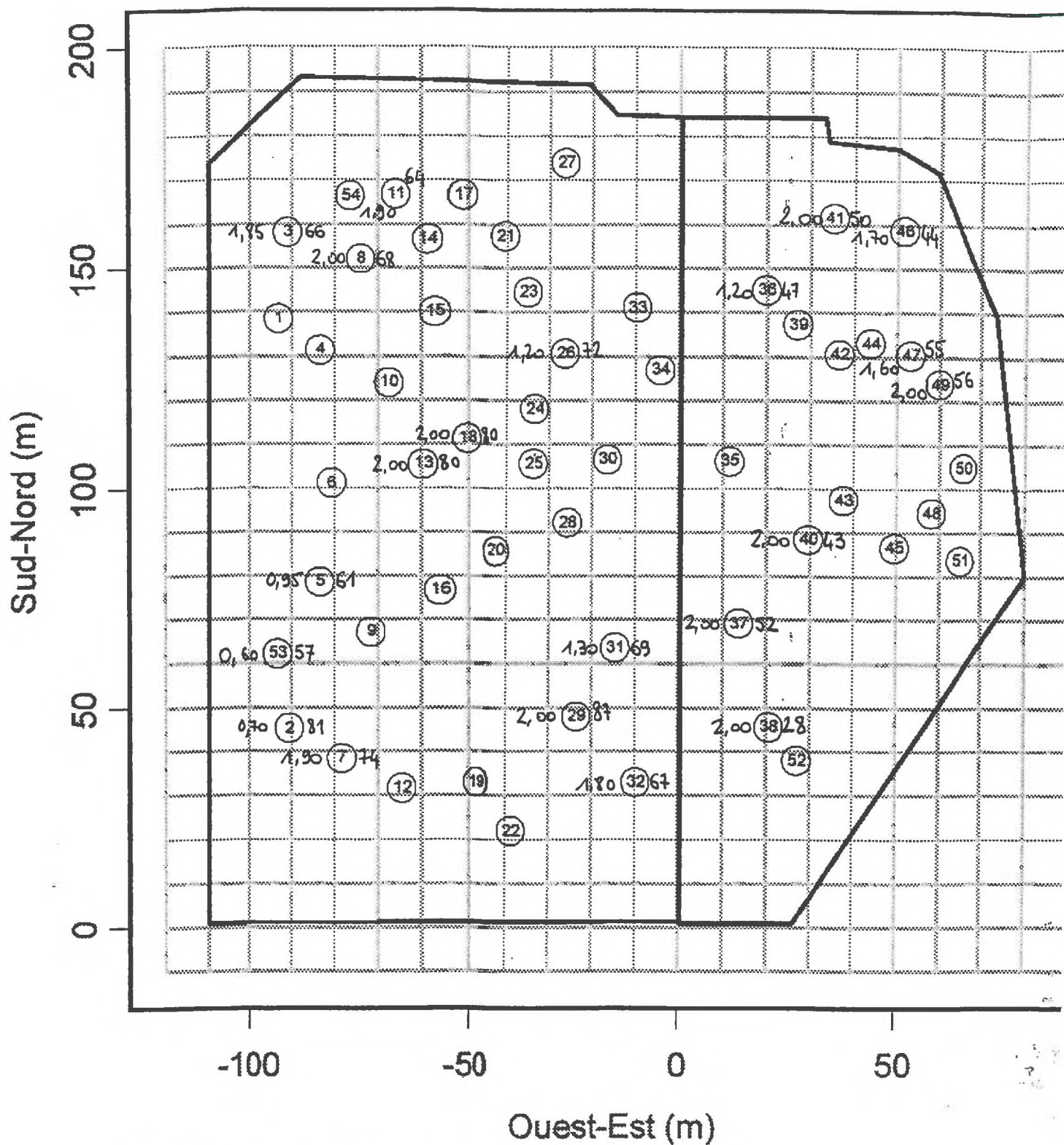


Figure 28. Relation entre Nb. Grains et NDVI

La variabilité intra-parcellaire semble aussi corrélée à la profondeur du sol (tableau 8) car on constate un faible développement de la végétation sur sol peu profond (non observé sur le maïs car il était irrigué).

placettes 1998



Légende : profondeur ○ rendement

Figure 29. Relation entre rendement du blé dur et profondeur de sol

nb.grains placette	rendement (qx_ha)	N°placette/côté	Profondeur de sol
17084	81	2/O	0,70
12332	66	3/O	1,85
11592	61	5/O	0,95
14369	74	7/O	1,90
13382	68	8/O	2,00
17074	64	11/O	1,90
13534	80	13/O	2,00
16718	80	18/O	2,00
12792	72	26/O	1,20
16551	87	29/O	2,00
11640	69	31/O	1,30
10637	67	32/O	1,80
9707	47	36/E	1,20
9142	52	37/E	2,00
7275	28	38/E	2,00
10461	43	40/E	2,00
11130	50	41/E	2,00
9237	44	46/E	1,70
12160	55	47/E	1,60
12724	56	49/E	2,00
11977	57	53/O	0,60

Tableau 8. Relation entre rendement du blé dur et profondeur de sol

Le tableau 8 confirme que le côté Est, non irrigué, présente des rendements inférieurs à ceux de l'Ouest. Sur ce tableau ne sont comparées que les placettes blé ayant donné lieu à un sondage de la profondeur du lit de graviers. Le blé qui a été peu irrigué a souffert d'un stress hydrique prononcé, plus sévère aux faibles profondeurs comme le montrent les résultats obtenus avec STICS (tableau 6 page 48). La biomasse maïs et les rendements blé dur sont présentés respectivement en annexes 15 et 16.

Pour conclure, il serait intéressant de vérifier l'hypothèse selon laquelle la profondeur jouerait un rôle important en sondant d'autres zones comme celles comprises sur la figure 29 entre les placettes [4, 6, 10 et 13] ou [37 et 40] ou enfin [45 et 48]. Ceci permettrait de confirmer la relation entre profondeur de sol et développement de la biomasse.

L'analyse de la comparaison entre la végétation (figure 9 page 28) et les cartes de teneurs chimiques (figure 12 page 40) ne semble présenter aucune relation.

Enfin, la carte de NDVI peut aussi être utilisée dans l'estimation du rendement maïs avec précaution car d'une parcelle à l'autre l'itinéraire technique et l'historique cultural affectent considérablement la relation $NDVI = f(\text{rendement})$.

5. CONCLUSIONS.

Nous avons essayé au travers de ces expérimentations d'identifier et de localiser plusieurs sources de variabilité présentes sur le site de mesures. Le but de cette étude était de comprendre leurs effets sur les cultures.

La forte hétérogénéité de la profondeur de sol semble, selon les années, s'exprimer plus ou moins fortement sur le développement de la biomasse. La texture du sol est relativement homogène et la composition chimique du sol montre des zones identiques pour P et K et semblables pour C et N. Cette composition chimique serait à relier au précédent cultural sans que cette relation soit très nette. La composition en cuivre est difficile à relier au développement de la végétation mais s'expliquerait par les précédents culturaux arboricoles.

En revanche les apports d'azote de l'année sur le blé ont été vraisemblablement insuffisants en moyenne et variables, induisant un stress pendant une période importante du cycle végétatif de la culture. L'effet lié à l'historique cultural des parcelles n'est pas mis en évidence par les analyses statistiques.

En ce qui concerne la variabilité extériorisée par la couverture végétale, les analyses statistiques ne permettent pas de conclure sur une variabilité spatiale structurée des échantillons mais semblent montrer une indépendance spatiale des variables. Le NDVI semble corrélé aux valeurs mesurées et cela tendrait à démontrer qu'il constitue un bon indicateur de la biomasse et pourrait être utilisé dans l'étude de la variabilité spatiale. Les deux cultures utilisées en 1997 et en 1998 possèdent des différences importantes dans leur anatomie, leur physiologie, leurs exigences et sont difficilement comparables. Sur la culture réalisée en 1998 (blé dur), un nombre de variables plus important a été mesuré et a permis de réaliser une analyse des composantes du rendement permettant de situer précisément le stade pendant lequel un accident de végétation a pu avoir lieu. Le stade identifié est la phase tallage – montaison qui est principalement soumise aux conditions d'alimentation hydrique et azotée. Ceci nous a fait rechercher les facteurs de variabilité du rendement au travers de ces deux éléments, eau et azote. Les réserves en eau du sol sont hétérogènes du fait de la structure et de la profondeur du sol. Les apports en eau ont été insuffisants précocement et ont pu provoquer une gêne dans l'assimilation de l'azote par la plante. En revanche, l'azote a été limitant pendant une phase plus longue (tallage – gonflement) et a dû perturber l'épiaison.

Au total, la variabilité présente dans cette parcelle est essentiellement due aux teneurs et apports en eau et aux apports d'azote annuels. Les effets cumulés d'un certain nombre d'autres paramètres n'ont pu être clairement mis en évidence. Il est cependant vraisemblable que les planchers caillouteux étant très variables, ils aient joué un rôle important dans la variabilité des teneurs en eau. Les arrières effets culturaux semblent ainsi limités, au profit de sources annuelles de variabilité liées, par exemple, à l'alimentation hydrique ou azotée.

En terme de perspectives, je pense que les informations acquises seront utiles à l'avenir pour gérer au mieux cette parcelle, qu'il s'agisse de la conduite annuelle des cultures ou de sa gestion à long terme.

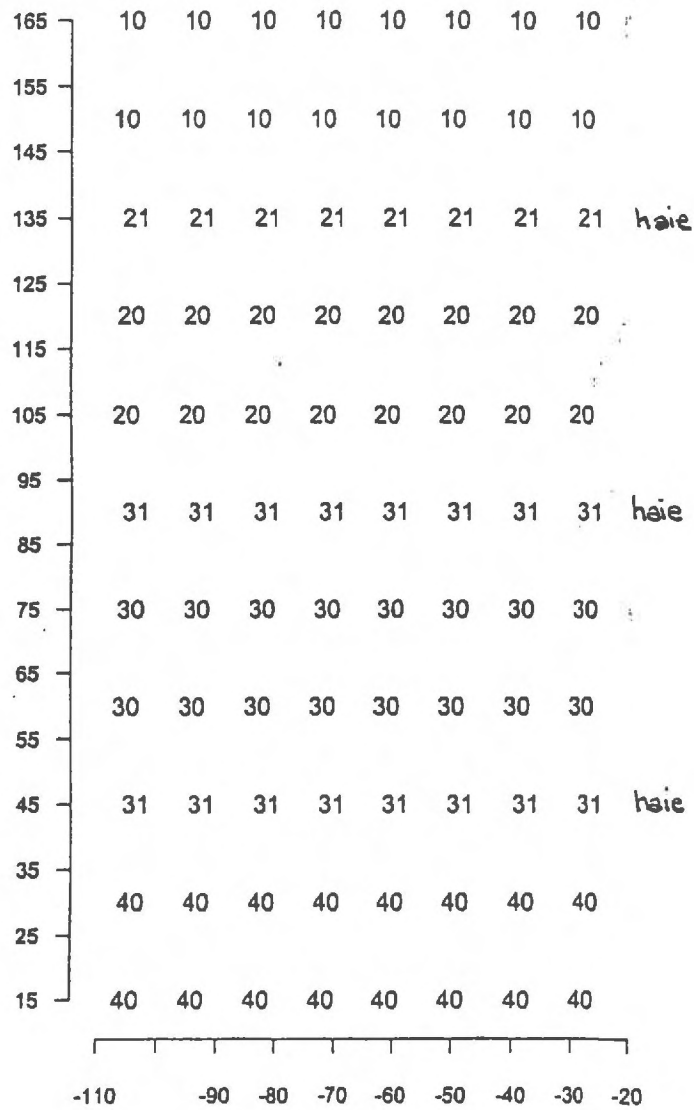
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARNAUD M. et EMERY X., 2000 – Estimation et interpolation spatiale. Ed Hermès Sciences, pp 93-185.
- BERTUZZI P., BRUCKLER L., GABILLY Y., GAUDU J.C., 1987 - Calibration field testing and error analysis of a Gamma-ray probe for in situ measurement of dry bulk density. *Soil Sci.*, vol. 144, n° 6, p 425-436.
- BERTUZZI P., BRUCKLER L., BAY D., CHANZY A., 1994 - Sampling strategies for soil water content to estimate evapotranspiration. *Irrig. Sci.*, n° 14, p 105-115.
- BILLOT J.F., 1987 - Analyse de l'état du sol. *Le travail du sol*, éd. ENSAM/AGROPOLIS, p 8 et 9.
- BOIFFIN J., GUERIF J., STENGEL P., 1990 - Les processus d'évolution de l'état structural du sol: quelques exemples d'études expérimentales récentes. *La structure du sol et son évolution*, Laon (France) 9 Janv., éd. INRA, les colloques, n° 53, p 37-69.
- BOISGONTIER D., ARIAUX B., 1998 - Agriculture de précision. *Perspectives agricoles*, n°235, p 14-20.
- BONNEAU M., SOUCHIER B., 1979 - Propriétés générales et principaux usages du cuivre. *Pédologie*, 2: constituants et propriétés du sol. MASSON et Cie, Paris, p 145-151.
- BRISSEON N., 1989 - Modèle de simulation de la culture de soja et de son fonctionnement hydrique. Thèse INAPG, 90 p.
- BRISSEON N., 1999 – Brochure logiciel STICS version 4,0, notice utilisateur, 33 p.
- BRUCE R.R., SNYDER W.M., WHITE A.W., THOMAS A.W. LANGDALE G.W., 1990 - Soil variables and interactions affecting prediction of crop yield pattern. *Soil Sci.*, AM.J., vol. 54, p 494-501.
- BRUCKLER L., de COCKBORNE A.M., RENAULT P., CLAUDOT B., 1997 - Spatial and temporal variability of nitrate in irrigated salad crops. *Irrig. Sci.*, n° 17, p 53-61.
- CABIBEL B., HOROYAN J., 1985 - Influence d'une circulation hétérogène d'eau dans le sol sur l'état hydrique de la plante. 5^{ème} colloque sur les recherches fruitières. Bordeaux (France), p 29-40.
- CHAMBERS J.M., CLEVELAND W.S., KLEINER B., TUKEY P.A., 1983 – Graphical methods for data analysis. Ed. Wadsworth et Brooks, 395 p.

