

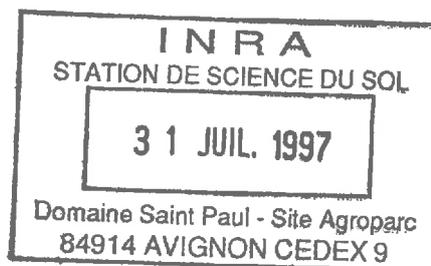
THESE

présentée en vue de l'obtention
du Doctorat de l'Université d'Orléans

Discipline : Sciences de l'Univers
Spécialité : Pédologie

par

Hocine BOURENNANE



Etude des lois de distribution spatiale des sols de Petite Beauce

Application à la cartographie d'un horizon par couplage de méthodes
morphométriques et géostatistiques

Soutenue le 23 Janvier 1997 devant le jury composé de :

J. TRICHET	Président	Université d'Orléans
J.J. MACAIRE	Rapporteur	Université de Tours
C. MILLIER	Rapporteur	ENGREF (Paris)
M.C. GIRARD	Examineur	INAPG
D. KING	Directeur de thèse	INRA (Orléans)
H. WACKERNAGEL	Examineur	Ecole des Mines (Paris)
C. WALTER	Examineur	ENSA-INRA (Rennes)

"Cette étude a été réalisée avec le concours de la Région Centre"

Avant-propos

Avant d'exposer les résultats de ce travail, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué, par leurs conseils ou leur collaboration, à la réalisation de cette thèse financée par le Conseil Régional de la Région Centre.

Je remercie en premier lieu les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Monsieur Jean Trichet, Professeur à l'Université d'Orléans, m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury. Qu'il trouve ici le témoignage de ma gratitude et de mon respect.

Monsieur Jean-Jacques Macaire, Professeur à l'Université de Tours, a suivi mon travail durant trois années avec beaucoup d'intérêt, et bien voulu accepter d'en être l'un des rapporteurs. Je le remercie sincèrement et cordialement.

Monsieur Claude Millier, Directeur Scientifique à l'ENGREF de Paris, également rapporteur de ce travail, a consacré beaucoup de son temps à la lecture attentive et critique de ce manuscrit. Je le remercie pour ses conseils.

Monsieur Michel-Claude Girard, Professeur à l'INAPG, a accepté de participer à mon jury. Je le remercie pour ses remarques constructives.

Monsieur Dominique King, Directeur de Recherches à l'INRA d'Orléans, m'a encadré et m'a guidé depuis mon arrivée dans son équipe de recherche. Son expérience, ses conseils, sa collaboration et sa disponibilité sont d'un apport considérable dans l'aboutissement de ce travail. Qu'il soit vivement remercié pour ses encouragements, sa sympathie, et sa remarquable patience.

Monsieur Hans Wackernagel, Ingénieur de Recherches au Centre de Géostatistique de l'Ecole des Mines de Paris, m'a fait l'honneur de faire partie du jury. Ses conseils et son aide dans le domaine de la géostatistique, en sa qualité de spécialiste, ont été déterminants dans les orientations mathématiques de ce travail. Qu'il soit ici remercié sincèrement.

Monsieur Christian Walter, Maître de Conférences à l'ENSA de Rennes, m'a également fait l'honneur de participer au jury. Je le remercie sincèrement pour le vif intérêt qu'il a porté à ce travail, en me faisant bénéficier de son expérience dans le domaine de l'analyse spatiale en pédologie.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Marcel Jamagne, Directeur de l'Unité de Science du Sol de l'INRA d'Orléans, pour m'avoir accueilli chaleureusement au sein de son Unité, pour ses encouragements et pour l'attention qu'il a tout le temps accordé à ce travail. Qu'il trouve ici le témoignage de ma reconnaissance et de mon respect.

Je remercie également Monsieur Jean-Claude Bégon, Président du Centre INRA d'Orléans, qui a perçu très tôt l'intérêt de ce travail et a contribué à sa réalisation concrète.

C'est avec un grand plaisir que j'exprime également toute ma reconnaissance à Monsieur Michel Isambert qui a suivi mon travail avec attention en me faisant bénéficier de son expérience de terrain dans le domaine de la cartographie des sols, de son esprit critique toujours constructif et pour sa relecture du manuscrit.

Ma reconnaissance s'adresse également à Joël Daroussin, Alain Couturier et Michel Ngongo pour m'avoir fait bénéficier de leurs compétences particulièrement dans l'utilisation des outils informatiques.

Un grand merci à Bernard Renaux et Christian Le Lay qui ont assuré la plus grande partie des campagnes de mesure sur le terrain.

Je remercie également Christine Le Bas pour sa relecture minutieuse du manuscrit. Merci à Odile Duval pour son aide et sa disponibilité dans l'acquisition de nombreux documents bibliographiques.

Je ne remercierai jamais assez pour leur collaboration à un moment ou un autre et leur bonne humeur, Béatrice Noirtin, Lucien Rousset, Sacha Desbourdes, David Dupré, Laurent Raison, Roger Darthout, Bernard Nicoullaud, Pierre Courtemanche, Dominique Arrouays, Philippe Berché, Jacques Roque, Denis Baize, Michel Sarrazin, André Lindor, Monique Soler, Magalie Marolleau et Marie-Pierre Poussineau. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute mon amitié pour eux.

Je tiens aussi à remercier tous les collègues "thésards, DAA, DEA..." avec lesquels j'ai appris énormément de choses et dans divers domaines. Merci donc à Isabelle Aubron, Isabelle Bruant, Rémy Le Parco, Fatiha Attou, Saleck Ould Mohamed, Philippe Chéry, Hassane Benkhadra, Véronique Lecomte, Véronique Souchère, Florence Quesnel, Vincent Chaplot, Boris Bonnaud, Claudy Jolivet et bien sûr Anne-Laure Thomas qui me supporte tous les jours dans notre bureau commun.

Je remercie grandement Monsieur Pelle, Monsieur Coutadeur, et l'ensemble des agriculteurs qui en nous accueillant sur leurs terres ont permis la réalisation de ce travail.

J'en arrive aux remerciements plus personnels et je ne saurais oublier mes parents, mes frères et soeurs, mes belles soeurs, mes neveux, et ma nièce pour leur soutien moral et financier. Je leur dédie ce travail.

Résumé

L'objectif de ce travail est de parvenir à : (1) la compréhension des lois de distribution spatiale des sols d'un secteur de Petite Beauce ; (2) la modélisation spatiale de l'épaisseur d'un ensemble majeur dit ensemble argilo-limoneux et noté *AL* ; (3) la généralisation spatiale sur un grand domaine du modèle établi.

La recherche des lois de distribution spatiale des sols est basée sur l'identification des facteurs à l'origine de la variabilité des sols. Il s'agit donc d'une approche pédogénétique.

Les techniques utilisées pour l'acquisition des données sont principalement : (1) les méthodes classiques de prélèvement et d'analyse des matériaux sur sondages à la tarière ou profils pédologiques ; (2) la géophysique par résistivité électrique pour l'identification en continu des sols et des matériaux qui lui sont sous-jacents ; (3) les Modèles Numériques de Terrain (MNT) pour la quantification des attributs morphologiques du relief.

La méthode consiste à mettre en relation les caractères des sols avec les facteurs de la pédogenèse que sont principalement le matériau parental, la morphologie du relief et le climat. Les résultats montrent une forte relation entre l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux et l'intensité de la pente et son orientation, malgré un relief très peu accentué dans la région d'étude (la moyenne de l'intensité de la pente est d'environ 0,5 %). Cette relation serait en grande partie le résultat de l'action du vent sous climat périglaciaire au cours du quaternaire.

La modélisation spatiale de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux (*EPAL*) en fonction des attributs du relief (intensité de la pente et son orientation) est tout d'abord réalisée à partir d'un modèle de régression (méthode 'non spatiale'). Toutefois, la variabilité résiduelle issue de ce modèle est assez importante. En conséquence, une méthode de la géostatistique non stationnaire a été testée (méthode 'spatiale'). Il s'agit de la méthode de la dérive externe. Cette dernière permet d'intégrer une condition supplémentaire d'universalité dans le système de krigeage. Celle-ci rend compte de la relation linéaire qui existe entre *EPAL* et l'intensité de la pente.

Une étude comparative avec d'autres méthodes d'estimation connues en science du sol (régression linéaire multiple, krigeage ordinaire, krigeage universel, cokrigeage) montre que la méthode de la dérive externe permet les meilleures estimations en moyenne dans le cas de notre étude.

La généralisation spatiale sur un plus grand domaine spatial du modèle établi grâce notamment à un MNT issu de cartes topographiques montre : (1) l'intérêt de la précision des variables auxiliaires (intensité de la pente et son orientation) dans les performances d'estimation du modèle de répartition des sols ; (2) l'efficacité des modèles de régression dans la généralisation spatiale sur des domaines où la variable à estimer est mesurée en un très petit nombre de lieux.

Mots clés : argile limoneuse, facteurs pédogénétiques, MNT, modélisation spatiale, méthode de la dérive externe.

Abstract

This study discusses: (i) the laws of soil spatial distribution in the "Petite Beauce" region, (ii) the prediction of the clayey-loam (*AL*) soil thickness over the study area, (iii) the spatial generalisation of the results at a regional scale.

The determination of the laws of soil spatial distribution needs to develop pedogenetic approach. Three techniques were used for collecting data: (i) conventional sampling of horizons by using auger holes and soil profiles, (ii) geophysics by measuring electrical resistivity for the identification of soil types and underlying materials, (iii) Digital Elevation Models (DEM) by estimating terrain attributes.

The approach consists in determining the relationships between soil parameters and pedogenetic factors such as parent material, topography and climate.

The results show a high relation between *AL* thickness and both slope gradient and its aspect, despite very gently slopes (mean slope is about 0.5 %). This relation would be the result of periglacial wind during the Quaternary.

The spatial modelling of the clayey-loam *AL* thickness as a function of terrain attributes (slope gradient and its aspect) is carried out by a linear regression model (non-spatial method). However, the residual variability from this model is very high. Therefore, a non-stationary geostatistic method is tested (spatial method): the external drift method. This method consists in integrating into the kriging system a supplementary universality condition about the linear relation existing between *AL* thickness and slope gradient.

A comparative study with other interpolation methods well known in soil science (multi-linear regression, ordinary kriging, universal kriging, cokriging) shows that the external drift method performs the best estimations.

The spatial generalisation of the established model over a large area, using DEM resulting from topographic maps, shows: (i) the importance of the accuracy of the auxiliary variables in estimation of the soil variable, (ii) the performance of the regression models in the spatial generalisation in areas where the variable to estimate is not sampled.

Keywords: clayey-loam, pedogenetic factors, DEM, spatial modelling, external drift method.

Sommaire

Introduction générale

Première partie : Présentation de la démarche

- Chapitre I :** Démarches cartographiques en pédologie
Chapitre II : Approche développée
Chapitre III : Cadre général : présentation du milieu physique

Deuxième partie : Recherche des lois de distribution spatiale des sols selon les principaux facteurs pédogénétiques

- Chapitre IV :** Identification et caractérisation des principaux matériaux et horizons pédologiques
Chapitre V : Etude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse selon le matériau parental
Chapitre VI : Définition et caractérisation des principaux attributs du relief
Chapitre VII : Etude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse et des matériaux sous-jacents selon les attributs du relief
Chapitre VIII : Autres facteurs pédogénétiques et synthèse relative aux résultats de la deuxième partie

Troisième partie : Modélisation spatiale et généralisation

- Chapitre IX :** Optimisation de l'estimation de la variable sol : épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux
Chapitre X : Sensibilité du modèle de répartition des sols et généralisation des résultats à partir des données disponibles

Conclusion générale

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le sol est la source nutritive majeure des plantes, c'est aussi un lieu de distribution des flux de matière et d'énergie dans le paysage. Un mauvais aménagement du sol conduit souvent à une réduction de la productivité agricole et à des problèmes d'environnement qui reviennent chers aux collectivités.

Depuis quelques années, on note une demande accrue de modélisation des processus qui ont lieu dans le sol et/ou dans le paysage. L'objectif est de mieux comprendre les processus en cause et par conséquent, agir pour diminuer les risques de pollutions du sol et du sous-sol.

Dans ce contexte, la Petite Beauce, région de cultures intensives où l'irrigation est généralisée, connaît depuis quelques années un abaissement du niveau de sa nappe phréatique ainsi qu'une augmentation importante de la teneur en nitrates. Ainsi, l'Unité de Science de Sol de l'INRA d'Orléans réalise des recherches en collaboration avec des partenaires régionaux (Universités, CNRS, BRGM, DIREN, Chambres d'Agriculture) pour déterminer les processus à l'origine de ces phénomènes.

Le travail que nous présentons ici s'inscrit au sein d'un dispositif multiorganisme qui vise à gérer plus efficacement l'eau et les solutés, et à lutter contre la pollution de la nappe phréatique de Beauce. Il répond particulièrement à une demande de connaissance des sols à l'échelle régionale.

Notre objectif premier est de rechercher d'abord les lois de distribution spatiale des sols, et plus particulièrement d'un ensemble majeur dit ensemble argilo-limoneux et noté *AL* en fonction des facteurs de sa formation ou des paramètres du milieu qui lui sont liés.

En effet, la formation des sols a été depuis longtemps rattachée à un certain nombre de facteurs dits facteurs de pédogenèse. Dokuchaev en 1892 (Dokuchaev, 1948) et Hilgard en 1892 (Fanning & Fanning, 1989) étaient les premiers à reconnaître l'existence de cinq facteurs de formation du sol.