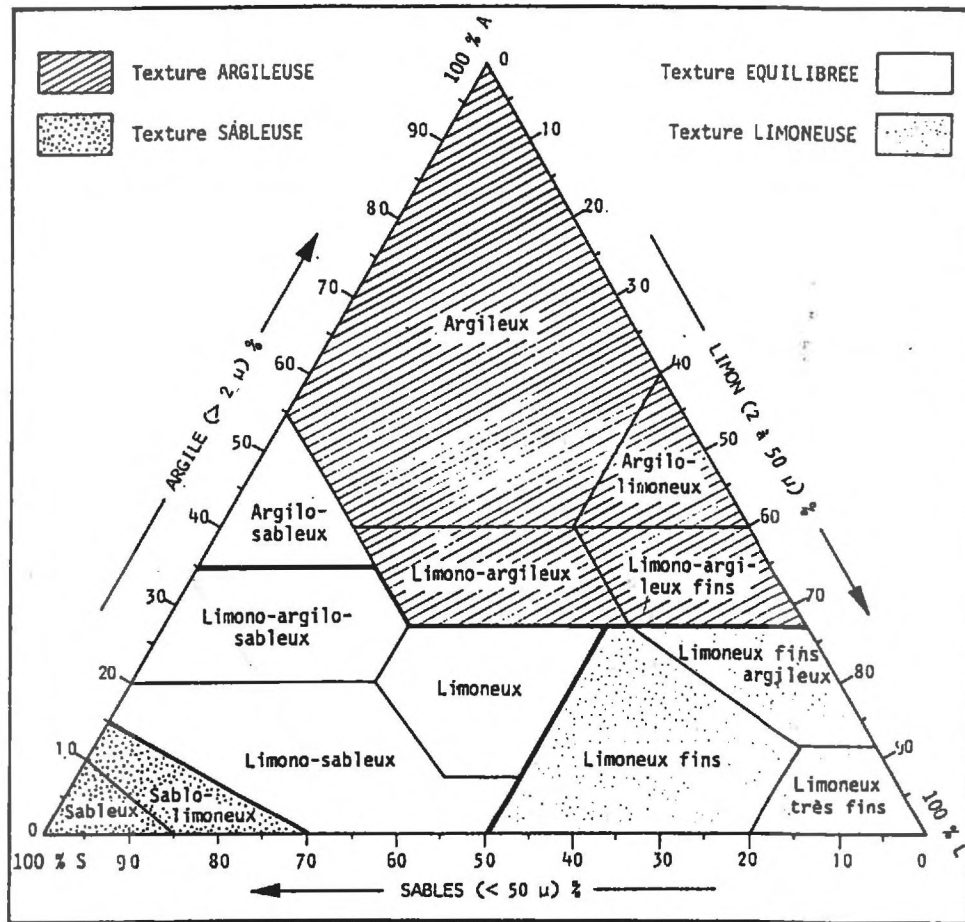
- GASCUEL ODOUX C., 1984 - Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol. Thèse de Docteur Ingénieur en écologie appliquée, option sciences de l'eau. 235 p.
- GAUTRONNEAU Y., MANICHON H., 1983 - Guide méthodologique du profil cultural. éd. GEARA/CEREF. 71 p.
- GOUMARI A., 1986 - Contribution à l'étude et à la maîtrise de l'hétérogénéité des expériences en champs. Mémoire de Docteur en sciences agronomiques. Gembloux, (B). 150 p.
- GUERIF J., 1990 - Conséquences de l'état structural sur les propriétés et les comportements physiques et mécaniques. La structure du sol et son évolution, Laon (France) 9 Janv., éd. INRA, les colloques, n° 53, p 79-89.
- GUYOT G., 1993 - De la physique de la mesure à l'agriculture. Cours de télédétection, ENSAM, 124 p.
- HAMMER P.A., 1981 - Controlling variability. Hortscience, vol. 16 (5), October, p 628-630.
- HATFIELD J.L., MILLARD J.P., REGINATO R.J., JACKSON R.D., IDSO S.B., PINTER P.J., GOETTELMAN R.C., 1980 - Spatial variability of surface temperature as related to cropping practice with implications for irrigation management. International Symposium on Remote Sensing of Environment, n° 14 th, San José, Costa Rica, p 1311- 1320.
- HERVE Y. - Expérimentation agronomique, technique des essais agricoles. Manuel d'enseignement ENSAR, Chaire de phytotechnie, 105 p.
- ISAAKS E.H. et SRIVASTAVA R.M., 1989 - An introduction to applied geostatistics. Oxford university Press, New York.
- JAYNES D.B., HUNSAKER D.J., 1988 - Spatial and temporal variability of water content and infiltration on a flood irrigated field. American Society of Agricultural Engineers, December, p 13-16.
- JIM YEN T.C., GELHAR L.W., WIERENGA P.J., 1986 - Observations of spatial variability of soil water pressure in a field soil. Soil Sci., vol. 142 n° 1, p 7-12.
- LEDIEU J., 1985 - Etudes des propriétés physiques et mécaniques des sols agricoles. Colloque international sur le travail du sol, Gembloux (Belgique), 29 Nov., p 1-9.
- LORENDEAU J.Y., 1998 - G.P.S. (Global Positioning System). L'éditeur de liens, doc. INRA, p 23-28.
- MANICHON H., ROGER ESTRADE J., 1990 - Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture. Les systèmes de culture, éd. Combe L., Picard D., p 27-55

- MONNIER G., 1968 - Etat physique du sol et nutrition minérale. BTI, n° 231, p 549-542.
- MONNIER G., 1987 - Propriété texturale des terres et travail du sol. Le travail du sol, éd. ENSAM/AGROPOLIS, p 5-7.
- NIELSEN D.R., ALEMI M.H., 1989 - Statistical opportunities for analysing spatial and temporal heterogeneity of field soils. Plant and Soil, n° 115, p 85-96.
- PAPY F., CERF M., COULOMB I., 1990 - La physique du sol vue par des agronomes. "Mélanges" offerts à S. Henin, sol, agronomie, environnement. Jubilé scientifique, Paris, 25 Sept. p 83-93.
- RICHARD G., BOIFFIN J., 1990 - Effet de l'état structural du lit de semences sur la germination et la levée des cultures. La structure du sol et son évolution, Laon (France) 9 Janv., éd. INRA, les colloques, n° 53, p 111-135.
- RIVET G., 1987 - Application de la télédétection spatiale à l'identification et la surveillance des cultures. Mémoire de fin d'études ISAB, 76 p.
- RUSSO D., 1986 - A stochastic approach to the crop yield irrigation relationship in heterogeneous soils: I - Analysis of the field spatial variability. Soil Sci. AM. J. vol. 50, p 736-744.
- RUSSO D., 1986 - A stochastic approach to the crop yield irrigation relationship in heterogeneous soils: II - Application to irrigation management. Soil Sci. AM. J. vol. 50, p 745-751.
- SCHERRER B., 1984 - Biostatistique. éd. Gaëtan Morin, 850 p.
- SCHUELLER J.K., 1992 - A review of integrating analysis of spatially- variable control of crop production. Fertilizer research, n° 33, p 1-34.
- SOIL SURVEY DIVISION STAFF, 1993 - Soil Survey Manual U.S Government printing office, Washington DC 20402.
- STENGEL P., 1990 - Caractérisation de l'état structural du sol, objectifs et méthodes. La structure du sol et son évolution, Laon (France), 9/01/1990. Les colloques de l'INRA n°53, p 15-35.
- TARDIEU F., MANICHON H., 1987 - état structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs, états structuraux de la couche labourée. Agronomie 7 (2), p 51-59.
- TOMASSONE R., LESQUOY E. et MILLIER C., 1983 - La régression, nouveau regard sur une ancienne méthode statistique. Ed. Masson, 1983, 180 p.
- VAN WESENBEEK I.J., KACHANOSKI R.G., 1988 - Spatial and temporal distribution of soil water in the tilled layer under a corn crop. Soil Sci. AM. J. vol. 52, p 363-368.

ANNEXES



Disposition des anciennes haies de cyprès



TRIANGLE DES TEXTURES
(d'après le Soil Survey Manual - 1951)

Triangle des textures

1. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT 0,50 m

.....
 Biomasse aérienne (0 %) = 12.68 t/ha
 Rendement grains, fruits, (0 %) = 5.05 t/ha
 Rendement grains, fruits, (11%) = 5.67 t/ha
 Nombre de grains, fruits, = 11220. /m²
 Densité de plantes = 347.1 /m²
 Poids du grain, fruit, (frais) = .051 g
 Vit. de croissance (phase latence)= 14.75 mg/m²/j
 Biomasse aérienne sénescence (0 %)= 7.63 t/ha

Quantité N dans la culture = 157. kg/ha
 Quantité N dans les grains, fruits, = 118. kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = 1.24 %
 Teneur en [N] grains, fruits, = 1.43 %

Résidu pour la culture suivante : pailles
 quantité = 8.3 t/ha C/N = 82.

2. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT 0,70 m

.....
 Biomasse aérienne (0 %) = 17.15 t/ha
 Rendement grains, fruits, (0 %) = 7.19 t/ha
 Rendement grains, fruits, (11.%) = 8.09 t/ha
 Nombre de grains, fruits, = 15973. /m²
 Densité de plantes = 347.1 /m²
 Poids du grain, fruit, (frais) = .051 g
 Vit. de croissance (phase latence)= 19.30 mg/m²/j
 Biomasse aérienne sénescence (0 %)= 9.96 t/ha

Quantité N dans la culture = 184. kg/ha
 Quantité N dans les grains, fruits, = 138. kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = 1.07 %
 Teneur en [N] grains, fruits, = 1.25 %

Résidu pour la culture suivante : pailles
 quantité = 10.8 t/ha C/N = 91.

3. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT 0,90 m

.....
 Biomasse aérienne (0 %) = 19.67 t/ha
 Rendement grains, fruits, (0 %) = 7.81 t/ha
 Rendement grains, fruits, (11%) = 8.78 t/ha
 Nombre de grains, fruits, = 17364. /m²
 Densité de plantes = 347.1 /m²
 Poids du grain, fruit, (frais) = .052 g
 Vit. de croissance (phase latence)= 20.64 mg/m²/j

Biomasse aérienne sénescence (0 %)= 11.86 t/ha

Quantité N dans la culture = 197. kg/ha
 Quantité N dans les grains, fruits, = 153. kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = 1.00 %
 Teneur en [N] grains, fruits, = 1.19 %

Résidu pour la culture suivante : pailles
 quantité = 12.8 t/ha C/N = 112.

4. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT 1,40 m

.....
 Biomasse aérienne (0 %) = 20.31 t/ha
 Rendement grains, fruits, (0 %) = 7.79 t/ha
 Rendement grains, fruits, (11.%) = 8.76 t/ha
 Nombre de grains, fruits, = 17301. /m²
 Densité de plantes = 347.1 /m²
 Poids du grain, fruit, (frais) = .051 g
 Vit. de croissance (phase latence)= 20.58 mg/m²/j
 Biomasse aérienne sénescence (0 %)= 12.52 t/ha

Quantité N dans la culture = 204. kg/ha
 Quantité N dans les grains, fruits, = 158. kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = 1.01 %
 Teneur en [N] grains, fruits, = 1.19 %

Résidu pour la culture suivante : pailles
 quantité = 13.5 t/ha C/N = 114.

5. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT 2,00 m

.....
 Biomasse aérienne (0 %) = 20.37 t/ha
 Rendement grains, fruits, (0 %) = 7.93 t/ha
 Rendement grains, fruits, (11%) = 8.91 t/ha
 Nombre de grains, fruits, = 17628. /m²
 Densité de plantes = 347.1 /m²
 Poids du grain, fruit, (frais) = .052 g
 Vit. de croissance (phase latence)= 20.89 mg/m²/j
 Biomasse aérienne sénescence (0 %)= 12.43 t/ha

Quantité N dans la culture = 204. kg/ha
 Quantité N dans les grains, fruits, = 158. kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = 1.00 %
 Teneur en [N] grains, fruits, = 1.19 %

Résidu pour la culture suivante : pailles
 quantité = 13.5 t/ha C/N = 114.

TEXTURE

Horizon 0-30							
placette:	Ca T	Ca A	CEC	Argile	Limon	Sable	Texture
	‰	‰		%	%	%	
5	355	124	12.2	33.5	50.9	15.6	ALS
7	375	122	9.7	30.0	54.1	15.9	ALS
11	371	122	8.9	30.3	57.4	12.3	ALS
18	344	122	12.0	36.0	49.5	14.5	ALS
26	351	127	12.6	37.8	52.1	10.1	ALS
32	378	124	9.3	28.7	56.7	14.6	ALS
36	370	127	10.2	33.2	56.2	10.6	ALS
37	367	123	10.1	30.6	55.2	14.2	ALS
38	367	113	10.4	30.3	55.1	14.6	ALS
47	350	138	12.0	37.7	52.5	9.8	ALS
Horizon 30-60							
placette:	Ca T	Ca A	CEC	Argile	Limon	Sable	Texture
5	350	124	11.9	34.8	52.2	13.0	ALS
7	357	111	9.7	30.6	54.0	15.4	ALS
11	390	122	8.4	30.8	56.3	12.9	ALS
18	364	127	10.9	34.2	52.0	13.8	ALS
26	353	126	11.1	35.9	52.0	12.1	ALS
32	372	118	9.5	30.2	56.1	13.7	ALS
36	382	132	10.1	32.8	57.1	10.1	ALS
37	365	119	9.9	30.5	54.4	15.1	ALS
38	363	111	10.1	29.8	55.3	14.9	ALS
47	354	150	11.9	37.1	53.2	9.7	ALS
Horizon 60-100							
placette:	Ca T	Ca A	CEC	Argile	Limon	Sable	Texture
5 ✓	341	112	12.5	36.5	44.8	18.7	ALS
7 ✓	353	130	10.8	36.9	48.2	14.9	ALS
11 ✓	393	96	6.9	26.1	51.5	22.4	A-L-S
18	365	112	8.9	30.7	50.7	18.6	ALS
26 ✓	350	111	10.0	32.5	52.7	14.8	ALS
32 ✓	363	136	12.3	37.9	49.5	12.6	ALS
36 ✓	358	151	10.3	38.6	50.6	10.8	ALS
37 ✓	362	128	10.5	35.3	52.4	12.3	ALS
38 ✓	349	127	10.3	34.9	51.6	13.5	ALS
47 ✓	357	88	9.2	30.2	52.8	17.0	ALS
Horizon 100-150							
placette:	Ca T	Ca A	CEC	Argile	Limon	Sable	Texture
5	0	0	0				
7 ✓	424	123	7.2	28.4	53.4	18.2	ALS
11 ✓	427	80	5.2	21.6	38.9	39.5	A-L-S
18 ✓	391	134	9.3	33.3	47.3	19.4	ALS
26 ✓	331	106	11.8	36.5	44.1	19.4	ALS
32 ✓	383	165	11.2	40.2	49.1	10.7	A
36	0	0	0				
37 ✓	356	151	13.5	42.4	48.3	9.3	A
38 ✓	382	134	11.4	39.9	50.5	9.6	ALS
47 ✓	359	121	10.6	32.3	42.9	24.8	ALS
ALS	Argile Limono-Sableuse						
A-L-S	Argilo-Limono-Sableux						
A	Argile						

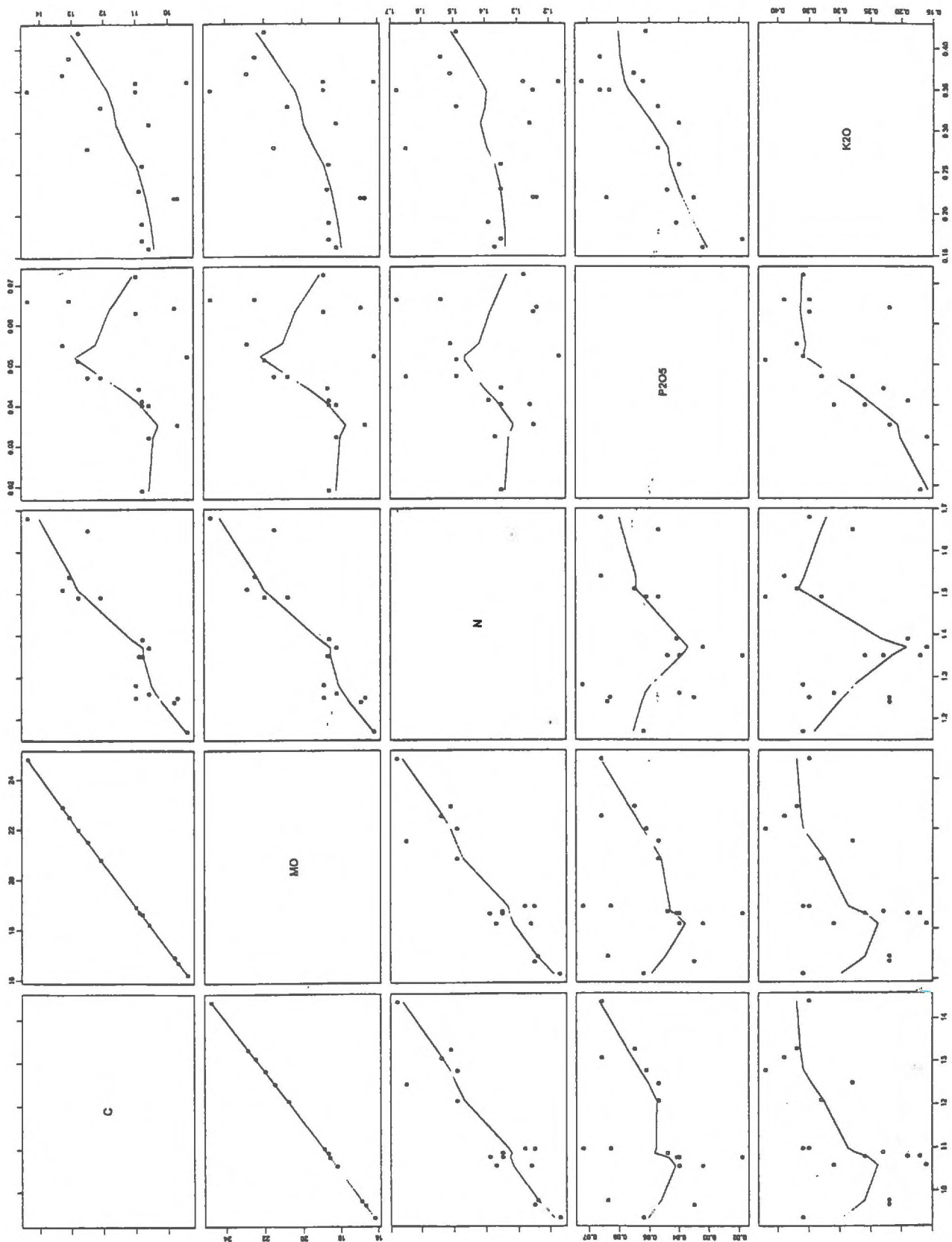
COMPOSITION CHIMIQUE

Horizon 0-30								
N° placette:	C	M.O	N	C/N	P2 O5	Mg	K2O	Cu
	‰	‰	‰		‰	‰	‰	‰
1	10.8	18.6	1.39	7.77	0.041		0.19	8.7
5	10.8	18.6	1.35	8.00	0.040	0.168	0.26	9.2
6	9.7	16.7	1.25	7.76	0.035		0.22	9.7
7	9.4	16.2	1.17	8.03	0.052	0.145	0.36	6.6
11	9.8	16.9	1.24	7.90	0.064	0.152	0.22	9.9
15	10.6	18.2	1.37	7.74	0.032		0.16	8.0
18	12.1	20.8	1.49	8.12	0.047	0.200	0.33	10.9
19	11.0	18.9	1.28	8.59	0.072		0.36	6.7
20	12.8	22.0	1.49	8.59	0.051		0.42	8.9
21	10.8	18.6	1.35	8.00	0.019		0.17	6.8
26	12.5	21.5	1.65	7.58	0.047	0.206	0.28	7.2
27	13.3	22.9	1.51	8.81	0.055		0.37	7.6
30	14.4	24.8	1.68	8.57	0.066		0.35	11.1
31	13.1	22.5	1.54	8.51	0.066		0.39	8.6
32	11.0	18.9	1.25	8.80	0.063	0.147	0.35	7.0
35	12.6	21.7	1.64	7.68	0.056		0.31	8.1
36	12.0	20.6	1.43	8.39	0.029	0.193	0.15	4.2
37	13.5	23.2	1.39	9.71	0.052	0.198	0.31	19.3
38	14.5	24.9	1.49	9.73	0.079	0.165	0.41	14.0
40	12.2	21.0	1.60	7.63	0.054		0.33	11.0
41	15.0	25.8	1.91	7.85	0.043		0.17	22.4
42	13.2	22.7	1.65	8.00	0.028		0.19	8.1
43	13.6	23.4	1.63	8.34	0.078		0.37	9.4
47	10.9	18.7	1.40	7.79	0.021	0.219	0.14	3.8
47 bis	12.4	21.3	1.61	7.70	0.035		0.17	11.2
48	12.2	21.0	1.51	8.08	0.066		0.27	7.0
51	13.6	23.4	1.56	8.72	0.078		0.36	10.9
52	12.9	22.2	1.44	8.96	0.073		0.35	10.0
53	10.6	18.2	1.26	8.41	0.040		0.31	8.9
54	10.9	18.7	1.35	8.07	0.044		0.23	8.3
36	11.0	18.9	1.41	7.80	0.023	0.205	0.16	3.8
37	11.6	20.0	1.31	8.85	0.041	0.190	0.28	14.6
38	11.8	20.3	1.29	9.15	0.048	0.180	0.31	9.6
47	11.4	19.6	1.46	7.81	0.016	0.235	0.13	3.6
Horizon 30-60								
N° placette:	C	M.O	N	C/N	P2O5	Mg	K2O	Cu
5	9.5	16.3	1.23	7.72	0.029	0.175	0.24	6.4
7	8.3	14.3	1.07	7.76	0.040	0.157	0.27	4.3
11	8.5	14.6	1.15	7.39	0.019	0.162	0.16	8.9
18	9.2	15.8	1.21	7.60	0.020	0.196	0.20	5.6
26	9.7	16.7	1.34	7.24	0.020	0.195	0.15	4.6
32	9.7	16.7	1.15	8.43	0.041	0.153	0.28	5.6
36	11.0	18.9	1.41	7.80	0.023	0.205	0.16	3.8
37	11.6	20.0	1.31	8.85	0.041	0.190	0.28	14.6
38	11.8	20.3	1.29	9.15	0.048	0.180	0.31	9.6
47	11.4	19.6	1.46	7.81	0.016	0.235	0.13	3.6