Dokuchaev a présenté son idée qualitative de formation des sols sous forme d'une équation $S = f(cl, v, o, p)t^0$ où S = sol ; cl = climat d'une région donnée ; v = végétation ; o = organismes ; p = matériau parental ; t^0 = âge relatif. Nous remarquons que le relief n'est pas pris en compte dans cette équation. En effet, celle-ci a été conçue sur la base des sols zonaux, c'est-à-dire des sols dépendant essentiellement des facteurs climat et végétation climatique.

L'équation de Jenny, (1941) est plus générale et plus ouverte. Celle-ci a pour expression $S = f(cl, v, o, r, p, t, \dots)$ où nous avons en plus le relief (r) et la possibilité d'inclure d'autres facteurs (e.g. les dépôts éoliens).

Notre second objectif est d'établir un modèle prédictif permettant d'estimer l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux (*EPAL*) en tout point du domaine d'étude où *EPAL* est inconnue. En effet, il est souvent impossible d'acquérir des données sur la variable à estimer en tout point d'un espace donné. Ainsi, utilise-t-on fréquemment un échantillon en nombre réduit pour prédire les valeurs probables de la caractéristique du sol considérée en des endroits non échantillonnés du domaine d'étude.

En cartographie pédologique dite conventionnelle, le découpage de la couverture pédologique en unités cartographiques (*uc*) suppose qu'une variable du sol dans une *uc* donnée a une moyenne plus ou moins différente de ses moyennes dans les autres *uc* (Bascomb & Jarvis, 1976 ; Boulaine, 1980). Des études rétrospectives (Bregt, 1988 ; Walter, 1990 ; Leenhardt *et al.*, 1994) ont montré qu'au sein d'une *uc* les variances sont souvent élevées. Il est préférable donc de réaliser la prédiction spatiale des propriétés du sol que l'on souhaite obtenir pour alimenter les modèles.

Cependant, de nombreuses propriétés du sol, importantes pour la modélisation et la gestion de l'espace, sont coûteuses, soit en moyens techniques, soit en temps de travail. Afin de limiter ces coûts, il paraît opportun d'identifier des variables faciles d'accès et de rechercher les liens qui les unissent aux variables désirées. Par exemple, les relations entre la morphologie du relief et les propriétés du sol sont largement utilisées comme un outil pour la cartographie de ces propriétés (Aandahl, 1948 ; Furley, 1968 & 1971 ; Beckett, 1968). Cette approche reste toutefois empirique, c'est-à-dire basée principalement sur le diagnostic d'une expertise visuelle du terrain et des cartes topographiques. Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) offrent un moyen pour quantifier les attributs morphologiques susceptibles de jouer un rôle dans le développement et la distribution des sols dans le paysage. Aussi, il est nécessaire de développer et d'appliquer des méthodes statistiques robustes qui optimisent l'utilisation des corrélations entre le sol et les facteurs pédogénétiques dans la prédiction spatiale des propriétés du sol.

Le troisième et dernier objectif est d'examiner les possibilités de généralisation spatiale sur de grands espaces du modèle établi. Pour ce faire, nous vérifions la robustesse de ce modèle selon la densité de l'échantillonnage et la précision des variables utilisées. Les variables aisément disponibles (issues de documents ou de bases de données déjà accessibles) sont privilégiées et nous cherchons à déterminer l'information complémentaire nécessaire pour atteindre une précision donnée.

Le travail est présenté en trois grandes parties. La première partie situe le cadre général du travail. La deuxième partie couvre le premier objectif énoncé ci-dessus et concerne la recherche des lois de distribution des sols. La troisième et dernière partie englobe les deux derniers objectifs relatifs à la modélisation et à la généralisation cartographique des lois de distribution des sols.

La première partie est composée de trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique succincte sur les démarches cartographiques en pédologie. Le deuxième chapitre présente l'approche développée pour la réalisation de ce travail. Le milieu d'étude est présenté dans le dernier chapitre.

La deuxième partie de ce travail est consacrée à la recherche des lois de distribution spatiale des sols et plus particulièrement de l'ensemble argilo-limoneux selon les principaux facteurs pédogénétiques. Cette partie est composée de cinq chapitres. Dans un premier chapitre, nous nous intéressons à l'identification et à la caractérisation des principaux matériaux et horizons

pédologiques sur le secteur d'étude. Cela permet d'envisager dans un second chapitre l'étude de la distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux en fonction du matériau parental. L'étude des relations entre l'ensemble argilo-limoneux et les attributs morphologiques du relief (quatrième chapitre de cette partie) est réalisée après une présentation de la modélisation du relief et de la quantification des attributs morphologiques (troisième chapitre). Enfin, nous terminons cette partie par un cinquième chapitre dans lequel nous posons d'autres hypothèses relatives à l'action d'autres facteurs pédogénétiques sur la distribution actuelle des sols dans l'espace considéré.

La dernière partie de ce travail, constituée de deux chapitres, est consacrée à la modélisation spatiale de l'ensemble argilo-limoneux et à la généralisation des résultats. Dans le premier chapitre de cette dernière partie, il s'agit de rechercher la méthode d'estimation qui permet la meilleure prédiction à moindre coût de la variable sol qui nous intéresse, à savoir l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux (*EPAL*). Enfin, dans le dernier chapitre de ce travail, nous abordons les problèmes de sensibilité du modèle de prédiction à la précision et à la densité des données d'entrée et nous terminons par un essai de généralisation sur une surface plus grande à partir des données disponibles.

PREMIERE PARTIE

PRESENTATION DE LA DEMARCHE

Introduction

Les sols présentent une forte variabilité dans l'espace géographique. Ceci est connu depuis très longtemps par les pédologues. Ainsi, l'étude des sols a très rapidement été accompagnée d'une analyse spatiale. Dans cette dernière, une grande attention est accordée à l'étude des facteurs pédogénétiques afin de mieux comprendre et de déterminer l'origine de la distribution des sols et leur évolution dans le paysage.

La grande diversité des sols et de la morphologie des paysages est à l'origine d'un grand nombre de démarches en cartographie pédologique. Il est difficile dans le cadre de ce travail d'en faire une présentation objective et exhaustive. Aussi, s'attachera-t-on seulement à :

- dégager les principaux concepts des démarches en pédologie et énumérer les difficultés rencontrées pour chaque démarche,
- développer les approches statistiques appliquées en pédologie depuis pratiquement deux décennies,
- préciser les approches utilisant la morphologie du relief dans l'étude des sols.

1. Brève description des méthodes de cartographie en pédologie

La couverture pédologique est un continuum tridimensionnel. Pour un objectif pratique d'application, ou bien à des fins didactiques, le pédologue en propose conventionnellement un découpage en sous-ensembles de même nature.

La couverture pédologique est circonscrite latéralement par des limites naturelles ou artificielles telles que des roches nues, des rivières, des lacs, des mers, des dépôts récents bruts ou des limites d'origine humaine (Baize, 1986). A l'intérieur de ces limites naturelles, chaque couverture pédologique n'est pas homogène. Selon les trois axes de l'espace, il existe toute sorte de gradients de variation. Cette variabilité naturelle interne des couvertures pédologiques n'est pas aléatoire, mais elle est déterminée par les variations dans l'espace des facteurs de la pédogenèse sommés au cours du temps (Jenny, 1941 ; Bocquier, 1984 ; Pédro, 1989). Cette variabilité spatiale tridimensionnelle a rendu à la fois nécessaire et délicate la cartographie des sols, qui est un mode possible de représentation de la variabilité interne des couvertures pédologiques.

La couverture pédologique ne se présente pas à l'observation immédiate sous la forme d'objets individualisés mais comme une réalité continue à variations progressives. Toute stratification du milieu s'opère donc par combinaison d'un certain nombre de critères sélectionnés. Ce découpage se fait nécessairement sous l'influence déterminante des caractéristiques les plus visibles. Mais les modifications de ces critères peuvent être tellement progressives que les limites introduites auront un caractère parfois artificiel.

Sous le terme de 'cartographie pédologique' se cache tout un cheminement intellectuel au cours duquel se succèdent des activités distinctes (Jamagne, 1979 ; Boulaine, 1980 ; Girard *et al.*, 1989) : (1) recueil des informations sur le terrain ; (2) découpage intellectuel du continuum en unités typologiques selon certains critères que l'on sélectionne, que l'on hiérarchise en utilisant des seuils ; (3) délimitation géographique des unités typologiques ; (4) rédaction d'une notice explicative.

Cependant, lorsqu'un pédologue veut publier une carte à des échelles dites moyennes ou petites, il se trouve confronté à un problème d'expression du résultat de ses travaux (King *et al.*, 1994) :

- Au plan graphique, il est presque toujours obligé de regrouper des objets qu'il aurait distingués s'il avait pu s'exprimer à une échelle graphique plus grande. Il est aussi confronté à la difficulté de tracer certaines limites, tant il existe toutes sortes de transitions. C'est ainsi que le pédologue cartographe utilise les notions d'unités cartographiques simples et complexes proposées par le "Soil Survey Manual" (1951) et reprises par le "CPCS" (1967),
- Au plan sémantique, il est souvent contraint de donner une étiquette assez globale pour désigner synthétiquement les différentes unités cartographiques. Autrement dit, il présente chaque unité à travers une caractérisation morphologique et analytique d'un volume jugé représentatif de l'unité : c'est ce qu'on appelle 'le profil type'. Une telle présentation considère alors implicitement la couverture pédologique comme homogène au sein d'une unité cartographique.

Néanmoins, on note que les cartographes informent de plus en plus leurs documents du degré de pureté et des niveaux de confiance au sein des unités cartographiques (Beckett & Bie,

1975 ; Bregt *et al.*, 1987 ; Favrot, 1989 ; Jamagne *et al.*, 1994). Il est par exemple indiqué des valeurs d'écart-type pour les différentes propriétés du sol ou de variantes de sol existant, au sein d'une unité cartographique (Walter, 1990). Il est par ailleurs exprimé la nature des variations (Aistle *et al.*, 1969 ; Fridland, 1976 ; Boulaine, 1984 ; King, 1984).

Le profil type est fréquemment choisi de façon empirique lors de la prospection cartographique. Un biais est alors introduit en choisissant des profils exprimant clairement un phénomène pédogénétique mais qui ne sont pas nécessairement représentatifs de la population dont ils sont extraits (King *et al.*, 1992). De ce fait, Girard & King, (1988) ont proposé de remplacer la notion de profil type par celle de profil de référence, déterminé en employant des techniques d'analyses de données.

Malgré cela, plusieurs auteurs estiment qu'on ne peut pas définir un sol seulement à partir d'une succession verticale d'horizons en un point donné (le profil type), mais qu'il est nécessaire de décrire l'organisation verticale et latérale tridimensionnelle des horizons (Girard, 1983). C'est ainsi que s'est en particulier développée la méthode dite 'd'analyse structurale' (Boulet *et al.*, 1982a ; Boulet *et al.*, 1982b) dans laquelle est réalisée une description verticale et latérale des volumes pédologiques élémentaires que sont les horizons. Ce type d'analyse est également l'une des démarches qui semble le mieux adaptée pour la connaissance de l'organisation et du fonctionnement des couvertures pédologiques de façon indépendante de tout système de référence et en particulier de tout système de classification (Bocquier, 1973 ; Boulet *et al.*, 1982a).

Selon Ruellan *et al.*, (1989), l'analyse structurale est une démarche qui permet la découverte de la réalité pédologique en travaillant à très grande échelle. Une fois qu'on a réalisé l'étude très détaillée à l'échelle d'une unité de relief, cet outil facilite la représentation graphique aux échelles plus petites des structures et des fonctionnements de la couverture pédologique. Toutefois, ce changement d'échelle reste à développer pour que l'analyse structurale soit entièrement opérationnelle.

Conclusion partielle

La forte variabilité des sols et des facteurs à l'origine de leur formation a conduit à un grand nombre de démarches en cartographie pédologique. Ces démarches sont pour la plupart des approches typologiques, qui reposent elles-mêmes sur une analyse pédogénétique de la couverture pédologique.

Cependant, le peu de données réellement quantifiées sur les variables du sol et sur les facteurs de la pédogenèse, ont fait de ces démarches des approches empiriques. De plus, ces approches se heurtent, surtout aux moyennes et petites échelles, aux difficultés de la représentation graphique de la variabilité des sols. Ce problème accentue ainsi le caractère empirique de ces approches, l'expression des résultats sous forme de cartes restant en deçà des connaissances réellement acquises sur le territoire.

Pour donner plus de rigueur scientifique aux travaux cartographiques, des tentatives de formalisation ont été apportées telles que la notion de profils de référence déterminés statistiquement ou l'introduction de l'analyse structurale.

Ces tentatives de formalisation en pédologie ont coïncidé avec le développement très important des statistiques spatiales issues de la recherche en mathématiques. Ainsi un gain de

temps considérable a été acquis en terme de développement d'outils d'analyse des données à support spatial. Ce développement n'est pas spécifique à la cartographie des sols.

2. Développement des approches de la statistique spatiale

L'utilisation des statistiques dans l'étude de la variabilité des sols a été largement développée dans les années 70 en particulier à l'aide des techniques dites d'analyse de données, et le plus souvent à l'échelle de la parcelle agricole (Beckett & Webster, 1971 ; Legros, 1978a et 1978b). Cela dit, Robinson & Lloyd (1915), Davis (1936) et Harradine (1949) ont été parmi les premiers à rechercher la variabilité du sol à l'intérieur de séries de sol en utilisant les techniques statistiques. Cette variabilité à l'intérieur et entre les profils, morphologiquement similaires a été prouvée par Drees & Wilding (1973), Smeck & Wilding (1980) et Mausbach *et al.*, (1980). Comme conséquences à ces travaux, des efforts ont été déployés pour déterminer l'optimum d'échantillonnage. Ainsi, les concepts statistiques et géostatistiques se sont avérés nécessaires pour identifier et analyser la variabilité spatiale des propriétés du sol.