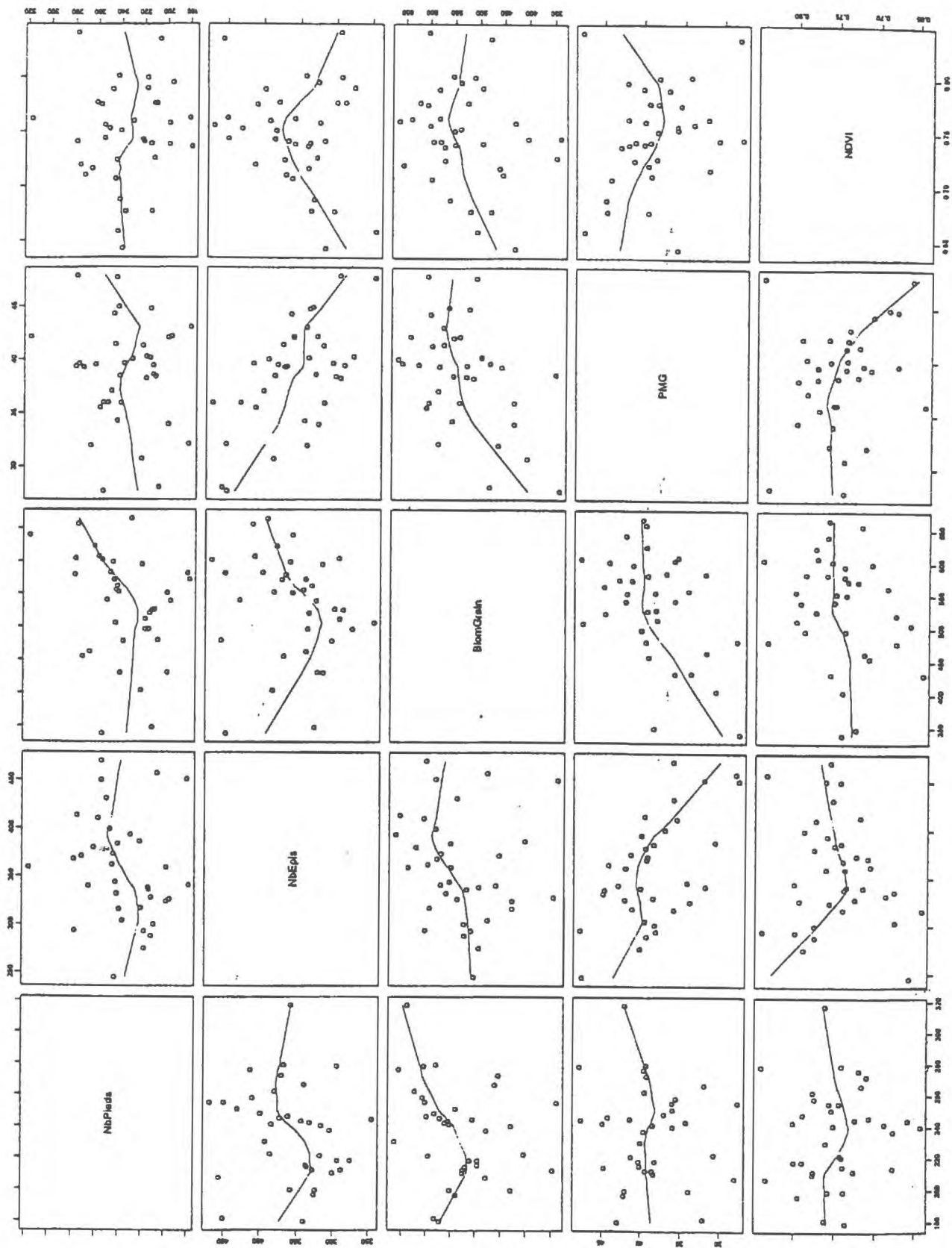
N° PARCELLE NOUV/ANC	ANNEES									
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997			
1/70	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
2/20	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
2/21	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
3/30	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
4/40	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
4/41	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
N° PLACETTE	ANNEES									
1	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
2	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
3	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
4	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
5	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
6	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
7	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
8	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
9	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
10	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
11	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
12	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
13	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
14	CY	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
15	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
16	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
17	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
18	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
19	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
20	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
21	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
22	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
23	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
24	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
25	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
26	CY	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
27	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
28	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
29	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
30	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
31	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
32	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
33	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
34	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
35	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
36	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
37	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
38	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
39	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
40	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
41	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
42	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
43	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
44	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
45	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
46	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
47	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
48	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
49	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
50	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
51	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
52	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
53	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
55	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
56	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
57	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
58	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
59	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
60	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
61	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
62	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
63	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
64	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
65	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
66	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
67	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
68	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
69	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
70	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
71	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
72	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
73	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
74	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
75	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
76	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
77	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
78	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
79	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
80	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
81	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
82	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
83	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
84	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
85	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
86	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
87	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
88	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			

N° PARCELLE NOUVELLE/ANCIENNE	ANNEES							
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
1/10	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
2/20	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA	BL
2/21	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
3/30	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
4/40	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
4/41	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
5/50	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO	BL
6/60	PO	PO	PO	PO	PO	PO	JA	BL
6/61	TO	SJ	BL	SR	BL	BL	BL	BL
7/70	PE	PE	PE	PE	PE	PE	JA	BL
7/71	JA	JA	JA	JA	JA	BL	CO	BL
8/80	PE	PE	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
8/81	PE	PE	BL	BL	JA	BL	CO	BL
SITUATION PLACETTE	ANNEES							
1	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
2	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
3	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
4	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA	BL
5	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
6	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA	BL
7	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
8	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
9	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
10	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
11	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
12	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
13	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
14	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
15	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
16	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
17	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
18	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
19	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
20	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
21	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
22	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
23	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
24	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
25	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
26	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
27	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
28	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
29	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
30	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
31	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
32	PE	PE	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
33	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
34	PO	PO	PO	PO	PO	PO	JA	BL
35	PO	PO	PO	PO	PO	PO	JA	BL
36	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO	BL
37	PE	PE	PE	PE	PE	PE	JA	BL
38	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
39	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
40	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
41	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO	BL
42	PO	PO	PO	PO	PO	PO	JA	BL
43	PO	PO	PO	PO	PO	PO	JA	BL
44	TO	SJ	BL	SR	BL	BL	BL	BL
45	PE	PE	PE	PE	PE	PE	JA	BL
46	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO	BL
47	TO	SJ	BL	SR	BL	BL	BL	BL
48	TO	SJ	BL	SR	BL	BL	BL	BL
49	TO	SJ	BL	SR	BL	BL	BL	BL
50	TO	SJ	BL	SR	BL	BL	BL	BL
51	JA	JA	JA	JA	JA	BL	CO	BL
52	PE	PE	BL	BL	JA	BL	CO	BL
53	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
54	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL

Annexe 9



Corrélations des variables sol en 1998



Corrélations des variables blé dur en 1998

Humidités gravimétriques au 20/01/988

Profondeur en cm	Est	Est	Est	Est	Ouest	Ouest	Ouest	Ouest	Ouest	Ouest	Ouest	Moyenne	Ecart type
	n° Placettes												
	36	37	38	47	3	5	7	11	18	26	32		
5	0,2584	0,2537	0,2525	0,2653	0,2331	0,2240	0,2293	0,2351	0,2300	0,2464	0,2713	0,2454	0,0160
15	0,2660	0,2445	0,2480	0,2479	0,2404	0,2506	0,2372	0,2352	0,2605	0,2826	0,2428	0,2505	0,0141
25	0,2863	0,2392	0,2416	0,2604	0,2440	0,2258	0,2429	0,2833	0,2487	0,2948	0,2361	0,2548	0,0231
35	0,2377	0,2414	0,2372	0,2525	0,2496	0,2432	0,2408	0,2941	0,2625	0,2873	0,2610	0,2552	0,0196
45	0,2245	0,2542	0,2193	0,2596	0,2363	0,2609	0,2301	0,2433	0,2616	0,2588	0,2328	0,2438	0,0159
55	0,1982	0,2071	0,1309	0,2455	0,2364	0,2471	0,1967	0,2177	0,2282	0,2408	0,2145	0,2148	0,0332
65	0,1535	0,1608	0,1061	0,2165	0,2207	0,2029	0,2091	0,2048	0,2016	0,2186	0,2147	0,1918	0,0363
75	0,1326	0,1416	0,1134	0,2137	0,1890	0,2001	0,2087	0,2130	0,1991	0,2060	0,1952	0,1829	0,0359
85	0,1434	0,1379	0,1164	0,2033	0,1818	0,2024	0,2066	0,2039	0,1940	0,2005	0,1986	0,1808	0,0323
95	0,1609	0,1436	0,1257	0,2038	0,1810	0,2038	0,2061	0,1934	0,1950	0,1910	0,2030	0,1825	0,0273
105	0,1219	0,1444	0,1402	0,1699	0,1795		0,2111	0,1830	0,2044	0,1937	0,1996	0,1748	0,0302
115	0,1107	0,1626	0,1362	0,1637	0,1880		0,2134	0,1840	0,2165	0,1974	0,1678	0,1740	0,0332
125		0,1563	0,1333	0,1734	0,1745		0,2045	0,1846	0,2282	0,2000	0,1560	0,1790	0,0290
135		0,1410	0,1357	0,1724	0,1727		0,2074	0,1706	0,2312		0,1602	0,1739	0,0320
145		0,1442	0,1006	0,1701	0,1715		0,2155	0,1661	0,2255		0,1600	0,1692	0,0392
155		0,1454	0,1020	0,1621	0,2062		0,2101	0,1774	0,2220		0,1593	0,1731	0,0397
165		0,1472	0,0844		0,2114		0,2057	0,1969	0,2130		0,1657	0,1749	0,0470
175		0,1217	0,0904		0,1914		0,2169	0,1941	0,2044		0,1222	0,1630	0,0501
185		0,0973	0,0667		0,1959		0,2041	0,2084	0,2159			0,1647	0,0651
195		0,0735	0,0904									0,0820	0,0120