Les techniques statistiques permettant l'estimation dans l'espace d'une propriété du sol à partir d'un nombre fini d'échantillons sont nombreuses. On peut citer par exemple la méthode des polygones de Thiessen qui associe à chaque point à estimer la valeur de l'observation la plus proche. Cette méthode a été utilisée par Marsman & De Gruijter (1986).

La géostatistique est une piste relativement récente pour étudier la variabilité spatiale. Elle est basée sur la théorie des variables régionalisées développée par Krige (1951) et Matheron (1965), (voir Journel & Huijbregts, 1978 ; Cressie, 1991). Les techniques géostatistiques ont été reprises par de nombreux auteurs en science du sol pour l'estimation des propriétés du sol et la quantification de leur variabilité spatiale. Nous pouvons citer, à l'étranger les travaux de : Nortcliff (1978) ; Burgess & Webster (1980a, 1980b) ; Webster & Burgess (1980) ; Mc Bratney *et al.*, (1982) ; Wopereis *et al.*, (1982) ; Webster & Burgess (1983) ; Oliver (1984) ; en France, les travaux de : Gascuel (1984) ; Voltz (1986) ; Walter (1990) ; Chéry (1995).

Ces techniques géostatistiques procèdent en deux étapes : (1) l'analyse de la structure spatiale de la variable étudiée grâce au variogramme ; (2) l'emploi d'une technique de prédiction spatiale (par exemple le krigeage).

L'intérêt des techniques géostatistiques est de permettre, à la fois, une estimation des propriétés du sol dans l'espace, mais aussi une mesure de la qualité de cette estimation. Ces techniques ont surtout été employées à grande échelle en science du sol où elles ont contribué à la compréhension de la variabilité spatiale des propriétés du sol. Cependant, il faut souligner que ces techniques de géostatistique, particulièrement dans le cas monovarié, prennent en compte moins d'informations que la cartographie pédologique conventionnelle puisque souvent, seuls les caractères intrinsèques du sol entrent dans l'analyse statistique.

Ainsi, depuis quelques années, il y a eu l'émergence d'approches couplées qui visent à lever les imperfections de la prédiction à partir : (1) des cartes des sols seules en introduisant la notion de la dépendance spatiale entre les observations et (2) de la géostatistique elle-même (surtout dans le cas monovarié) en introduisant la notion de strate dans le calcul du variogramme et le krigeage. Dans ce cadre, nous pouvons citer les travaux de Stein *et al.*, 1988 ; Voltz & Webster, 1990 ; et Van Meirvenne *et al.*, 1992 ; Rogowski, 1996. Ces auteurs notent un gain de précision des estimations spatiales par les méthodes couplées par rapport aux méthodes uniquement basées sur la carte des sols ou avec les méthodes de géostatistique

monovariante. Cependant, ce gain de précision dépend beaucoup de la précision de la carte pédologique servant à la stratification.

La géostatistique multivariante et particulièrement le cokrigage offre la possibilité d'obtenir des estimations sur une variable avec une meilleure précision, en utilisant les données fournies éventuellement par d'autres variables. Le cokrigage se sert de la corrélation spatiale entre la variable à estimer dite variable d'intérêt, et les autres variables dites variables auxiliaires qui sont généralement plus échantillonnées que la variable d'intérêt. Autrement dit, il se sert des relations entre les variables pour améliorer l'estimation de la variable la moins échantillonnée. Une observation de bon sens permet de prévoir que le cokrigage n'est pas intéressant pour des variables qui ne sont pas corrélées, ou au contraire en trop forte corrélation. Cette technique a été utilisée en science du sol par de nombreux auteurs. Nous pouvons citer les travaux de : Mc Bratney & Webster, 1983 ; Vauclin *et al.*, 1983 ; Van Meinvenne & Hofman, 1989 ; Voltz & Goulard, 1994 ; Lesch *et al.*, 1995.

Enfin, nous soulignons l'existence d'une approche, prospective pour l'instant, basée sur la théorie des ensembles flous (Zadeh, 1965). Dans cette approche, un point de mesure est associé aux différentes unités cartographiques par différents degrés d'appartenance. Ceci permet de rendre compte de la continuité spatiale des points de mesure. Cette approche a permis à Mc Bratney & De Gruijter (1992) de construire une typologie des sols. Il s'agit donc d'une méthode d'analyse spatiale qui tient compte de la qualité des contours cartographiques et des ressemblances entre unités cartographiques. Nous pouvons citer les travaux de Burgess & Webster, 1984 ; Burrough, 1989 ; Burrough, 1992 ; Burrough *et al.*, 1992 ; Lagacherie, 1992 ; Mc Bratney *et al.*, 1992 ; Odeh *et al.*, 1992a & 1992b.

Conclusion partielle

L'introduction des statistiques dans le domaine de la cartographie des sols a permis de formaliser les approches précisant les plans d'échantillonnages et la nature des variables traitées. Elles ont surtout été à l'origine de démarches quantitatives permettant toute la rigueur nécessaire à la reproductibilité d'un travail scientifique.

Toutefois, dans les démarches utilisant des statistiques non-spatiales, l'estimation des variables du sol est le plus souvent réalisée sans tenir compte : (1) de l'ensemble des facteurs du milieu utilisés dans la démarche pédogénétique en cartographie conventionnelle ; (2) de la structure spatiale des observations ponctuelles qui servent pour chaque estimation. Ceci est dû en grande partie à la théorie de l'échantillonnage (Cochran, 1977) sur laquelle cette démarche repose, et dans laquelle on suppose l'indépendance entre les observations appartenant à des unités cartographiques différentes. Cette approche n'est valable que pour une représentation de la variabilité du sol ou d'une variable du sol selon un modèle discontinu (Gascuel *et al.*, 1993).

Les méthodes géostatistiques permettent de bien représenter les variations continues du sol ou bien d'une de ses variables en mettant l'accent sur la dépendance spatiale et la configuration des observations ponctuelles considérées pour chaque estimation effectuée. Cependant, dans le cas monovariante, les méthodes géostatistiques présentent l'inconvénient de ne tenir compte que des caractéristiques intrinsèques du sol négligeant ainsi les facteurs du milieu dont l'importance est reconnue dans la formation et le fonctionnement des sols.

Actuellement, nous assistons à l'émergence des approches qui couplent :

- (1) les méthodes géostatistiques et la démarche pédogénétique (l'analyse cartographique conventionnelle) en introduisant la notion de stratification pédologique dans le calcul du variogramme et par conséquent dans l'estimation par krigeage,
- (2) l'information sur le sol et l'information sur les facteurs du milieu (e.g. relief, climat,...) dans un objectif d'optimisation de l'estimation d'une variable du sol ou bien d'une variable du milieu tout en tenant compte de la dépendance spatiale et de la géométrie des points d'observation : c'est le cas de la géostatistique multivariable.

Les travaux qui ont utilisé ces approches couplées montrent un gain de précision significatif des estimations spatiales réalisées.

3. Utilisation des relations entre sol et morphologie du relief

Les informations pédologiques sont fréquemment en nombre réduit car elles demandent des prélèvements en profondeur et des analyses au laboratoire qui peuvent être coûteuses. L'un des moyens utilisés pour réduire les coûts de prospection cartographique est d'étudier les relations existant entre les propriétés des sols et des variables aisément accessibles d'un point de vue géographique. Ce type d'approche est largement utilisé de façon implicite par le pédologue lors des travaux dits 'conventionnels' de cartographie des sols. L'une de ces variables aisément accessibles est le relief, variable particulièrement pertinente puisqu'elle est elle-même l'un des facteurs contrôlant le développement des sols.

Un exemple de relation entre les sols et leur environnement est fourni par les études de géomorphologie et l'importance donnée à celle-ci dans le tracé des limites pédologiques. Par exemple, la dissymétrie des versants est un phénomène reconnu et largement utilisé en cartographie (Horemans, 1984 ; Isambert, 1984 ; Isambert *et al.*, 1996).

Antérieurement à ces travaux, la distribution des sols dans le paysage a retenu l'attention de plusieurs auteurs (Furley, 1968 & 1971 ; Beckett, 1968 ; Davidson, 1977 ; Kirkby, 1977).

Les termes 'topographie' et 'relief' sont des synonymes utilisés pour qualifier la configuration de la surface de la terre (Jenny, 1941 & 1980). Les principaux attributs topographiques utilisés pour définir le relief sont l'intensité de la pente, et son orientation. D'autres caractéristiques plus complexes peuvent être déduites de l'analyse du relief, telles que les courbures (ou convexités) de la pente.

L'intensité de la pente et l'orientation de la pente possèdent un effet significatif sur beaucoup de processus qui sont importants dans la formation des sols. Les études de Aandahl (1948), Cooper (1960), Finney *et al.*, (1962), Franzmeier *et al.*, (1969), Losche *et al.*, (1970), Adams *et al.*, (1975), Adams & Raza (1978), Macyk *et al.*, (1978), Dalsgaard *et al.*, (1981), et Daniels *et al.*, (1987) ont montré l'importance de la position sur le versant et de l'orientation de la pente sur la variabilité des propriétés du sol. D'autres chercheurs ont examiné l'influence des convexités de la pente sur le mouvement et la distribution de l'eau, ainsi que sur la variabilité du sol (Anderson & Burt, 1978 ; O'Loughlin, 1981 ; Burt & Butcher, 1985), tandis que Webster, (1977) a étudié l'influence des convexités sur la variabilité du sol.

Le concept de chaîne de sol ou de séquence de sol a très tôt permis la prédiction qualitative des processus qui ont lieu dans des parties du paysage (Hugget, 1975 & 1976 ; Conacher & Dalrymple, 1977). Ainsi, un grand nombre de modèles ont été conçus pour expliquer l'influence de la morphologie des versants sur la différenciation du sol, mettant en corrélation les paramètres de versant avec les variables du sol. Aandahl (1948) reconnaît

l'influence du plan de la surface et de la topographie sur la formation et la distribution du sol. Troeh (1964) fut le premier à développer une méthode quantitative pour estimer la pente et ses convexités, et à rapporter celles-ci aux propriétés du sol. Ses travaux indiquent une forte corrélation entre les formes du relief et quelques variables du sol. Ces liaisons furent interprétées en termes d'influence de la configuration de la surface du sol sur le drainage naturel du sol.

Les récents développements en télédétection et les techniques photogrammétriques (Evans, 1980) ont accru la possibilité de produire des Modèles Numériques de Terrain (MNT). Ceux-ci permettent de généraliser les approches numériques de la morphologie, formalisant ainsi les relations entre les variables du sol et des caractères morphométriques (Moore *et al.*, 1991).

Les MNT sont établis sur la base de l'altimétrie du domaine étudié. Cette information sur l'altitude, qu'elle soit sous forme d'un semis de points ou bien sous forme de cartes topographiques, permet de réaliser une représentation du relief sous forme d'un maillage régulier où l'altitude est connue aux noeuds ou au centre de chaque maille suivant la méthode de calcul utilisée.

A partir d'un MNT, un certain nombre d'attributs topographiques peuvent être calculés sur la base d'un calcul de dérivées partielles. Ainsi, ces attributs sont appelés communément 'attributs dérivés' ou bien 'attributs topographiques dérivés'.

Speight (1974 & 1980) a décrit plus de vingt attributs topographiques dérivés qui peuvent être utilisés pour décrire la morphologie des paysages mais ils ont aussi une signification hydrologique. A titre d'exemple, l'attribut topographique dérivé 'convexité verticale' permet de décrire la morphologie de la pente (convexe ou concave) mais il a aussi une signification hydrologique en termes d'accélération et de décélération du flux, autrement dit d'érosion et de dépôt des particules. Une présentation plus détaillée des MNT et de leurs attributs dérivés est incluse dans le chapitre VI.

Généralement, les méthodes de régressions simples ou multiples sont les principaux outils statistiques utilisés pour mettre en évidence les corrélations sol-morphologie et pour prédire des variables du sol en des endroits non échantillonnés. Dans ce cadre, nous pouvons citer les travaux de : (Ruhe & Walker, 1968 ; Odeh *et al.*, 1991 ; Bourennane, 1992 ; Daroussin *et al.*, 1992 ; Bell *et al.*, 1992 ; Moore *et al.*, 1993 ; Righi *et al.*, 1993 ; Bell *et al.*, 1994 ; Odeh *et al.*, 1994 ; Arrouays, 1995). Ces travaux ont montré d'une façon quantitative l'intérêt de la prise en compte des attributs du relief dans la compréhension de la distribution des sols dans le paysage et dans l'amélioration de la prédiction de différentes variables pédologiques importantes dans la gestion et la protection de l'environnement.

Conclusion partielle

Le relief est un facteur déterminant dans l'approche cartographique dite conventionnelle exposée dans le paragraphe 1 de ce chapitre, puisqu'il correspond à l'un des facteurs de la pédogenèse. De plus, la morphologie du relief, bien qu'elle fût pendant longtemps utilisée en tant que variable qualitative ou qualitative ordonnée, a souvent permis aux pédologues : (1) de faire une distinction entre les différents sols dans le paysage ; (2) d'établir des modèles empiriques mais très opérationnels de distribution des sols dans le paysage.