Humidité du sol

jour	mois	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165
15	12	134	213,5	239,5	245	248,5	251	244	244,5	249	254,5	251	240,5	236,5	229,5	257	253	
23	12	201	203	259	257,5	281,5	259,5	250,5	251	253	258	254,5	242,5	236	229	231	251	254
30	12	192,5	245	255	254,5	256	256	248,5	250	252	256	256	245,5	241	234,5	237	253	254
6	1	206,5	257,5	260,5	259,5	281	257,5	250,5	250,5	253,5	259,5	257,5	247	245	238,5	240,5	255	255
12	1	201	252	257	257,5	280	257	248,5	250	251,5	257,5	257,5	248	248	242,5	242,5	254	256
20	1	213	282,5	285	284,5	283,5	259,5	251	251	253	258	258,5	250	251,5	248,5	252,5	255	259
28	1	202,5	251,5	257	257,5	258	253,5	246,5	245,5	248,5	256,5	256,5	247,5	250	249	251,5	255	255
4	2	193,5	247,5	255,5	256	255	253	248,5	246	250	255,5	254,5	247	249	248	252,5	250	253
10	2	179	234	249	250,5	250	250,5	243	244,5	248	253,5	254,5	246	248	248,5	249	249	254
17	2	164	218,5	240	242,5	247,5	246,5	239	241	247	253,5	250,5	245	246,5	246,5	249,5	249	252
24	2	167	208,5	223,5	228,5	238	241,5	235	238	242,5	249	251,5	242,5	246	245	250	250	254
12	3	118	182,5	182	191,5	207,5	218,5	215	218,5	228,5	236,5	241,5	235	239	242	244	247	251
20	3	96,5	139,5	184	175,5	191	200,5	200	203	212	225	230,5	229	232,5	237	244	244	250
25	3	96,5	129,5	154,5	165,5	181,5	191,5	189	193	202	213,5	220	218,5	225	229	239	245	247
3	4	162	184	172,5	170,5	185,5	190	186	190,5	197,5	210	213	211,5	218	223,5	231	244	
10	4	139	162,5	165,5	171,5	184,5	189,5	185,5	188	197	207	209	208	213,5	219,5	225,5	240	
23	4	114,5	151	166	171,5	184,5	189,5	183,5	187	193,5	203	204,5	100,5	202,5	202,5	210,5	234	
14	5	103	117	140	154	166	181	173	181	190	201	199	190	178	175			
5	6	126,5	184	169,5	163	167,5	167	158,5	180	165	169	164,5	155	144,5	145,5	165	186	
16	6	90	137	152,5	154	185,5	165,5	159	162	167	170,5	166,5	155	148,5	145,5	150,5	191	
26	6	74	118,5	141,5	149	161,5	165,5	161	180	168	171	167	156,5	150	146,5	150	188	
8	7	85	95	128	145	162	167	161	162,5	168	172	168	157,5	151	148,5	151	188	
21	7	55,5	70,5	107	133	158,5	165,5	159,5	162	166,5	172	166	157	152,5	148,5	152	190	
théorique	0-10		oct-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170
a	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273	0,001273
b	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181	-0,0181
observé																		
a	0,00138	0,001235	0,001235	0,001355	0,00136	0,00138	0,00138	0,00138	0,00138	0,00138	0,00138	0,00138	0,00138	0,00138	0,00138	0,00138	0,00138	0,00138
b	0,03781	0,04057	0,04057	-0,01349	-0,0369	-0,0369	-0,0369	-0,0369	-0,0369	-0,0369	-0,0369	-0,0369	-0,0369	-0,0369	-0,0369	-0,0369	-0,0369	-0,0369
relat. etalon.	a.cpt + b	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165
349	15-déc	0,22253	0,30424	0,33635	0,31849	0,30108	0,30448	0,29494	0,29562	0,30174	0,30922	0,30448	0,29018	0,28474	0,27522	0,31262	0,30718	
357	23-déc	0,31499	0,29128	0,36044	0,33542	0,31874	0,31802	0,30378	0,30446	0,30718	0,31398	0,30922	0,29290	0,28406	0,27454	0,27726	0,30446	0,30854
364	30-déc	0,30326	0,34315	0,35550	0,33136	0,31128	0,31128	0,30106	0,30310	0,30582	0,31128	0,31128	0,29898	0,29086	0,28202	0,28542	0,30718	0,30854
371	06-janv	0,32258	0,35858	0,36229	0,33813	0,31806	0,31330	0,30378	0,30378	0,30786	0,31602	0,31330	0,29902	0,29630	0,28746	0,29018	0,30990	0,30990
377	12-janv	0,31499	0,35179	0,35797	0,33542	0,31670	0,31262	0,30106	0,30310	0,30514	0,31330	0,31330	0,30038	0,30038	0,29290	0,29290	0,30854	0,31126
385	20-janv	0,33155	0,36476	0,36785	0,34491	0,32148	0,31802	0,30448	0,30446	0,30718	0,31398	0,31486	0,30310	0,30514	0,30108	0,30850	0,30990	0,31534
393	28-janv	0,31708	0,35117	0,35797	0,33542	0,31398	0,30786	0,29834	0,29898	0,30108	0,31194	0,31194	0,29970	0,30310	0,30174	0,30514	0,30990	0,30990
400	04-févr	0,30464	0,34623	0,35611	0,33339	0,30990	0,30718	0,29634	0,29786	0,30310	0,31058	0,30922	0,29902	0,30174	0,30038	0,30850	0,30310	0,30718
406	10-févr	0,28463	0,32956	0,34809	0,32594	0,30310	0,30378	0,29358	0,29562	0,30038	0,30786	0,30922	0,29786	0,30038	0,30106	0,30174	0,30174	0,30854
413	17-févr	0,26393	0,31042	0,33697	0,31510	0,29970	0,29834	0,28814	0,29086	0,29902	0,30786	0,30378	0,29630	0,29834	0,29834	0,30242	0,30174	0,30582
420	24-févr	0,26807	0,29807	0,31659	0,29813	0,28678	0,29154	0,28270	0,28678	0,29290	0,30174	0,30514	0,29290	0,29766	0,29630	0,30310	0,30310	0,30854
436	12-mars	0,20045	0,24126	0,26534	0,24599	0,24530	0,25754	0,25550	0,26026	0,27114	0,28474	0,29154	0,28270	0,28814	0,29222	0,29494	0,29902	0,30446
444	20-mars	0,17078	0,21285	0,24311	0,22431	0,22286	0,23578	0,23510	0,23918	0,25142	0,26910	0,27658	0,27454	0,27930	0,28542	0,29494	0,29494	0,30310

Humidité du sol

449	25-mars	0,17078	0,20050	0,23138	0,21076	0,20894	0,22354	0,22014	0,22558	0,23782	0,25346	0,26230	0,26026	0,26810	0,27454	0,28814	0,29630	0,29902
456	03-avr	0,26117	0,26781	0,25361	0,21754	0,21538	0,22150	0,21806	0,22218	0,23170	0,24870	0,25278	0,25074	0,25858	0,26706	0,27726	0,29494	
485	10-avr	0,22943	0,24128	0,24486	0,21889	0,21402	0,22082	0,21538	0,21878	0,23102	0,24462	0,24734	0,24598	0,25346	0,26162	0,26978	0,28950	
478	23-avr	0,19582	0,22706	0,24558	0,21888	0,21402	0,22082	0,21286	0,21742	0,22626	0,23918	0,24122	0,09978	0,23850	0,23850	0,24938	0,28134	
499	14-mai	0,17975	0,18507	0,21347	0,19518	0,18886	0,20926	0,19838	0,20926	0,22150	0,23846	0,23374	0,22150	0,20246	0,20110			
521	05-juin	0,21218	0,24311	0,24990	0,20738	0,19090	0,19022	0,17868	0,18070	0,18750	0,19294	0,18682	0,17390	0,15982	0,16098	0,18750	0,21878	
532	16-juin	0,18181	0,20977	0,22691	0,19518	0,18818	0,18818	0,17934	0,18342	0,19022	0,19498	0,18954	0,17390	0,16506	0,16098	0,16778	0,22286	
542	26-juin	0,13973	0,18445	0,21532	0,18841	0,18274	0,18818	0,18206	0,18070	0,18886	0,19566	0,19022	0,17594	0,16710	0,16234	0,16710	0,21878	
554	08-juil	0,12731	0,15790	0,19885	0,18299	0,18342	0,19022	0,18206	0,18410	0,19158	0,19702	0,19158	0,17730	0,16846	0,16506	0,16846	0,21878	
567	21-juil	0,11420	0,12764	0,17272	0,16673	0,17866	0,18818	0,18002	0,18342	0,18954	0,19702	0,19158	0,17882	0,17050	0,16506	0,16982	0,22150	
	0-10	oct-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	80-100	100-110	110-120	120-130	130-140	140-150	150-160	160-170	
dens 1	1,346	1,502	1,462	1,403	1,388	1,505	1,590	1,619	1,605	1,597	1,619	1,633	1,590	1,593	1,870	1,630	1,620	
dens 2	1,382	1,5	1,355	1,183	1,335	1,534	1,593	1,560	1,560	1,569	1,578	1,570	1,680	1,700	1,630	1,570	1,680	
dens OM	1,355	1,456	1,415	1,383	1,47													
dens moy	1,3610	1,4860	1,4107	1,3183	1,3970	1,5195	1,5865	1,5895	1,5825	1,583	1,5985	1,6015	1,625	1,6465	1,65	1,6	1,65	
hum pond.cc	0,29942	0,32892	0,31035	0,28959	0,30734	0,33429	0,34903	0,34969	0,34815	0,34826	0,35167	0,35233	0,35750	0,36223	0,36300	0,35200	0,36300	
hum pond.pf	0,14971	0,16346	0,15517	0,14480	0,15367	0,16715	0,17452	0,17485	0,17408	0,17413	0,17584	0,17617	0,17875	0,18112	0,18150	0,17600	0,18150	
cc - pf	0,1497	0,1635	0,1552	0,1448	0,1537	0,1671	0,1745	0,1748	0,1741	0,1741	0,1758	0,1762	0,1788	0,1811	0,1815	0,1760	0,1815	
RTOT-90	%_90cm	RTOT-140	%_140cm	RTOT-200	%_200cm	RTOT-50	%_50cm	RTOT-70	%_70cm	J.cal.								
288	0,84	414	0,77	478	0,85	148	0,93	208	0,86	349			90	140	200	50	70	
285	0,96	433	0,85	522	0,81	162	1,11	224	1,02	357			cc	291,478	468,677	576,477	153,362	221,694
287	0,97	436	0,86	526	0,82	184	1,14	226	1,04	364			pf	145,739	234,339	288,239	76,681	110,847
283	1,01	444	0,89	535	0,88	170	1,22	232	1,09	371								
280	0,99	442	0,89	533	0,85	188	1,19	229	1,07	377				90	140	200	50	70
286	1,03	450	0,92	543	0,88	173	1,26	235	1,12	385			Rcc-Rpf	145,739	234,339	288,239	76,681	110,847
288	0,98	441	0,88	533	0,85	168	1,19	228	1,06	393								
286	0,98	438	0,87	529	0,84	165	1,15	226	1,04	400								
278	0,91	430	0,84	521	0,81	159	1,08	219	0,97	406								
270	0,85	421	0,80	512	0,78	153	0,99	211	0,91	413								
262	0,80	411	0,76	503	0,74	147	0,91	204	0,84	420								
224	0,54	368	0,57	458	0,59	120	0,56	171	0,54	438								
204	0,40	342	0,46	431	0,50	107	0,40	154	0,39	444								
193	0,32	325	0,39	413	0,43	102	0,33	147	0,32	449								
211	0,45	339	0,44	396	0,37	122	0,59	165	0,49	458								
203	0,40	329	0,40	385	0,33	115	0,50	158	0,43	465								
198	0,38	304	0,30	357	0,24	110	0,44	153	0,38	478								
180	0,24	290	0,24	290	0,00	96	0,25	137	0,24	499								
184	0,28	271	0,16	312	0,08	110	0,44	147	0,33	521								
173	0,18	261	0,11	300	0,04	98	0,28	135	0,22	532								
165	0,13	254	0,08	293	0,02	91	0,19	128	0,18	542								
160	0,10	250	0,07	288	0,00	85	0,11	122	0,10	554								
150	0,03	240	0,02	279	-0,03	76	-0,01	113	0,02	567								