De nos jours, il est possible d'avoir une information exhaustive et numérique sur les différents attributs du relief grâce aux Modèles Numériques de Terrain. Ainsi, il est plus facile d'envisager l'utilisation de méthodes numériques qui couplent l'information pédologique et l'information morphologique connue d'une façon exhaustive dans le but : (1) de prédire au mieux et à moindre coût des propriétés du sol ; (2) d'établir des modèles de répartition des sols basés sur des traitements statistiques robustes, et dans lesquels on puisse formaliser les mécanismes pédogénétiques et morphogénétiques. Ces relations qui sont reconnues et utilisées depuis toujours dans l'approche pédogénétique d'une façon empirique se voient utilisées dans ce cas d'une façon quantitative. Ainsi, par cette démarche couplée, nous apportons davantage d'analyse numérique au raisonnement pédogénétique et réciproquement.

Conclusions du chapitre I

Dans ce chapitre, nous avons abordé succinctement trois points. Tout d'abord, nous avons présenté une brève description des méthodes de cartographie en pédologie. Dans ces méthodes, les facteurs de la pédogenèse bien qu'ils soient rarement quantifiés, possèdent un poids important dans le raisonnement du pédologue et dans l'établissement de modèles de distribution des sols en fonction des facteurs de leur formation. Ces méthodes de cartographie qui aboutissent à des modèles empiriques de la distribution des sols dans le paysage, ont par la suite montré leurs insuffisances particulièrement en ce qui concerne la qualité de la prédiction des variables du sol et la difficulté à représenter la variabilité des sols.

Aussi des tentatives de formalisation de la démarche cartographique ont été réalisées afin d'essayer de lever les imperfections de cette démarche et, en même temps, de donner à celle-ci plus de rigueur scientifique. Ces tentatives ont coïncidé avec le développement des approches de la statistique spatiale, deuxième point que nous avons évoqué dans ce chapitre.

Les approches de la statistique spatiale ont peu tenu compte dans un premier temps des acquis des approches empiriques, particulièrement en ce qui concerne la prise en compte des facteurs de la pédogenèse dans l'étude et la modélisation de la variabilité spatiale des sols. Elles ont ainsi abouti soit à des modèles très discontinus de la variabilité du sol (cas de la statistique classique), soit à des modèles qui représentent bien les variations continues du sol mais se basent uniquement sur les caractéristiques intrinsèques du sol (cas de la géostatistique monovariante). De plus, l'une ou l'autre des deux méthodes (statistique classique ou bien géostatistique monovariante) supposent beaucoup de données sur la variable étudiée. Autrement dit, elles constituent des méthodes lourdes et coûteuses.

Les possibilités d'acquisition de données numériques d'une façon exhaustive sur de grandes surfaces, par exemple grâce aux MNT, aux images satellitaires, ou plus généralement aux techniques de géophysique ouvrent des perspectives de développement de méthodes quantitatives qui couplent des données de nature et de densité différentes dans la modélisation et la prédiction de la variable sol.

Le travail que nous présentons ici se situe dans ce cadre. En effet, au travers d'un couplage de données pédologiques connues avec une faible densité d'échantillonnage et de données morphologiques sur le relief connues de façon exhaustive, nous essayons d'expliquer et de modéliser la distribution spatiale des sols d'un secteur en Petite Beauce.

Notre approche est dans la filiation des travaux de cartographie conventionnelle puisqu'elle privilégie la recherche de critères cartographiques du relief significatifs des phénomènes à l'origine de la distribution des sols. Elle se distingue de ces travaux conventionnels

puisqu'elle inclut volontairement une démarche quantitative. Cette démarche s'appuie sur les techniques géostatistiques qui sont appropriées pour décrire et modéliser la variabilité spatiale. De plus, elle introduit une approche multivariable de la géostatistique non stationnaire, approche qui permet d'inclure les relations déterministes entre les variables du sol et les attributs du relief.

Introduction

Le travail que nous présentons ici est effectué selon plusieurs niveaux d'investigation et utilise des données et des méthodes qui ne sont pas de même nature. De ce fait, nous avons jugé nécessaire de présenter de façon synthétique l'ensemble de la démarche adoptée, espérant ainsi faciliter la tâche du lecteur.

1. Objet d'étude et différents niveaux d'investigation

Comme il est mentionné en introduction générale, les objectifs de ce travail peuvent être résumés en trois points :

1. rechercher les lois de distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux (*AL*) en fonction des facteurs de sa formation ou des paramètres environnementaux qui lui sont liés,
2. établir un modèle prédictif qui permet d'estimer au mieux l'épaisseur de *AL* (*EPAL*),
3. examiner les possibilités de généralisation spatiale du modèle établi.

Notre objet d'étude est donc le sol et particulièrement l'épaisseur d'un horizon majeur dit ensemble argilo-limoneux (*AL*). Le choix de cet ensemble est orienté par son importance dans les études et la modélisation des transferts d'eau et des solutés réalisées dans le secteur (Ould Mohamed, 1991 & 1995 ; Nicoullaud *et al.*, 1995 ; Chéry, 1995).

Les observations et les mesures nécessaires pour répondre aux objectifs énoncés ont été réalisées sur quatre niveaux d'investigation emboîtés. Ces niveaux correspondent à des situations pédologiques et géomorphologiques variées jugées représentatives de la région. Ils correspondent également à des investissements différents dans les moyens mis en oeuvre pour accéder aux informations nécessaires. L'idéal aurait été d'avoir des secteurs d'étude parfaitement emboîtés les uns dans les autres. Malheureusement, des contraintes techniques ont été également à l'origine de ces choix : opérations culturales, accessibilité, autres travaux de recherche, coopération des propriétaires, etc. Afin de faciliter la lecture dans la suite de ce travail, nous appelons ces quatre niveaux par leurs surfaces. Ainsi, nous parlerons de (Fig. 2.1) :

- parcelle de 20 hectares,
- secteur de 1600 ha ou encore secteur de la simulation SPOT,
- secteur de 380 ha ou encore secteur Est de la simulation SPOT,
- secteur de 3500 ha ou bien secteur de Villamblain ou tout simplement secteur d'étude.

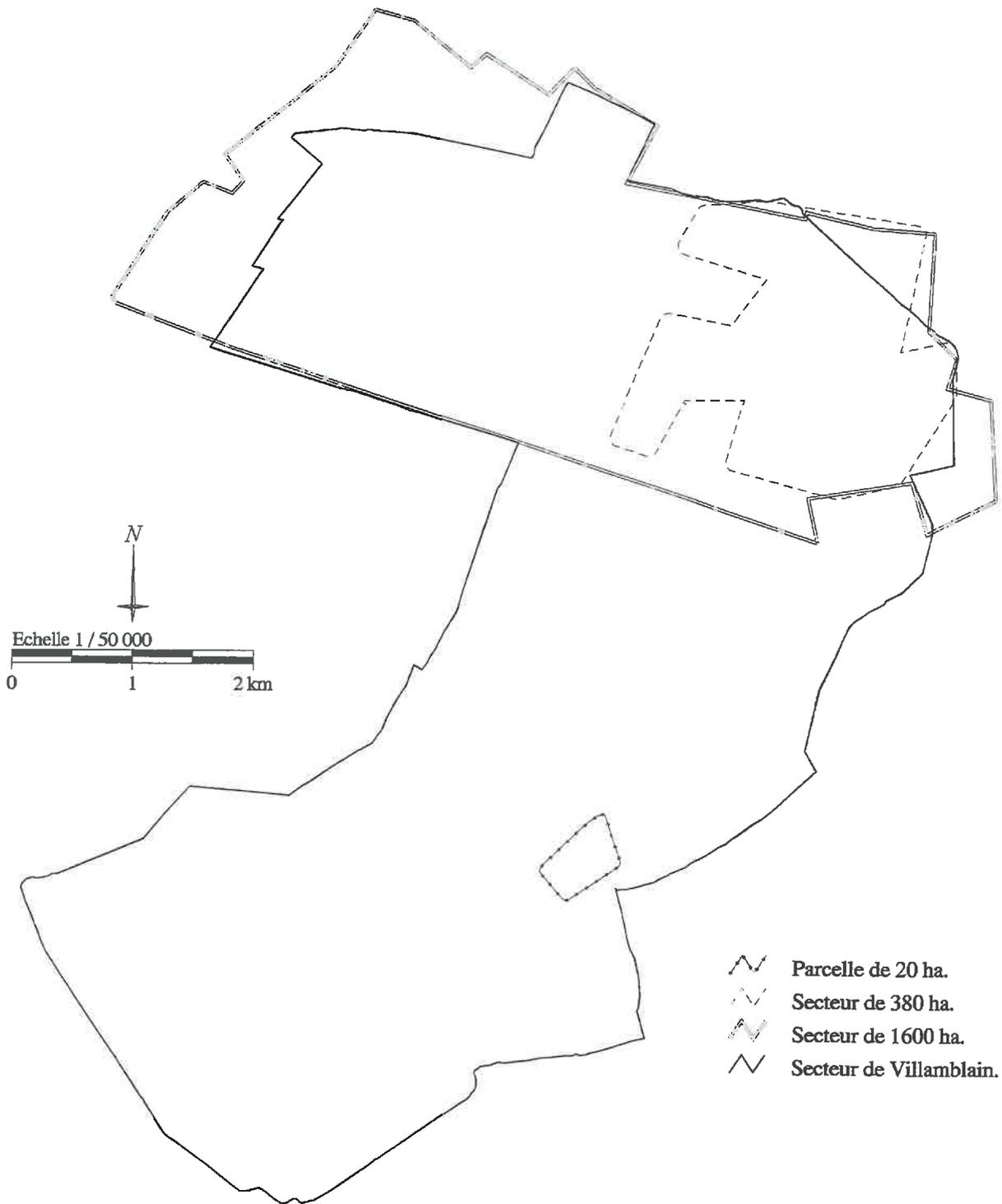
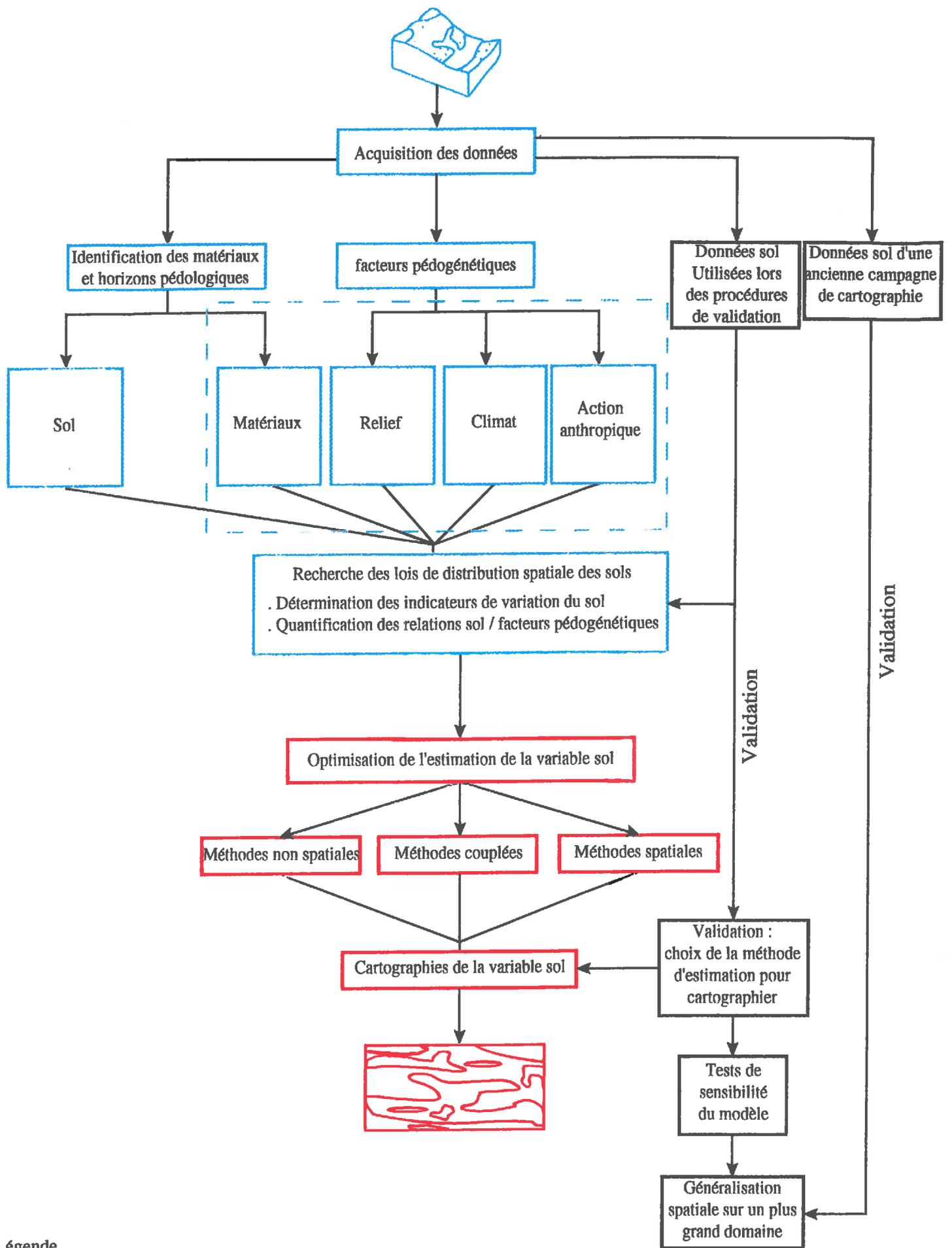


Figure 2.1: Position relative des quatre niveaux d'investigation



Légende

- Recherche des lois de distribution spatiale (2^{ème} partie).
- Modélisation spatiale.
- Généralisation et validation. } 3^{ème} partie

Figure 2.2 : Schéma récapitulatif de la démarche adoptée.

2. Rôles et opérations menées pour chacun des quatre niveaux d'investigation

L'objectif finalisé de ce travail est d'aboutir à une cartographie des sols de la Petite Beauce et plus particulièrement de l'un de ces horizons majeurs : l'horizon argilo-limoneux. Cet objectif pourrait être atteint par un échantillonnage judicieusement choisi et un traitement statistique approprié des données. Mais ce type d'approche présente deux inconvénients. D'une part, il mène généralement à des plans d'échantillonnage denses donc coûteux. D'autre part, l'étude reste liée au seul secteur prospecté, ne permettant pas une généralisation des connaissances pour d'autres paysages.

Notre approche est donc fondamentalement basée sur une étude préliminaire des facteurs pédogénétiques capables d'expliquer la distribution des sols dans le paysage. Les différents facteurs sont ainsi passés en revue selon des méthodes d'approches et des échantillonnages adaptés aux objectifs de compréhension de l'action de ces facteurs (*cf. partie en bleu Fig. 2.2*). Cette première étude fait partie de la deuxième partie de ce mémoire et comprend quatre étapes détaillées ci-après.

La deuxième étude est méthodologique. Elle utilise les résultats de la première étude pour identifier les variables pertinentes et aisément accessibles qui permettent une cartographie des sols tout en limitant au maximum la quantité d'information à acquérir. De plus, elle cherche à optimiser les méthodes statistiques afin de réaliser les meilleures estimations (*cf. partie en rouge Fig. 2.2*). Cette seconde étude fait l'objet de tests de validation à l'aide d'un échantillon indépendant de façon à vérifier la qualité des méthodes proposées (*cf. partie en noire Fig. 2.2*). La seconde étude fait l'objet de la troisième partie de ce mémoire.

2.1 : Lois de distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux selon les principaux facteurs pédogénétiques

Pour établir les lois de distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux en fonction des facteurs pédogénétiques retenus pour notre étude (matériau, relief, climat et action anthropique), nous procédons en quatre étapes.

Etape 1

2.1.1 : Identification et caractérisation des principaux matériaux

Sur le secteur de 3500 ha, nous reprenons les données analytiques et morphologiques obtenues à partir de 27 fosses pédologiques ouvertes lors de travaux précédents. A l'aide de ces données, nous établissons :

- une typologie des principaux matériaux,
- des premières hypothèses sur l'origine des matériaux,
- les critères d'identification des différents matériaux rencontrés qui seront utilisés comme critères de cartographie.

Cette étape d'identification et de caractérisation des matériaux fait l'objet du chapitre IV de ce travail.

Etape 2

2.1.2 : Relation ensemble argilo-limoneux - matériaux sous-jacents

La recherche de relation entre l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux (*EPAL*) et les matériaux qui lui sont sous-jacents est menée sur deux niveaux d'investigation.

Un premier niveau considère l'étude des 27 fosses pédologiques appartenant au secteur de 3500 ha. Ce niveau permet d'aborder l'ensemble des situations, la variation *EPAL* étant envisagée vis-à-vis de tous les matériaux possibles sur le secteur d'étude.

Cependant, sachant que l'approche ponctuelle ne permet pas une vision continue de la variabilité des matériaux, nous avons retenu un deuxième niveau plus détaillé. Celui-ci est limité à une parcelle de 20 ha afin de réaliser une prospection géophysique par résistivité électrique. Cette prospection a pour but d'obtenir une description de l'organisation tridimensionnelle des matériaux inventoriés. Le choix de cette parcelle a été guidé par les arguments cités ci-dessus à savoir : (a) son accessibilité ; (b) ses situations pédologiques et géomorphologiques variées ; (c) la réalisation d'autres travaux de recherche ; (d) la coopération du propriétaire. Cette partie (relation *EPAL*-matériaux sous-jacents) est traitée dans le chapitre V de ce mémoire.

Etape 3

2.1.3 : Relation matériaux - relief

L'étude des relations entre les matériaux inventoriés et les attributs morphologiques du relief est menée sur le secteur de 1600 ha que nous appelons indifféremment dans la suite de notre travail secteur de la simulation SPOT. Cette dernière appellation est due au fait que ce secteur a également été retenu comme terrain expérimental pour une simulation SPOT5 (satellite haute résolution prévu vers l'an 2000). Cette simulation a permis de cartographier les sols calcaires possédant une forte pierrosité dès la surface (King *et al.*, 1996).

Le relief de la région étant très faiblement ondulé, nous avons décidé de réaliser un Modèle Numérique de Terrain (MNT) sur une portion suffisamment grande du territoire afin de rendre compte de la diversité de la morphologie du relief. Le MNT est établi à partir d'un levé géodésique afin d'avoir une meilleure précision. Les méthodes d'acquisition du MNT à partir de différentes sources de données d'altimétrie et les méthodes de calcul des attributs morphologiques dérivés du MNT font l'objet du chapitre VI.

Le MNT et ses attributs dérivés étant calculés, nous examinons alors l'existence de possibles relations entre les matériaux inventoriés au niveau des observations pédologiques sur le secteur de 1600 ha et les attributs morphologiques du relief. Les relations matériaux-attributs du relief sont abordées dans le chapitre VII.

Etape 4

2.1.4 : Autres hypothèses relatives à la loi de distribution de AL

D'une façon plus succincte, nous abordons dans le chapitre VIII, d'autres facteurs pédogénétiques qui pourraient être à l'origine de la distribution spatiale de l'ensemble argilo-

limoneux. Il s'agit principalement des facteurs pédogénétiques "climat" et "action anthropique".

Pour le climat, nous nous intéressons particulièrement au paramètre climatique 'vent'. Ainsi, nous analysons les fréquences moyennes des vents forts durant les 30 dernières années. Les résultats de cette analyse sont confrontés à la distribution de l'ensemble argilo-limoneux. Dans le même contexte : (1) nous analysons la distribution granulométrique le long d'une toposéquence afin de déceler d'éventuelles variations granulométriques selon l'orientation du versant et la position le long de celui-ci ; (2) nous quantifions l'éclairement reçu par versant, ces quantités sont comparées de leur côté à la distribution de l'ensemble argilo-limoneux. Il faut signaler que l'étude du facteur pédogénétique "climat" est réalisée sur la base de données régionales et dépasse ainsi le cadre des secteurs cités ci-dessus.

Enfin, nous soulevons l'effet de l'action anthropique dans la modification du relief et de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux. Les résultats qui sont présentés pour illustrer l'effet anthropique sont établis sur le secteur de la simulation SPOT.

Les quatre étapes décrites ci-dessus ont pour objectif d'établir les facteurs pédogénétiques qui expliquent au mieux la variation de la distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux. Autrement dit, elles permettent de proposer un modèle prédictif donnant l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux en fonction des facteurs pédogénétiques. Cette modélisation est abordée dans la suite du travail de thèse.

2.2 : Modélisation, sensibilité du modèle et généralisation spatiale

2.2.1 : Optimisation de l'estimation de EPAL

Les facteurs expliquant la variation de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux (*EPAL*) étant déterminés, nous nous focalisons sur l'optimisation de l'estimation de *EPAL*. Le secteur de 380 ha est retenu pour cet objectif et plusieurs approches d'estimation sont testées. Ces approches peuvent être classées en trois grandes catégories :

- approches non spatiales telles que la régression simple ou multiple,
- approches spatiales telles que le krigeage et la méthode de la dérive externe,
- approches couplées telles que les méthodes qui combinent la régression et le krigeage.

Ces approches correspondent à une dizaine de méthodes d'estimation différentes de *EPAL*. La performance de chacune des méthodes (validation) est testée grâce à des mesures de contrôles réalisées sur le secteur de 380 ha et qui n'ont évidemment pas servi lors de l'établissement des modèles. Ces deux étapes d'estimation et de validation font l'objet du chapitre IX.

2.2.2 : Sensibilité du modèle et généralisation spatiale

Le dernier chapitre de ce mémoire est consacré aux tests de sensibilité du modèle de répartition de l'ensemble argilo-limoneux : (1) à la précision des paramètres qui les constituent ; (2) et à la taille du domaine d'étude considéré. Enfin, nous examinons les possibilités de généralisation du modèle établi sur un secteur plus grand.

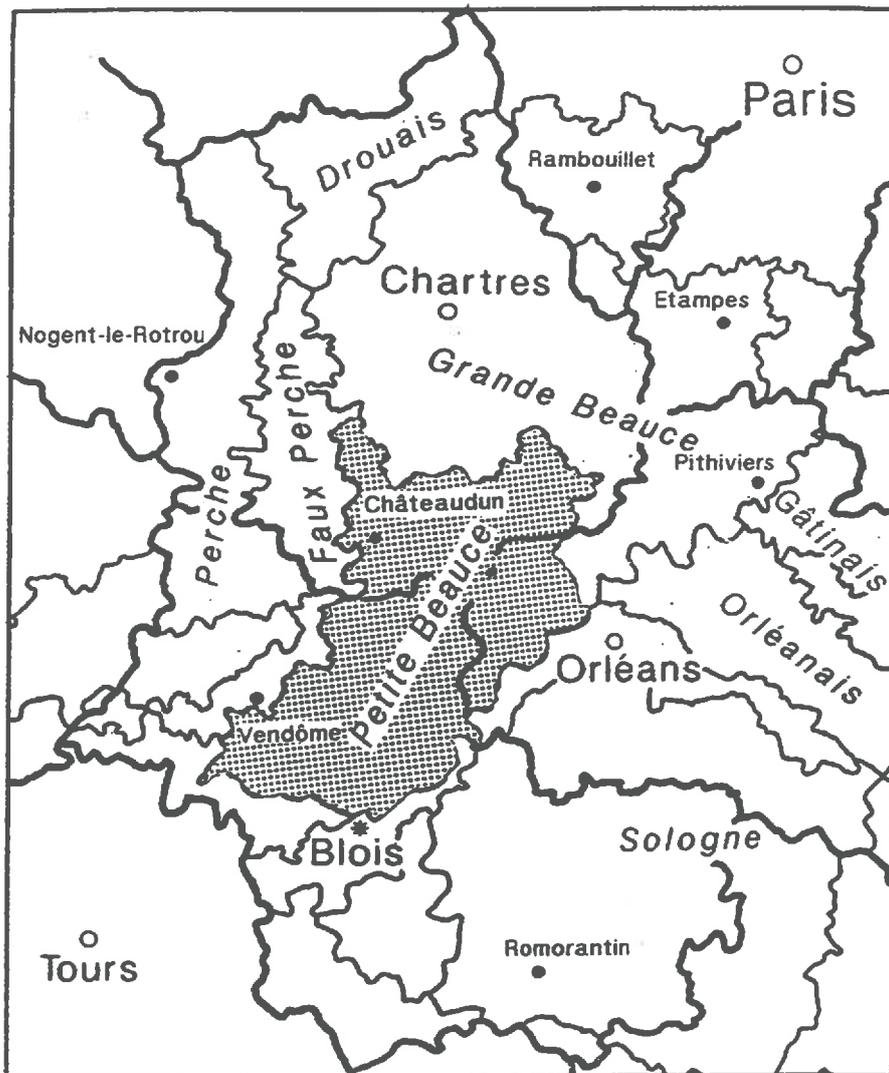


Figure 3.1 : Situation géographique de la région naturelle 'Petite Beauce'.

Introduction

Le secteur d'étude appartient à la région naturelle 'Petite Beauce'. Cette région a une vocation agricole très intensive ayant entraîné ces dernières années des problèmes de gestion des ressources en eau, tant du point de vue quantitatif que qualitatif.

L'étude des sols est inclus dans ce cadre et a déjà fait l'objet de plusieurs travaux. Dans ce chapitre, nous rappelons brièvement les caractéristiques physiques de ce milieu.

La région naturelle 'Petite Beauce' est située dans la partie occidentale de la Beauce (Fig. 3.1). Elle est délimitée au Nord par la Beauce Chartraine et la Grande Beauce, à l'Est par l'Orléanais et le Val de Loire, au Sud par la forêt d'Orléans et le Val de Loire et à l'Ouest par le Faux-Perche et la Vallée du Loir.

Le trait marquant le paysage est la monotonie du relief et la présence quasi uniforme de très grandes parcelles agricoles. Mais cette homogénéité apparente masque une hétérogénéité relevées au sein de la couverture pédologique.

1. Géologie de la zone

La Petite Beauce est située dans la partie occidentale de la formation géologique des calcaires de Beauce qui constituent une formation lacustre, parfois laguno-lacustre voire palustre (Lorain, 1973). Cette formation aquitanaise a été étudiée par de nombreux auteurs, citons parmi eux Desprez & Mégnien, 1965 ; Macaire, 1971 ; Gigout, 1973 ; Mégnien & Desprez, 1973 ; Mégnien, 1976.