PLUVIOMETRIE ET ETP

ANNEE	MOIS	ETPP_CM	RR_CM
1996	8	140,3	117,5
1996	9	96,8	112,5
1996	10	60,7	45,5
1996	11	20,8	191
1996	12	16,7	81
1997	1	16,9	134
1997	2	36,2	3,5
1997	3	102,9	0
1997	4	131	17
1997	5	130,1	37,5
1997	6	125,5	77,5
1997	7	177,7	20,5
1997	8	136,7	68,5
1997	9	95,5	20,5
1997	10	60,8	50,5
1997	11	18,9	83
1997	12	18,6	36
1998	1	17,5	41,5
1998	2	34,4	7
1998	3	95,3	1,5
1998	4	83,6	106,5
1998	5	157,2	58
1998	6	180,2	19
1998	7	212,2	3

Bilan de la simulation STICS 4.0 modèle culture

Annexe 14

DONNEES d'ENTREE

fichier climatique : aviste1j.97
 fichier techniques culturales : ble050.tec
 fichier plante : blearmet.plt
 coupe variétal : 4
 valeurs initiales du sol : grue50
 azote (% sol sec) azote (kg/ha)

2.0	20.0
3.0	15.0
4.6	10.0
5.3	5.0

début de simulation : 28-10-97
 jour 301
 fin de simulation : 23-08-98
 jour 235 (ou 600)

irrigation: nombre d'arrosages = 2
 date des arrosages dose (mm)

27-03-98	30
14-04-98	20

quantité totale apportée: 50 mm

fertilisation: nombre d'apports = 2
 date des apports N dose (kg N/ha)

05-02-98	66
11-04-98	50

quantité totale apportée: 116

résidus organiques et/ou travail du sol
 travail du sol au jour 0 sur 22 cm

DEVELOPPEMENT DE LA CULTURE

type : plante de jours longs
 méthode de développement : photo-thermique
 température considérée : température de culture

date	date	unités	unités
		cumulées	
		depuis le semis	
semis	28-10-97	0	0 stade végétatif
ev calculé	9-11-97	139	139
mf calculé	23-02-98	215	354
mx calculé	25-04-98	304	658
en calculé	15-05-98	201	859
in calculé	9-06-98	493	1352
		stades remplissage	
rp calculé	18-05-98	901	901
rat calculé	16-06-98	589	1490
ec calculé	24-06-98	180	1670
durée du cycle			238 jours

3. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT

Biomasse aérienne (0%)
 =12.68 t/ha
 Rendement grains,fruits, (0%)= 5.05t/ha
 Rendement grains,fruits, (12%)=5.74t/ha
 Nombre de grains,fruits, =11220/m2
 Densité de plantes = 347.1/m2
 Poids du grain,fruit, (frais)= .051g
 Vit. de croissance (phase latence)
 =14.75 mg/m2/j
 Biomasse aérienne sénescence (0%)
 =7.63t/ha
 Quantité N dans la culture=157kg/ha
 Quantité N dans les grains,fruits =118kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = 1.24 %
 Teneur en [N] grains,fruits = 1.43 %
 Résidus pour la culture suivante : pailles
 quantité = 8.3 t/ha
 C/N = 82

4. BILANS EAU et AZOTE sur le cycle de culture

Somme ETM = -413 mm
 Somme ETR = 383 mm
 Somme ES = 237 mm
 Somme TR = 146 mm
 Somme P = 404 mm
 Réserve en eau maximale utilisée = 92mm

Indices moyens de STRESS :
 swfac turfac inns tcult-tair
 phase végétative (lev-drp)
 0.99 0.97 0.85 1.24
 phase reproductrice (drp-mat)
 0.67 0.61 0.70 1.04

5. BILANS EAU et AZOTE sur toute la période de simulation (300 jours)

Jours normalisés à 15°C
 Humus: 196
 Résidus: 0

ENTREES	SORTIES EAU (mm)
évaporation	281
pluie	378
transpiration	146
irrigation	50
drainage	109
ruissellement	0
interception feuille	0
interception mulch	0
stock eau initial	158
stock eau final	66
TOTAL	585
TOTAL	602

AZOTE (kg/ha)

pluie	8
exportation culture	115
irrigation	5
restituit culture	43
engrais	116
lixiviation	33
fixation symbiot.	0
organisation engrais	27
minéralis. humus	97
volat+dénit. engrais	14
minéralis. résidus	0
volat. amendements	0
N planté initial	0
N sol initial	50
N sol final	45
TOTAL	275
TOTAL	275

Bilan de la simulation STICS 4.0, modèle culture

3. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT

DONNEES d'ENTREE

fichier climatique : aviste1j.97
 fichier techniques culturales : ble070.tec
 fichier plante : blearmet.pit
 groupe variétal : 4
 valeurs initiales du sol : grue 70

EAU (% sol sec)	azote (kg/ha)
2.0	20.0
3.0	15.0
4.6	10.0
1.3	5.0
9.3	0

Début de simulation : 28-10-97
 jour 301
 fin de simulation : 23-08-98
 jour 235 (ou 600)

Irrigation: nombre d'arrosages = 2	
Date des arrosages	dose (mm)
27-03-98	30
24-04-98	20
Quantité totale apportée:	50 mm

Fertilisation: nombre d'apports = 2	
Date des apports N	dose (kg N/ha)
25-02-98	66
21-04-98	50
Quantité totale apportée:	116

Résidus organiques et/ou travail du sol
 Travail du sol au jour 0 sur 22 cm

2. DEVELOPPEMENT DE LA CULTURE

type : plante de jours longs
 Unité de développement : photo-thermique
 Température considérée : température de culture

Stade	date	unité	unités cumulées depuis le semis
semis	28-10-97	0	0
lev calculé	9-11-97	139	139
arnf calculé	23-02-98	215	354
tax calculé	26-04-98	314	667
sen calculé	16-05-98	203	870
lan calculé	10-06-98	489	1359
			stades remplissage
drp calculé	19-05-98	910	910
mat calculé	17-06-98	585	1495
rec calculé	25-06-98	186	681
durée du cycle			239 jours

Biomasse aérienne (0 %) = 17.15 t/ha
 Rendt grains, fruits (0 %) = 7.19 t/ha
 Rendt grains, fruits (11 %) = 8.09 t/ha
 Nombre de grains, fruits = 15973. /m2
 Densité de plantes = 347.1/m2
 Poids du grain, fruit (frais) = 0.051 g
 Vit. de croissance (phase latence) = 19.30 mg/m2/j
 Biomasse aérienne sénescente (0 %) = 9.96t/ha
 Quantité N dans la culture = 184. kg/ha
 Quantité N dans les grains, fruits = 138kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = 1.07 %
 Teneur en [N] grains, fruits = 1.25 %
 Résidus pour la culture suivante : pailles
 quantité = 10.8 t/ha
 C/N = 91.

AZOTE (kg/ha)	
pluie	8
exportation culture	134
irrigation	5
restitution culture	50
engrais	116
lixiviation	11
fixation symbiot.	0
organisation engrais	27
minéralis. humus	101
volat+dénit. engrais	14
minéralis. résidus	0
volat. amendements	0
N plante initial	0
N sol initial	50
N sol final	44
TOTAL	279
TOTAL	279

4. BILANS EAU et AZOTE sur le cycle de culture

Somme ETM = 442 mm
 Somme ETR = 415 mm
 Somme ES = 227 mm
 Somme TR = 187 mm
 Somme P = 404 mm
 Réserve en eau maximale utilisée = 120mm

Indices moyens de STRESS :
 swfac - turfac - inns - tcult-tair
 phase végétative (lev-drp)
 1.00 0.99 0.89 1.21
 phase reproductrice (drp-mat).
 74 0.61 0.70 0.92

5. BILANS EAU et AZOTE sur toute la période de simulation (300 jours)

Jours normalisés à 15.°C
 Humus: 204.
 Résidus: 0.

ENTREES	SORTIES EAU (mm)
évaporatio	272
pluie	378
transpiration	187
irrigation	50
drainage	100
ruissellement	0
interception feuille	0
interception mulch	0
Stock eau initial	218
Stock eau final	105
TOTAL	645
TOTAL	664

Bilan de la simulation STICS 4.0, modèle culture

3. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT

Biomasse aérienne (0 %) = 19.67 t/ha
 Rendement grains, fruits (0 %) = 7.81 t/ha
 Rendement grains, fruits (14.%)
 = 9.09 t/ha
 Nombre de grains, fruits = 17364/m²
 Densité de plantes = 347.1 /m²
 Poids du grain, fruit (frais) = 0.052 g
 Vit. de croissance (phase latence)
 = 20.64 mg/m²/j
 Biomasse aérienne sénescente (0 %)
 = 11.86 t/ha
 Quantité N dans la culture = 197 kg/ha
 Quantité N dans les grains, fruits
 = 153 kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = 1.00 %
 Teneur en [N] grains, fruits = 1.19 %
 Résidus pour la culture suivante : pailles
 Quantité = 12.8 t/ha
 C/N = 112.

AZOTE (kg/ha)		
pluie		8
exportation culture	149	
irrigation		5
restitution culture		48
engrais		116
lixiviation	2	
fixation symbiot		0
organisation engrais		27
minéralis. humus		113
volat+dénit. engrais		14
minéralis. résidus		0
volat. amendements		0
N plante initial		0
N sol initial		50
N sol final		52
TOTAL		292
TOTAL		292

1. DONNEES d'ENTREE

Fiche climatique : aviste1j.97
 Fiche techniques culturales : ble090.tec
 Fiche plante : \blearmet.pft
 groupe variétal: 4
 Valeurs initiales du sol : grue 90

eau (% sol sec)	azote (kg/ha)
22.0	20.0
23.0	15.0
24.6	10.0
21.3	5.0
18.6	0.0

Début de simulation : 28-10-97 jour 301
 Fin de simulation : 23-08-98 jour 235
 (ou 600)

Irrigation: nombre d'arrosages = 2	
Date des arrosages	dose (mm)
27-03-98	30
24-04-98	20
Quantité totale apportée:	50 mm

Fertilisation: nombre d'apports = 2	
Date des apports N	dose (kg N/ha)
25-02-98	66
21-04-98	50
Quantité totale apportée:	116.

Résidus organiques et/ou travail du sol
 Travail du sol au jour 0 sur 22.cm

2. DEVELOPPEMENT DE LA CULTURE

Type : plante de jours longs
 Unité de développement : photo-thermique
 Température considérée : température de culture

Stade cumulé	Date	Unités	Unités
		depuis le semis	
semis	28-10-97	0	0
		stade végétatif	
lev calculé	9-11-97	139	139
amf calculé	23-02-98	215	354
lax calculé	26-04-98	314	667
sen calculé	16-05-98	202	870
lan calculé	11-06-98	506	1375
		stades remplissages	
drp calculé	19-05-98	910	910
mat calculé	18-06-98	596	1506
rec calculé	25-06-98	167	1673
durée du cycle			239 jours

4. BILANS EAU et AZOTE sur le cycle de culture

Somme ETM = 448 mm
 Somme ETR = 441 mm
 Somme ES = 224 mm
 Somme TR = 218 mm
 Somme P = 404 mm
 Réserve en eau maximale utilisée
 = 150 mm
 Indices moyens de STRESS :
 swfac turfacs inns tcult-tair
 phase végétative (lev-drp)
 1.00 1.00 0.91 1.20
 phase reproductrice (drp-mat)
 0.94 0.80 0.70 0.68

5. BILANS EAU et AZOTE sur toute la période de simulation (300 jours)

Jours normalisés à 15°C
 Humus: 229
 Résidus: 0

ENTREES	SORTIES EAU (mm)
évaporation	268
pluie	378
transpiration	218
irrigation	50
drainage	87
ruissellement	0
interception feuille	0
interception mulch	0
Stock eau initial	275
Stock eau final	148
TOTAL	702
TOTAL	721

Bilan de la simulation STICS 4.0, modèle culture

3. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT

Biomasse aérienne (0 %) = 20.31 t/ha
 Rendement grains, fruits (0 %) = 7.79 t/ha
 Rendement grains, fruits (11 %) = 8.76 t/ha
 Nombre de grains, fruits = 17301 /m²
 Densité de plantes = 347.1 /m²
 Poids du grain, fruit (frais) = 0.051 g
 Vit. de croissance (phase latence) = 20.58 mg/m²/j
 Biomasse aérienne sénescence (0 %) = 12.52 t/ha
 Quantité N dans la culture = 204. kg/ha
 Quantité N dans les grains, fruits = 158. kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = 1.01 %
 Teneur en [N] grains, fruits = 1.19 %
 Résidus pour la culture suivante : pailles
 quantité = 13.5 t/ha
 C/N = 114

AZOTE (kg/ha)	
pluie	8
exportation culture	155
irrigation	5
restitution culture	50
engrais	116
lixiviation	0
fixation symbiot.	0
organisation engrais	27
minéralis. humus	139
volat+dénit. engrais	14
minéralis. résidus	0
volat. amendements	0
N plante initial	0
N sol initial	50
N sol final	73
TOTAL	318
TOTAL	318

1. DONNEES d'ENTREE

Fichier climatique : aviste1j.97
 Fichier techniques culturales : ble140.tec
 Fichier plante : vblearmet.plt
 groupe variétal: 4
 valeurs initiales du sol : grue140

eau (% sol sec)	azote (kg/ha)
22.0	20.0
23.0	15.0
24.6	10.0
21.3	5.0
18.0	0.0

Début de simulation : 28-10-97 jour 301
 Fin de simulation : 23-08-98 jour 235 (ou 600)

Irrigation: nombre d'arrosages = 2

Date des arrosages	Dose (mm)
27-03-98	30
24-04-98	20
Quantité totale apportée:	50 mm

Fertilisation: nombre d'apports = 2

Date des apports N	Dose (kg N/ha)
25-02-98	66
21-04-98	50
Quantité totale apportée:	116.

Résidus organiques et/ou travail du sol
 Travail du sol au jour 0 sur 22.cm

2. DEVELOPPEMENT DE LA CULTURE

type : plante de jours longs
 Unité de développement : photo-thermique
 Température considérée : température de culture

Stade	Date	Unités	unités cumulées depuis le semis
semis	28-10-97	0	0 stade végétatif
lev calculé	8-11-97	128	128
anf calculé	22-02-98	216	344
lax calculé	25-04-98	306	650
sen calculé	15-05-98	199	850
lan calculé	10-06-98	502	1352
			stades remplissage
drp calculé	18-05-98	891	891
mat calculé	17-06-98	598	1489
rec calculé	25-06-98	186	1674
durée du cycle			239 jours

4. BILANS EAU et AZOTE sur le cycle de culture

Somme ETM = 435 mm
 Somme ETR = 435 mm
 Somme ES = 210 mm
 Somme TR = 224 mm
 Somme P = 404 mm
 Réserve en eau maximale utilisée = 149 mm

Indices moyens de STRESS :

swfac	turfac	inns	tcult-tair
phase végétative (lev-drp)			
1.00	1.00	0.91	1.22
phase reproductrice (drp-mat)			
1.00	1.00	0.71	0.67

5. BILANS EAU et AZOTE sur toute la période de simulation (300 jours)

à 15°C

Humus: 284
 Résidus: 0.

ENTREES	SORTIES EAU (mm)
évaporation	255
transpiration	224
irrigation	50
drainage	55
ruissellement	0
interception feuille	0
interception mulch	0
stock eau initial	417
stock eau final	326
TOTAL	845
TOTAL	860

Bilan de la simulation STICS 4.0, modèle culture

3. CROISSANCE ET COMPOSANTES DU RENDEMENT

Biomasse aérienne (0 %) = 20.37 t/ha
 Rendement grains, fruits (0 %)
 = 7.93 t/ha
 Rendement grains, fruits (14. %)
 = 9.22 t/ha
 Nombre de grains, fruits = 17628 /m2
 Densité de plantes = 347.1 /m2
 Poids du grain, fruit (frais) = 0.052 g
 Vit. de croissance (phase latence)
 = 20.89 mg/m2/j
 Biomasse aérienne sénescente (0 %)
 = 12.43 t/ha
 Quantité N dans la culture = 204. kg/ha
 Quantité N dans les grains, fruits
 = 158 kg/ha
 Teneur en [N] plante entière = 1.00 %
 Teneur en [N] grains, fruits = 1.19 %
 Résidus pour la culture suivante : pailles
 quantité = 13.5 t/ha
 C/N = 114.

AZOTE (kg/ha)	
pluie	8
exportation culture	155
irrigation	5
restitution culture	50
engrais	116
lixiviation	0
fixation symbiot.	0
organisation engrais	27
minéralis. humus	138
volat+dénit. engrais	14
minéralis. résidus	0
volat. amendements	0
N plante	0
N sol initial	50
N sol final	72
TOTAL	317
TOTAL	3

1. DONNEES D'ENTREE

Fichier climatique : aviste1j.97
 Fichier techniques culturales : ble200.tec
 Fichier plante : \blearmet.pit
 groupe variétal: 4
 Valeurs initiales du sol : grue200

eau (% sol sec)	azote (kg/ha)
22.0	20.0
23.0	15.0
24.6	10.0
21.3	5.0
17.0	0.0

Début de simulation : 28-10-97 jour 301
 Fin de simulation : 23-08-98 jour 235 (ou
 600)

Irrigation: nombre d'arrosages = 2	
Date des arrosages	dose (mm)
27-03-98	30
24-04-98	20
Quantité totale apportée:	50 mm

Fertilisation: nombre d'apports = 2	
Date des apports N	Dose (kg N/ha)
25-02-986	86
21-04-98	50
Quantité totale apportée:	116

Résidus organiques et/ou travail du sol
 Travail du sol au jour 0 sur 22 cm

2. DEVELOPPEMENT DE LA CULTURE

type : plante de jours longs
 Unité de développement : photo-thermique
 Température considérée : température de culture

Stade	date	unités	unités cumulées
depuis le semis			
semis	28-10-97	0	0
stade végétatif			
lev calculé	9-11-97	139	139
amf calculé	23-02-98	215	354
lax calculé	26-04-98	314	667
sen calculé	16-05-98	202	870
lan calculé	11-06-98	504	1374
stades remplissage			
drp calculé	19-05-98	910	910 mat
calculé	18-06-98	594	1504
rec calculé	25-06-98	167	1671
durée du cycle			239 jours

4. BILANS EAU et AZOTE sur le cycle de culture

Somme ETM = 450. mm
 Somme ETR = 450. mm
 Somme ES = 223. mm
 Somme TR = 226. mm
 Somme P = 404. mm
 Réserve en eau maximale utilisée
 = 174 mm

Indices moyens de STRESS :
 swfac turfacs inns tcult-tair
 phase végétative (lev-drp)
 1.00 1.00 0.91 1.20
 phase reproductrice (drp-mat)
 1.00 1.00 0.71 0.62

5. BILANS EAU et AZOTE sur toute la période de simulation (300 jours)

Jours normalisés à 15°C
 Humus: 281
 Résidus: 0

ENTREES	SORTIES EAU (mm)
évaporation	268
pluie	378
transpiration	226
irrigation	50
drainage	0
ruissellement	0
interception feuille	0
interception mulch	0
stock eau initial	571
stock eau final	521
TOTAL	999
TOTAL	1015

Rendement maïs 1997

N° plac	NB PDS	BIOMTOT	BIOMREP	N° plac	NB PDS	BIOMTOT	BIOMREP
1	10	7200	1900			suite	
2	13	9500	2800	54	10	7350	2000
3	10	7100	2050	55	12	9150	2700
4	13	9000	2300	56	13	11200	3050
5	12	9600	2700	57	14	8000	2250
6	12	5300	1050	58	12	8300	2450
7	14	7600	2150	59	12	9100	2150
8	12	7900	2100	60	13	9400	2600
9	9	6200	1700	61	12	9500	2650
10	9	5900	1300	62	12	12700	3000
11	8	6250	1750	63	10	8100	2100
12	11	8800	2150	64	10	9200	2400
13	13	10400	3050	65	12	8100	2300
14	13	10600	3300	66	11	8350	2300
15	13	9300	2500	67	13	6900	2350
16	12	8800	2500	68	12	6450	2150
17	12	9250	2750	69	11	5700	2050
18	9	8600	2450	70	14	8600	2400
19	9	5700	1550	71	11	7750	2050
20	12	8550	2450	72	12	9600	2500
21	13	9950	2750	73	11	10000	2400
22	14	8900	2400	74	14	10700	1850
23	13	8700	2450	75	13	9400	2450
24	13	9400	2400	76	12	7600	2100
25	14	9700	2700	77	11	8600	2550
26	14	9700	2450	78	14	10400	2700
27	11	9350	2400	79	15	10200	2750
28	9	6800	1700	80	13	8500	2150
29	10	8650	2300	81	12	7700	2050
30	9	8200	1850	82	12	10000	2650
31	11	8700	2100	83	12	9800	2400
32	10	8900	2250	84	12	8400	1950
33	12	9350	2400	85	13	8100	2300
34	14	9250	2500	86	11	6200	1450
35	12	8700	2100	87	12	8600	2050
36	12	8100	2150	88	12	9250	2550
37	14	10550	2700				
38	11	9000	2200			moyenne	2286
39	13	7900	2300				
40	11	10950	2850				
41	10	7750	1900				
42	10	7100	1600				
43	9	7500	2000				
44	11	13500	2900				
45	12	8450	2250				
46	10	7250	1950				
47	14	12250	2900				
48	12	9350	2500				
49	14	9400	2000				
50	10	7200	2400				
51	10	10000	2550				
52	12	11000	3250				
53	10	5800	1500				

Rendement blé dur 1998

N° placette	Pds gr placette	Pds gr/ha	rendt./plac(g)	rendt/plac(qx)	N° placette	profondeur (m)
1	339.37	3393700	4524933	45,25	1	
2	606.84	6068400	8091200	80,91	2	0,70
3	496.23	4962300	6616400	66,16	3	1,85
4	478.32	4783200	6377600	63,78	4	
5	455.11	4551100	6068133	60,68	5	0,95
6	579.84	5798400	7731200	77,31	6	
7	552.65	5526500	7368667	73,69	7	1,90
8	511.47	5114700	6819600	68,20	8	2,00
9	348.06	3480600	4640800	46,41	9	
10	572.04	5720400	7627200	76,27	10	
11	479.44	4794400	6392533	63,93	11	1,90
12	540.45	5404500	7206000	72,06	12	
13	598.76	5987600	7983467	79,83	13	2,00
14	622.45	6224500	8299333	82,99	14	
15	430.58	4305800	5741067	57,41	15	
16	582.46	5824600	7766133	77,66	16	
17	524.84	5248400	6997867	69,98	17	
18	601.85	6018500	8024667	80,25	18	2,00
19	551.48	5514800	7353067	73,53	19	
20	582.41	5824100	7765467	77,65	20	
21	526.31	5263100	7017467	70,17	21	
22	562.21	5622100	7496133	74,96	22	
23	664.38	6643800	8858400	88,58	23	
24	555.56	5555600	7407467	74,07	24	
25	639.39	6393900	8525200	85,25	25	
26	539.30	5393000	7190667	71,91	26	1,20
27	462.04	4620400	6160533	61,61	27	
28	572.55	5725500	7634000	76,34	28	
29	655.76	6557600	8743467	87,43	29	2,00
30	595.17	5951700	7935600	79,36	30	
31	520.53	5205300	6940400	69,40	31	1,30
32	506.09	5060900	6747867	67,48	32	1,80
33	404.11	4041100	5388133	53,88	33	
34	496.45	4964500	6619333	66,19	34	
35	356.16	3561600	4748800	47,49	35	
36	355.87	3558700	4744933	47,45	36	1,20
37	392.00	3920000	5226667	52,27	37	2,00
38	209.97	2099700	2799600	28,00	38	2,00
39	221.28	2212800	2950400	29,50	39	
40	323.66	3236600	4315467	43,15	40	2,15
41	372.85	3728500	4971333	49,71	41	2,00
42	388.76	3887600	5183467	51,83	42	
43	413.15	4131500	5508667	55,09	43	
44	322.85	3228500	4304667	43,05	44	
45	405.49	4054900	5406533	54,07	45	
46	330.49	3304900	4406533	44,07	46	1,70
47	412.71	4127100	5502800	55,03	47	1,60
48	354.78	3547800	4730400	47,30	48	
49	421.94	4219400	5625867	56,26	49	2,00
50	539.20	5392000	7189333	71,89	50	0,65
51	501.22	5012200	6682933	66,83	51	
52	686.34	6863400	9151200	91,51	52	
53	430.46	4304600	5739467	57,39	53	0,60
54	603.96	6039600	8052800	80,53	54	
				64,69		moyenne