De ces études il se dégage particulièrement que : (1) l'épaisseur moyenne du calcaire de Beauce est de 40 m (120 m à la Ferté-Saint-Aubin en Sologne) ; (2) l'hétérogénéité du calcaire de Beauce est aussi bien latérale que verticale du fait des différents faciès qui le constituent. La littérature décrivant cette diversité est abondante (Lorain, 1973 ; Mégnien, 1980 ; Ménéillet, 1980). De façon synthétique, on trouve dans cette région :

- des faciès calcaires à structure homogène dont certains sont constitués de calcaires durs sub-lithographiques, d'autres sont crayeux, friables et très poreux. On y distingue aussi des calcaires tendres et friables dit pulvérulents et que d'autres auteurs ont qualifiés de marnes du fait qu'ils s'en rapprochent par l'aspect et la couleur,
- des faciès calcaires à structure hétérogène, parmi lesquels on distingue des calcaires graveleux, des calcaires bréchiques, des calcaires rubanés qui constituent des niveaux peu épais mais relativement continus et des calcaires vermiculés,
- des formations burdigaliennes sableuses et non calcaires (sables de l'Orléanais) présentes localement en Petite Beauce. Selon Gigout (1973), ces formations, d'origine fluviatile, ravinent le calcaire aquitanaise et suivent des chenaux orientés Est-Ouest. Deux faciès ont été identifiés : argile sableuse bleue ou ocre et sable fin jaune plus ou moins pur,
- des formations limono-argileuses à argilo-limoneuses quaternaires recouvrant de façon continue les calcaires aquitains et les formations burdigaliennes lorsque ces dernières sont présentes (Macaire, 1971). Leur épaisseur varie de quelques décimètres à deux mètres mais elle est le plus souvent comprise entre 0,50 m et 1 m.

2. Hydrogéologie

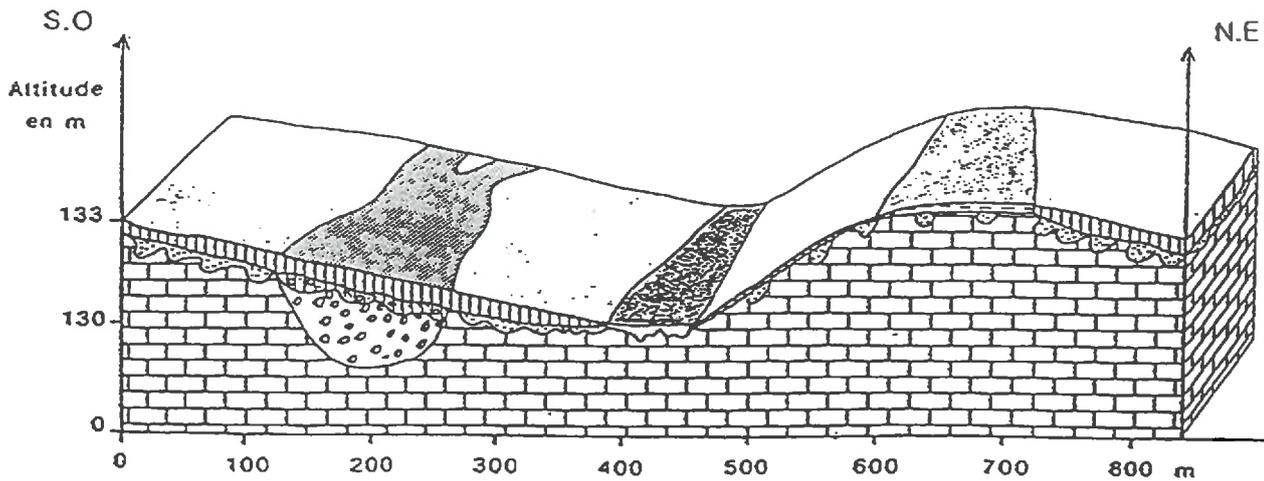
Le calcaire de Beauce est très karstifié et présente de nombreuses morphologies de dissolution (dolines, cuvettes, etc.) notamment en bordure de la formation burdigalienne (Lorain, 1973). Ceci donne au calcaire de Beauce un caractère très perméable.

Le réseau hydrographique de surface est constitué par un très petit nombre de rivières permanentes et de nombreuses vallées sèches (Lorain, 1973). Ces rivières se caractérisent par un débit peu important. En effet, même lors de pluies exceptionnelles une proportion importante de la lame d'eau pluviométrique s'infiltré.

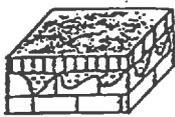
La nappe des calcaires de Beauce s'étend sur 7500 km², avec une épaisseur moyenne de 60 mètres (Lorain, 1973). Elle possède une piézométrie très complexe car la surface piézométrique est très plate et les crêtes piézométriques ainsi que les directions des écoulements peuvent sensiblement varier d'une année à l'autre (Mégnien & Desprez, 1973). Ces dernières années, une baisse continue du niveau piézométrique a été enregistrée et ce, depuis 1989 (Jordana, 1992 pour une chronique de 1965 à 1992). Les analyses chimiques et isotopiques ont montré que la nappe est stratifiée, le comportement hydrodynamique étant différent en fonction de la profondeur (Jordana, 1992). Ces analyses ont montré aussi que les eaux de l'aquifère ont localement des teneurs en nitrates élevées de l'ordre de 60 à 80 mg/l.



Figure 3.2 : Vue d'ensemble de l'allure générale de la surface du sol dans le secteur d'étude.



SOLS DOMINANTS SUR LES PLATEAUX ET LES PENTES NORD, ET EST

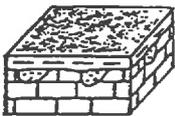


Sols de limon très argileux, bruns, sains, épais de 80 cm environ, reposant sur un matériau calcaire complexe (limon plus ou moins graveleux en poches dans un calcaire dur ou pulvérulent, remanié et cryoturbé par le gel).

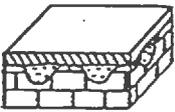


Sols de limon très argileux, bruns, épais de 80 cm environ, légèrement tachés de rouille en profondeur, reposant sur une argile ocre, plus ou moins sableuse et/ou graveleuse, et d'épaisseur variable (50 à 100 cm en moyenne).

SOLS DOMINANTS SUR LES PENTES SUD ET OUEST



Sols argilo-limoneux, brun foncé, non ou peu calcaires, à cailloux calcaires peu abondants, situés en haut de pentes très faibles.



Sols limono-argileux, brun-jaune à blancs, très calcaires, à cailloux et blocs calcaires très abondants, situés sur pentes faibles à moyennes.

SOLS DE FONDS DE VALLONS



Sols très variables, limoneux à argileux, brun sombre à noirs, calcaires ou non, caillouteux ou non.

Figure 3.3 : Schéma de répartition des sols sur deux versants orientés Nord-Est et Sud-Ouest (d'après Duval & Isambert).

Les nitrates actuellement présents dans l'aquifère résulteraient d'une accumulation sur une période de 5 à 30 ans (CORPEN, 1985). Enfin, on note que les recharges les plus importantes (2 à 3 m) ont eu lieu en 1966, 1978 et 1988.

3. Climat

Le climat actuel est du type continental tempéré avec une influence océanique nette (Hubert, 1983). Le module pluviométrique interannuel est estimé à 630 mm (moyenne calculée sur une période de 33 ans : 1962 à 1994). Le maximum de pluie (850 mm) a été enregistré en 1984, alors que le minimum (413 mm), l'a été pour l'année 1990.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) moyenne annuelle calculée par la formule de Penman-Monteith, est de 767 mm (Ould-Mohamed, 1995). Nous pouvons donc dire qu'en moyenne, il s'agit d'une zone à déficit hydrique.

La température moyenne est de 10,5 °C. Le mois le plus froid est celui de janvier. Le mois le plus chaud est juillet. L'ensoleillement est en moyenne de 1800 heures, soit une valeur mensuelle de 149 heures. Les maxima d'ensoleillement sont enregistrés du mois d'avril au mois de septembre.

De l'étude climatique du Loiret (Hubert, 1983) sur une période de 30 ans (1949-1978), on peut constater que, quelle que soit la saison, les vents dominants sont de direction Sud-Ouest. Ils correspondent également aux vents les plus forts.

4. Topographie de la zone

Le paysage présente une morphologie très légèrement ondulée, d'où une grande difficulté pour estimer sur le terrain l'intensité de la pente et pour déterminer son orientation (Fig. 3.2) L'altitude dans la zone d'étude varie entre 117 m et 137 m avec des pentes dépassant très rarement 2 %. Une analyse plus détaillée des données du relief est fournie dans le chapitre VI.

5. Les sols

En Petite Beauce, le calcaire aquitain est recouvert par une formation superficielle quaternaire limono-argileuse dans laquelle la teneur en argile est voisine de 30 % et la fraction limon est d'environ 60 % (Macaire, 1971). La fraction argile est essentiellement constituée de minéraux de type smectite et secondairement de type kaolinite et illite. Quant à la fraction limon, elle est essentiellement constituée de quartz et secondairement de feldspaths (Ould-Mohamed, 1991 & 1995).

Les sols ont été cartographiés à l'échelle du 1/250 000 lors de l'établissement de l'esquisse des paysages pédologiques du Loiret (Arrouays *et al.*, 1989). De cette étude, il a été identifié deux principaux paysages en 'Petite Beauce' : (1) les plateaux des limons de Beauce ; (2) le système des vallons calcaires peu encaissés. Le second type étant présenté comme résultant de l'érosion et du remaniement du premier. Par la suite, une zone de 3500 hectares a été l'objet d'une cartographie à l'échelle de 1/10 000 (Duval & Isambert, 1992) et dont l'objectif était de décrire les principaux types de sols ainsi que leur organisation dans le paysage. Il ressort ainsi de cette étude 5 ensembles d'unités cartographiques (Fig. 3.3) :

- des unités de sols correspondant à des sols de type Néoluvisol (RP^{*}, 1990) qui diffèrent par l'épaisseur et la nature du matériau sous-jacent. Ils se sont développés dans des limons d'épaisseur variant entre 60 et 120 cm,
- des unités de sols correspondant à des sols de type Néoluvisol (RP^{*}, 1990), qui, à la différence des premiers sont développés sur un limon argileux profond (> à 120 cm) reposant sur des argiles tertiaires,
- des unités de sols correspondant à des sols de type Calcisol (RP^{*}, 1990). Ces sols peuvent reposer soit sur des calcaires durs, des matériaux cryoturbés peu épais ou des matériaux cryoturbés épais. L'épaisseur de ces sols varie entre 45 et 65 cm,*
- des unités de sols correspondant à des sols de type Calcisol (RP^{*}, 1990) qui diffèrent par la nature du matériau sous-jacent : calcaires durs, calcaires pulvérulents, matériaux cryoturbés sur calcaires durs et matériaux cryoturbés sur calcaires pulvérulents. L'épaisseur de ces sols varie entre 40 et 75 cm,
- des unités de sols correspondant à des sols du type 'brun calcaire' à 'brun calcique' qui sont généralement très peu épais, situés dans les fonds de vallon et reposant sur des matériaux calcaires.

Par ailleurs, des formations constituées de produits remaniés, probablement hérités des périodes périglaciaires, sont fréquemment observées, intercalées entre les matériaux limono-argileux et les calcaires de Beauce. Des observations effectuées dans des fosses ont montré que ces formations remaniées sont organisées en poches de cryoturbation. Ces mêmes observations ont montré aussi l'existence d'un encroûtement calcaire discontinu situé entre les matériaux limoneux et les matériaux cryoturbés.

Cette cartographie a mis en évidence que les sols varient essentiellement par l'épaisseur des horizons limono-argileux à argilo-limoneux et secondairement par la teneur en éléments grossiers calcaires et l'intensité de l'effervescence à l'HCl.

6. Actions anthropiques

La surface cultivée (42000 ha) représente environ 86 % de la surface totale de la Petite Beauce. Au cours des quarante dernières années, cette région a connu de nombreux remembrements, un développement de la mécanisation et une généralisation de l'irrigation. De ce fait, les haies ont complètement disparu, ainsi que la plupart des bois. Seuls persistent aujourd'hui quelques petits bois.

Les labours répétés depuis plusieurs siècles sont à l'origine de certaines modifications du relief et de l'épaisseur de la couche limoneuse. En effet, les chemins (anciens ou actuels) et les bords des parcelles sont toujours surélevés en Beauce, du fait de l'épaississement du limon en ces endroits. La présence de ce relief "artificiel" perturbe largement l'analyse du relief "naturel" déjà très peu marqué.

* Référentiel Pédologique (Baize & Girard, 1990)

Conclusions du chapitre III

Les caractéristiques du milieu physique sont essentiellement :

- une couverture de sol d'épaisseur faible et variable reposant sur un massif calcaire très filtrant,
- un relief très peu ondulé à l'échelle du paysage,
- une activité agricole intensive nécessitant non seulement une fertilisation importante, mais aussi un recours à l'irrigation afin de compenser le déficit hydrique chronique et la faible réserve en eau des sols peu épais.

Ces différents éléments expliquent que la Petite Beauce soit particulièrement sensible à la pollution diffuse d'origine agricole et que des problèmes liés à la gestion de l'eau et des intrants y soient posés depuis de nombreuses années.

DEUXIEME PARTIE

***RECHERCHE DES LOIS DE DISTRIBUTION SPATIALE DES
SOLS SELON LES PRINCIPAUX FACTEURS
PEDOGENETIQUES***

Chapitre IV : Identification et caractérisation des principaux matériaux et horizons pédologiques

Introduction

Dans ce chapitre, l'objectif est de présenter plus en détail les sols rencontrés sur le secteur d'étude en identifiant :

- les principaux horizons pédologiques,
- les critères de différenciation entre ces différents horizons pédologiques rencontrés,
- les caractères pertinents que nous pourrions retenir pour la cartographie.

Pour caractériser les différents horizons et matériaux, nous reprenons les données acquises sur 27 fosses pédologiques ouvertes sur le secteur d'étude lors des travaux précédents (Ould Mohamed, 1991 et 1995 ; Duval & Isambert, 1992 ; Chéry, 1995 ; Nicoullaud *et al.*, 1995). Pour ces 27 fosses, nous disposons d'analyses granulométriques et physico-chimiques. Pour certaines d'entre elles, des analyses minéralogiques ont été réalisées. L'emplacement de ces fosses (Fig. 4.1) a été orienté par les différentes prospections cartographiques et études agronomiques qui ont eu lieu sur le secteur d'étude.

La caractérisation de ces horizons, en particulier à l'aide des résultats d'analyse conduira à établir de premières hypothèses sur l'origine des matériaux, anticipant ainsi les chapitres concernant l'étude des facteurs pédogénétiques.

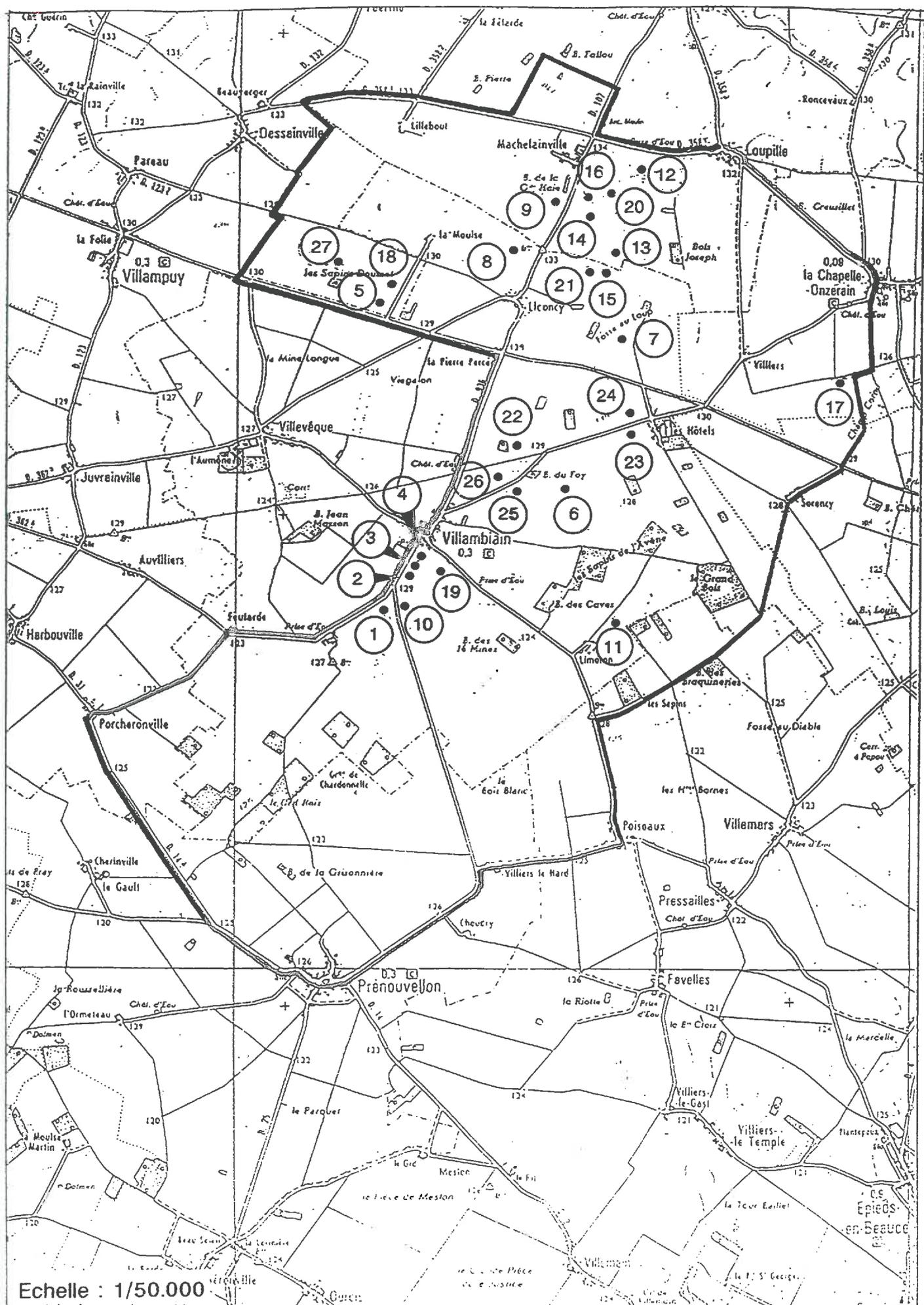


Figure 4.1 : Localisation des fosses pédologiques sur le secteur de Villambian.

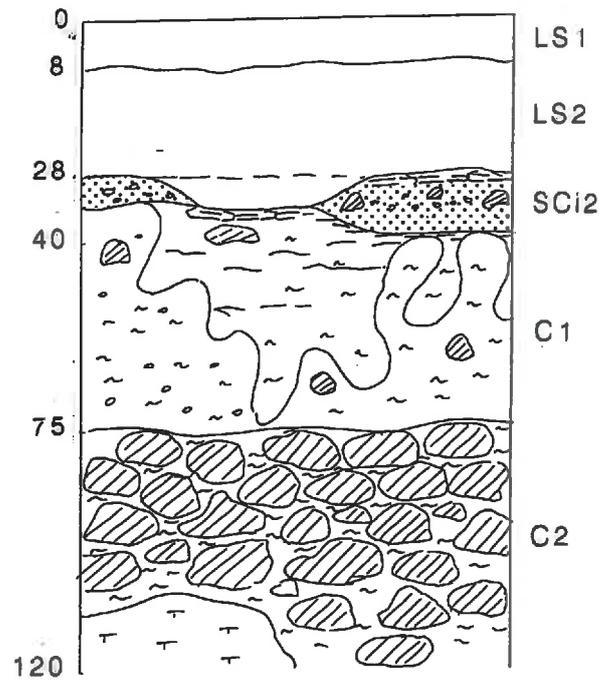
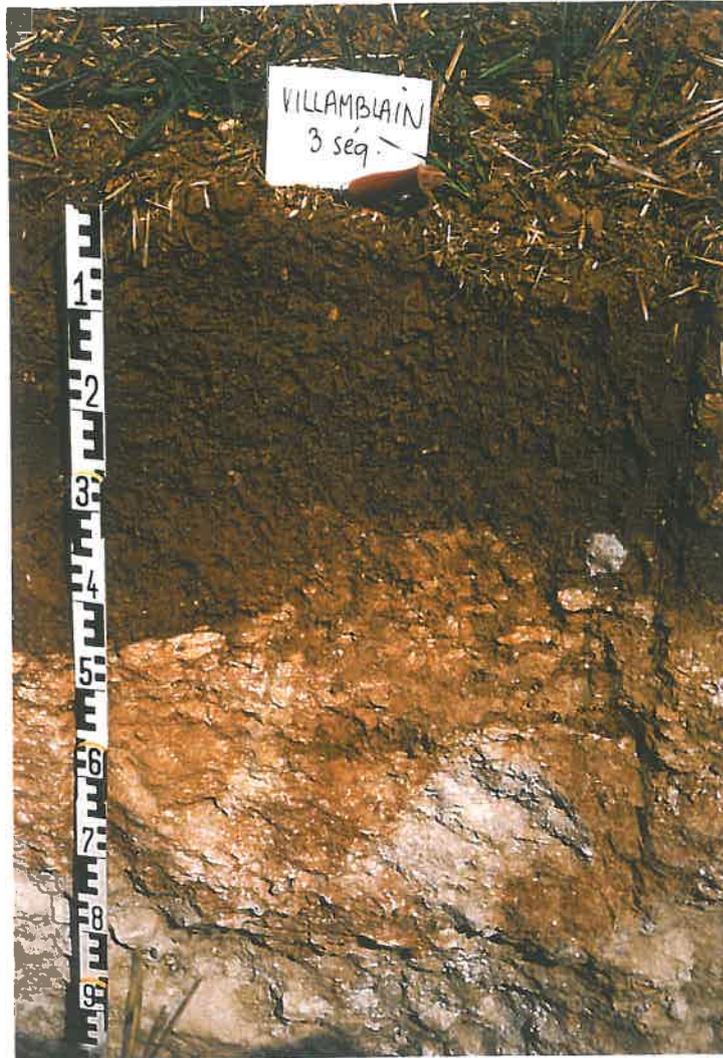


Figure 4.2 : Schéma d'organisation des horizons pédologiques et photo de la fosse 3.

1. Description morphologique et caractéristiques pédologiques de trois fosses considérées de référence sur le secteur d'étude

Afin d'appréhender concrètement les sols, nous présentons trois fosses jugées représentatives du secteur.

1.1 : Limon peu épais reposant sur un substrat calcaire dur : Sol de la fosse 3

Le sol est développé dans un matériau limono-argileux à argilo-limoneux, calcaire dès la surface et modérément caillouteux, de 40 cm d'épaisseur, sur un matériau compact très calcaire et très caillouteux.

Description de la fosse 3 (Fig. 4.2)

L'horizon (LS) : épais de 25 à 30 cm, brun jaune, limono-argileux à argilo-limoneux, assez organique, moyennement caillouteux et faiblement à moyennement effervescent à l'acide. Ni taches, ni concrétions.

L'horizon (SCi2) : épais de 15 cm en moyenne, brun jaune, argilo-limoneux. Il est modérément caillouteux. L'effervescence est systématique et varie de moyenne à forte. Ni taches, ni concrétions.

L'horizon (C1) : son épaisseur varie de 0 à 35 cm. La charge en cailloux est très fréquente et souvent moyenne à forte. L'effervescence est systématique et varie de forte à très forte. Les taches sont exceptionnelles et des réprécipitations de calcaire secondaire ont été identifiées sous forme de petits amas tendres principalement.

L'horizon (C2) : peut apparaître à partir de 60 cm de profondeur, la charge est généralement forte à très forte. L'effervescence est très forte aussi. Pas de taches, quelques petits amas de calcaire secondaire tendre.

Tableau 4.1 : Résultats de l'analyse granulométrique avant décarbonatation, teneur en $CaCO_3$, en C et CEC des horizons de la fosse 3.

profondeur (cm)	horizon	Teneur $CaCO_3$ (%)	A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	SG (%)	C (%)	CEC (méq / 100g)
0-8	LS1	3	30	34	29	3	4	1,5	19
8-28	LS2	9	30	33	30	3	4	1,4	19
28-40	SCi2	57	29	32	16	8	15	0,8	10
40-75	C1	61	21	32	16	16	15	0,3	9
75-120	C2	95	31	31	8	15	15	0,3	2

A = argile, LF = limon fin, LG = limon grossier, SF = sable fin, SG = sable grossier, C = carbone, CEC = capacité d'échange cationique.

Les analyses physico-chimiques (Tab. 4.1) confirment le fait qu'il s'agit d'un sol calcaire dès la surface (teneur en $CaCO_3$ variant de 3 % en surface à 95 % dans l'horizon C2). L'ensemble argilo-limoneux supérieur peut se limiter à 28 cm d'épaisseur étant donné que l'horizon noté SCi2 possède une teneur en calcaire très élevée (57 %).

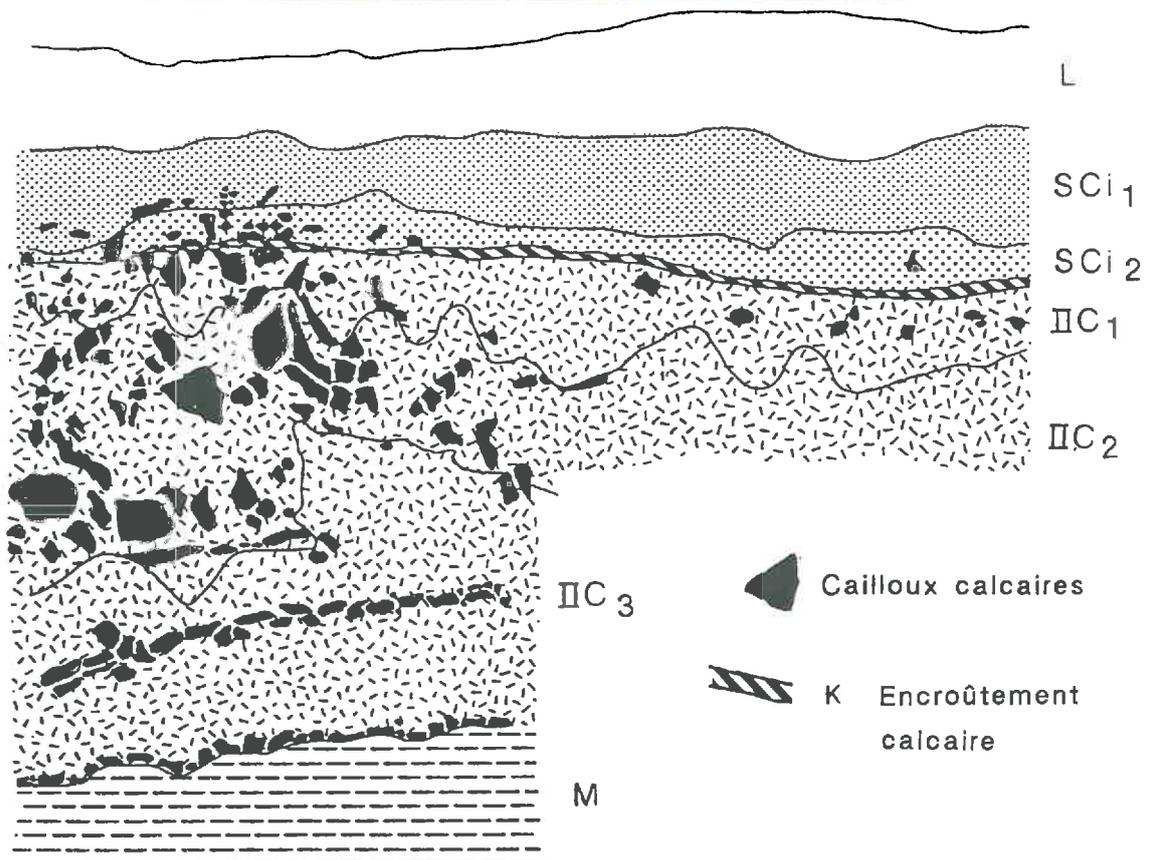


Figure 4.3 : Schéma d'organisation des horizons pédologiques et photo de la fosse 27.