Légende rotation

Culture :	Sigle utilisé :
BLE	BL
COLZA	CO
CYPRES	CY
JACHERE	JA
MAIS	MA
ORGE	OR
PECHER	PE
POMMIER	PO
PRUNIER	PR
SORGHO	SR
SOJA	SJ
TOURNESOL	TO

N° PARCELLE NOUVELLE/ANCIENNE	ANNEES							
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
1/10	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
2/20	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA	BL
2/21	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
3/30	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
4/40	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
4/41	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
5/50	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO	BL
6/60	PO	PO	PO	PO	PO	PO	JA	BL
6/61	TO	SJ	BL	SR	BL	BL	BL	BL
7/70	PE	PE	PE	PE	PE	PE	JA	BL
7/71	JA	JA	JA	JA	JA	BL	CO	BL
8/80	PE	PE	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
8/81	PE	PE	BL	BL	JA	BL	CO	BL
SITUATION PLACETTE	ANNEES							
1	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
2	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
3	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
4	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA	BL
5	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
6	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA	BL
7	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
8	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
9	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
10	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
11	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
12	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
13	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
14	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
15	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
16	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
17	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
18	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
19	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
20	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
21	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
22	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
23	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
24	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
25	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
26	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
27	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
28	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
29	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
30	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA	BL
31	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
32	PE	PE	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
33	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
34	PO	PO	PO	PO	PO	PO	JA	BL
35	PO	PO	PO	PO	PO	PO	JA	BL
36	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO	BL
37	PE	PE	PE	PE	PE	PE	JA	BL
38	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
39	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
40	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA	BL
41	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO	BL
42	PO	PO	PO	PO	PO	PO	JA	BL
43	PO	PO	PO	PO	PO	PO	JA	BL
44	TO	SJ	BL	SR	BL	BL	BL	BL
45	PE	PE	PE	PE	PE	PE	JA	BL
46	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO	BL
47	TO	SJ	BL	SR	BL	BL	BL	BL
48	TO	SJ	BL	SR	BL	BL	BL	BL
49	TO	SJ	BL	SR	BL	BL	BL	BL
50	TO	SJ	BL	SR	BL	BL	BL	BL
51	JA	JA	JA	JA	JA	BL	CO	BL
52	PE	PE	BL	BL	JA	BL	CO	BL
53	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL
54	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA	BL

N° PARCELLE NOUVEAUC	ANNEES									
	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997			
1/10	TO	TO	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
2/20	PE	SJ	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
2/21	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
3/30	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
4/40	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
4/41	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
N° PLACETTE				ANNEES						
1	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
2	OR	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
3	OR	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
4	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
5	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
6	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
7	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
8	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
9	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
10	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
11	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
12	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
13	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
14	CY	CY	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
15	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
16	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
17	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
18	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
19	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
20	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
21	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
22	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
23	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
24	OR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
25	OR	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
26	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
27	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
28	CY	CY	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
29	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
30	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
31	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
32	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
33	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
34	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
35	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
36	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
37	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
38	CY	CY	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
39	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
40	PE	PE	PE	PE	JA	BL	CO/MA			
41	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
42	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
43	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
44	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
45	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
46	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
47	CY	CY	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
48	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
49	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
50	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
51	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
52	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
53	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
54	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
55	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
56	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
57	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
58	CY	CY	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
59	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
60	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
61	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
62	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
63	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
64	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
65	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
66	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
67	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
68	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
69	CY	CY	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
70	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
71	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
72	CY	CY	CY	CY	JA	BL	CO/MA			
73	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
74	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
75	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
76	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
77	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
78	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
79	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
80	CY	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
81	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
82	PR	JA	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
83	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
84	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
85	PO	PO	PO	PO	JA	BL	CO/MA			
86	CY	CY	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
87	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			
88	TO	SJ	BL	BL	JA	BL	CO/MA			

COMPOSITION CHIMIQUE

Horizon 0-30								
N° placette:	C	M.O	N	C/N	P2 O5	Mg	K2O	Cu
	‰	‰	‰		‰	‰	‰	‰
1	10.8	18.6	1.39	7.77	0.041		0.19	8.7
5	10.8	18.6	1.35	8.00	0.040	0.168	0.26	9.2
6	9.7	16.7	1.25	7.76	0.035		0.22	9.7
7	9.4	16.2	1.17	8.03	0.052	0.145	0.36	6.6
11	9.8	16.9	1.24	7.90	0.064	0.152	0.22	9.9
15	10.6	18.2	1.37	7.74	0.032		0.16	8.0
18	12.1	20.8	1.49	8.12	0.047	0.200	0.33	10.9
19	11.0	18.9	1.28	8.59	0.072		0.36	6.7
20	12.8	22.0	1.49	8.59	0.051		0.42	8.9
21	10.8	18.6	1.35	8.00	0.019		0.17	6.8
26	12.5	21.5	1.65	7.58	0.047	0.206	0.28	7.2
27	13.3	22.9	1.51	8.81	0.055		0.37	7.6
30	14.4	24.8	1.68	8.57	0.066		0.35	11.1
31	13.1	22.5	1.54	8.51	0.066		0.39	8.6
32	11.0	18.9	1.25	8.80	0.063	0.147	0.35	7.0
35	12.6	21.7	1.64	7.68	0.056		0.31	8.1
36	12.0	20.6	1.43	8.39	0.029	0.193	0.15	4.2
37	13.5	23.2	1.39	9.71	0.052	0.198	0.31	19.3
38	14.5	24.9	1.49	9.73	0.079	0.165	0.41	14.0
40	12.2	21.0	1.60	7.63	0.054		0.33	11.0
41	15.0	25.8	1.91	7.85	0.043		0.17	22.4
42	13.2	22.7	1.65	8.00	0.028		0.19	8.1
43	13.6	23.4	1.63	8.34	0.078		0.37	9.4
47	10.9	18.7	1.40	7.79	0.021	0.219	0.14	3.8
47 bis	12.4	21.3	1.61	7.70	0.035		0.17	11.2
48	12.2	21.0	1.51	8.08	0.066		0.27	7.0
51	13.6	23.4	1.56	8.72	0.078		0.36	10.9
52	12.9	22.2	1.44	8.96	0.073		0.35	10.0
53	10.6	18.2	1.26	8.41	0.040		0.31	8.9
54	10.9	18.7	1.35	8.07	0.044		0.23	8.3
36	11.0	18.9	1.41	7.80	0.023	0.205	0.16	3.8
37	11.6	20.0	1.31	8.85	0.041	0.190	0.28	14.6
38	11.8	20.3	1.29	9.15	0.048	0.180	0.31	9.6
47	11.4	19.6	1.46	7.81	0.016	0.235	0.13	3.6
Horizon 30-60								
N° placette:	C	M.O	N	C/N	P2O5	Mg	K2O	Cu
5	9.5	16.3	1.23	7.72	0.029	0.175	0.24	6.4
7	8.3	14.3	1.07	7.76	0.040	0.157	0.27	4.3
11	8.5	14.6	1.15	7.39	0.019	0.162	0.16	8.9
18	9.2	15.8	1.21	7.60	0.020	0.196	0.20	5.6
26	9.7	16.7	1.34	7.24	0.020	0.195	0.15	4.6
32	9.7	16.7	1.15	8.43	0.041	0.153	0.28	5.6
36	11.0	18.9	1.41	7.80	0.023	0.205	0.16	3.8
37	11.6	20.0	1.31	8.85	0.041	0.190	0.28	14.6
38	11.8	20.3	1.29	9.15	0.048	0.180	0.31	9.6
47	11.4	19.6	1.46	7.81	0.016	0.235	0.13	3.6

TEXTURE

Horizon 0-30							
placette:	Ca T	Ca A	CEC	Argile	Limon	Sable	Texture
	%	%		%	%	%	
5	355	124	12.2	33.5	50.9	15.6	ALS
7	375	122	9.7	30.0	54.1	15.9	ALS
11	371	122	8.9	30.3	57.4	12.3	ALS
18	344	122	12.0	36.0	49.5	14.5	ALS
26	351	127	12.6	37.8	52.1	10.1	ALS
32	378	124	9.3	28.7	56.7	14.6	ALS
36	370	127	10.2	33.2	56.2	10.6	ALS
37	367	123	10.1	30.6	55.2	14.2	ALS
38	367	113	10.4	30.3	55.1	14.6	ALS
47	350	138	12.0	37.7	52.5	9.8	ALS
Horizon 30-60							
placette:	Ca T	Ca A	CEC	Argile	Limon	Sable	Texture
5	350	124	11.9	34.8	52.2	13.0	ALS
7	357	111	9.7	30.6	54.0	15.4	ALS
11	390	122	8.4	30.8	56.3	12.9	ALS
18	364	127	10.9	34.2	52.0	13.8	ALS
26	353	126	11.1	35.9	52.0	12.1	ALS
32	372	118	9.5	30.2	56.1	13.7	ALS
36	382	132	10.1	32.8	57.1	10.1	ALS
37	365	119	9.9	30.5	54.4	15.1	ALS
38	363	111	10.1	29.8	55.3	14.9	ALS
47	354	150	11.9	37.1	53.2	9.7	ALS
Horizon 60-100							
placette:	Ca T	Ca A	CEC	Argile	Limon	Sable	Texture
5	341	112	12.5	36.5	44.8	18.7	ALS
7	353	130	10.8	36.9	48.2	14.9	ALS
11	393	96	6.9	26.1	51.5	22.4	A-L-S
18	365	112	8.9	30.7	50.7	18.6	ALS
26	350	111	10.0	32.5	52.7	14.8	ALS
32	363	136	12.3	37.9	49.5	12.6	ALS
36	358	151	10.3	38.6	50.6	10.8	ALS
37	362	128	10.5	35.3	52.4	12.3	ALS
38	349	127	10.3	34.9	51.6	13.5	ALS
47	357	88	9.2	30.2	52.8	17.0	ALS
Horizon 100-150							
placette:	Ca T	Ca A	CEC	Argile	Limon	Sable	Texture
5	0	0	0				
7	424	123	7.2	28.4	53.4	18.2	ALS
11	427	80	5.2	21.6	38.9	39.5	A-L-S
18	391	134	9.3	33.3	47.3	19.4	ALS
26	331	106	11.8	36.5	44.1	19.4	ALS
32	383	165	11.2	40.2	49.1	10.7	A
36	0	0	0				
37	356	151	13.5	42.4	48.3	9.3	A
38	382	134	11.4	39.9	50.5	9.6	ALS
47	359	121	10.6	32.3	42.9	24.8	ALS
ALS	Argile Limono-Sableuse						
A-L-S	Argilo-Limono-Sableux						
A	Argile						