1.2 : Limon reposant sur des matériaux cryoturbés : Sol de la fosse 27

Description de la fosse 27 (Fig. 4.3)

L'horizon (L) : limono-argileux à argilo-limoneux ; brun foncé (10 YR 4/4 dans le Munsell Color Company, 1954) ; limite inférieure nette et ondulée, avec une profondeur moyenne à 30 cm. Structure polyédrique sub-angulaire peu nette à sous structure grumeleuse vers le sommet de l'horizon avec des agrégats de 0,3 à 0,8 cm. Vers la base de l'horizon, la structure est polyédrique sub-angulaire très nette avec des agrégats de 1 à 2 cm, à arrêtes très vives et à faces rectilignes. Quelques éléments grossiers : feldspaths et quartz, de dimensions très variables (2 mm à 1,5 cm). Nombreuses racines fines et saines, plus de nombreux débris racinaires (pailles enfouies) ; horizon très poreux ; meuble dans sa partie supérieure puis devient plus compact en profondeur. L'effervescence est nulle, et pas de taches d'oxydation.

L'horizon (SCi1) : possède une épaisseur moyenne de 25 cm ; argilo-limoneux ; de couleur 7,5 YR 4/4 ; structure polyédrique sub-angulaire dont les agrégats font de 0,5 à 1 cm ; très poreux (porosité essentiellement biologique) ; nombreuses racines traversant les agrégats ; quelques quartz et feldspaths de 0,2 à 1 cm ; faible effervescence à l'acide ; de rares graviers calcaires ; remontée localement de cailloux calcaires de dimension décimétrique ; limite brutale et ondulée avec l'horizon sous-jacent.

L'horizon (SCi2) : de texture argilo-limoneuse (7,5 YR 4/4) ; graveleux et dont les éléments grossiers peuvent constituer jusqu'à 50 % de l'horizon. Ces éléments grossiers sont de couleur gris-bleuté. Quelques quartz et feldspaths ; structure grumeleuse ; poreux ; de nombreuses racines ; effervescence généralisée ; limite avec l'horizon sous-jacent brutale et très légèrement ondulée.

L'horizon (K) : c'est un encroûtement d'épaisseur variable (0-5 cm) ; couleur principale 10 YR 7/6 ; structure faiblement litée ; effervescence très forte et généralisée ; quelques quartz et feldspaths ; présence de pseudomycéliums ; compact ; limite inférieure progressive et ondulée.

L'horizon (IIC1) : de couleur rouge ocre (5 YR 5/6) avec des taches de couleur brune (7,5 YR 5/6) ; riche en graviers calcaires et cailloux ; beaucoup de pseudomycéliums ; horizon compact ; absence de racines ; limite inférieure ondulée et brutale ; structure grenue avec des éléments de 1 à 2 mm de diamètre ; effervescence forte.

L'horizon (IIC2) : très calcaire de couleur gris pâle (5 YR 7/2) avec des taches jaune pâle ; beaucoup de pseudomycéliums ; structure grenue à sous structure grumeleuse ; nombreux gros blocs ; effervescence forte et généralisée ; limite avec horizon inférieur nette, irrégulière et brutale ; très poreux ; horizon essentiellement constitué de petits graviers ronds.

L'horizon (IIC3) : épaisseur très variable (0-25 cm) et de couleur brun franc (7,5 YR 5/6) ; structure grenue et grumeleuse ; beaucoup de petits graviers de forme ovoïde à circulaire ; beaucoup de pseudomycéliums ; effervescence très forte et généralisée ; la limite inférieure est nette, irrégulière et interrompue.

L'horizon (IIC4) : de couleur grise (10 YR 6/1), cet horizon est constitué de graviers et de cailloux ; pseudomycéliums calcaires très abondants ; structure grenue à sous structure grumeleuse avec des éléments calcaires arrondis ; horizon très perméable ; matériau très peu cohérent ; les éléments grossiers constituent plus de 60 % de son volume ; limite inférieure irrégulière et nette.

L'horizon (M) : de couleur principale grise ; aspect marneux ; calcaire ; absence de granules, de pseudomycéliums, de graviers ou de blocs calcaires ; des taches d'oxydation ; agrégats friables ; structure pseudo-polyédrique à sous structure grumeleuse vers le haut de l'horizon.

La structure devient grumeleuse à ovoïde puis compacte à sous structure polyédrique nette avec la profondeur.

L'observation morphologique sur le terrain de la fosse 27 permet de distinguer ainsi les ensembles suivants :

- une couche argilo-limoneuse supérieure d'une épaisseur de 65 cm, qui devient de plus en plus calcaire au-delà de 30 cm de profondeur,
- un encroûtement calcaire d'épaisseur variable (0-5 cm),
- un ensemble calcaire très hétérogène (matériaux cryoturbés) d'une épaisseur de 120 cm, et au sein duquel nous pouvons distinguer quatre sous-ensembles en fonction de la couleur. Ces sous-ensembles restent très calcaires et riches en graviers et en cailloux,
- au-delà de 190 cm de profondeur et jusqu'à 260 cm, nous distinguons un ensemble de couleur grise à aspect marneux très calcaire que Ould Mohamed (1995) a qualifié de "calcaires pulvérulents".

Les analyses physico-chimiques (Tab. 4.2) permettent de distinguer au sein de l'ensemble argilo-limoneux supérieur trois sous-ensembles : (1) un sous-ensemble limono-argileux non calcaire de 30 cm d'épaisseur ; (2) un sous-ensemble limono-argileux à argilo-limoneux faiblement calcaire de 25 cm d'épaisseur (l'horizon *SCi1*) ; (3) enfin, un sous-ensemble limono-argileux nettement calcaire de faible épaisseur (l'horizon *SCi2* de 10 cm d'épaisseur).

Dans l'ensemble "matériaux cryoturbés", les résultats analytiques permettent de caractériser un sous-ensemble fortement calcaire (la teneur en $CaCO_3$ varie entre 71 et 94 % du total de la terre fine. Il correspond aux horizons *IIC2*, *IIC3* et *IIC4* dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Résultats de l'analyse granulométrique avant décarbonatation, teneur en $CaCO_3$, en *C* et *CEC* des horizons de la fosse 27.

profondeur (cm)	horizon	Teneur $CaCO_3$ (%)	A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	SG (%)	C (%)	CEC (még / 100g)
0-30	<i>L</i>	0	31	33	34	1	1	1,2	22
30-55	<i>SCi1</i>	0,5	35	31	33	1	0	0,8	20
55-65	<i>SCi2</i>	23	24	37	29	4	6	0,7	14
65-70	<i>K</i>	64	19	28	18	11	24	0,6	7
70-115	<i>IIC1</i>	63	20	34	19	10	17	0,5	7
115-125	<i>IIC2</i>	85	28	28	9	10	25	0,3	6
125-150	<i>IIC3</i>	71	24	32	10	10	24	0,3	14
150-190	<i>IIC4</i>	94	16	30	9	7	38	0,3	3

L'analyse minéralogique effectuée sur la fraction $< 2 \mu m$ (Ould Mohamed, 1995) montre que les minéraux argileux du type smectite sont dominants dans les trois grands ensembles, à savoir l'ensemble argilo-limoneux supérieur, l'ensemble 'calcaires cryoturbés' intermédiaire et l'ensemble 'calcaires pulvérulents' inférieur. En effet, les proportions en smectite peuvent atteindre 80 % dans les calcaires pulvérulents inférieurs. Par ailleurs, cette étude n'a pas révélé de différences minéralogiques sensibles entre des horizons à 30 % d'argile et ceux à plus de 50 % d'argile après décarbonatation.

1.3 : Limon reposant sur des matériaux argileux à sables grossiers : Sol de la fosse 16

Description de la fosse 16 (Fig. 4.4)

L'horizon (LS1) : de couleur brun foncé (10 YR 4/3) ; limono-argileux à argilo-limoneux ; cultivé ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; peu compact ; structures juxtaposées polyédrique très nette et polyédrique sub-angulaire nette ; limite régulière avec l'horizon sous-jacent.

L'horizon (LS2) : de même couleur que LS1 ; limono-argileux à argilo-limoneux ; cultivé ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; plus compact ; structure polyédrique très nette et sous structure continue peu nette ; limite régulière avec l'horizon qui se trouve en dessous.

L'horizon (LS3) : de même couleur que LS1 et LS2 ; argilo-limoneux à limono-argileux ; cultivé ; racines peu nombreuses ; plus compact ; structure polyédrique sub-angulaire nette ; limite régulière avec l'horizon suivant.

L'horizon (SCi1) : brun jaune foncé (10 YR 4/4) ; argilo-limoneux à limono-argileux ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; structure polyédrique très nette ; quelques revêtements minces sur agrégats ; limite ondulée avec l'horizon suivant.

L'horizon (SCi2) : de même couleur que l'horizon SCi1 ; argilo-limoneux ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; structure polyédrique très nette ; présence de revêtements minces sur agrégats ; limite régulière avec l'horizon suivant.

L'horizon (IISCi1) : brun jaune (10 YR 5/4) ; argilo-limoneux avec présence de quelques grains de quartz et de sables grossiers ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; structure prismatique peu nette et sous structure polyédrique sub-angulaire nette ; présence de revêtements minces sur agrégats et de quelques taches de fer et de manganèse ; limite régulière avec l'horizon sous-jacent.

L'horizon (IISCi2) : identique à IISCi1 sauf qu'il contient un peu plus de grains de quartz et de sables grossiers.

L'horizon (IISCi3) : identique aux deux précédents sauf que la teneur en sables grossiers est nettement plus importante ; peu de racines.

L'horizon (IIICg1) : brun rougeâtre (7,5 YR 4/4) ; limoneux moyen sableux à sables grossiers ; présence de nombreux grains de quartz ; effervescence nulle ; très peu de racines ; structure continue ; quelques taches d'oxydation noires ; limite régulière avec l'horizon suivant.

L'horizon (IIICg2) : de même couleur que l'horizon sus-jacent ; sablo-argileux à sables grossiers ; présence de grains de quartz ; effervescence nulle ; pas de racines ; structure continue ; taches d'oxydation nombreuses.

L'horizon (IIICg3) : brun franc rougeâtre (7,5 YR 5/6) ; argilo-sableux à sables grossiers ; peu de grains de quartz ; effervescence nulle ; pas de racines ; structure continue ; de nombreuses taches et concrétions noires.

L'analyse morphologique de la fosse 16 révèle ainsi la présence d'un matériau argilo-limoneux qui devient nettement argileux avec la profondeur. Sous ce matériau, nous distinguons un matériau sableux riche en grains de quartz que l'on rencontre à partir de l'horizon *IISCi1* (Tab. 4.3). Au sein du matériau argilo-limoneux, il est très difficile de distinguer les différents horizons d'autant plus que l'effervescence à l'HCl est nulle.

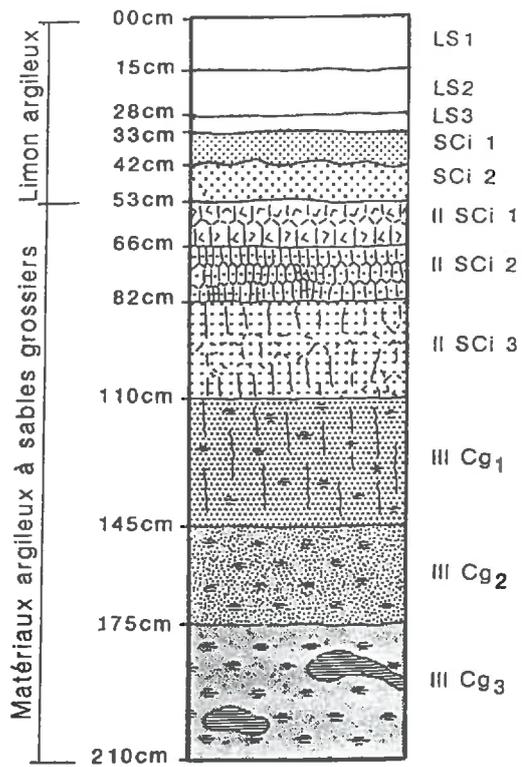


Figure 4.4 : Schéma d'organisation des horizons pédologiques et photo de la fosse 16.

Tableau 4.3 : Résultats de l'analyse granulométrique, teneur en $CaCO_3$, en *C* et *CEC* des horizons de la fosse 16.

profondeur (cm)	horizon	Teneur $CaCO_3$ (%)	A (%)	LF (%)	LG (%)	SF (%)	SG (%)	C (%)	CEC (méq / 100g)
0-15	<i>LS1</i>	0	31	29	36	2	2	1,1	17
15-28	<i>LS2</i>	0	33	32	31	2	2	1,2	17
28-33	<i>LS3</i>	0	31	30	35	2	2	0,9	17
33-42	<i>SCi1</i>	0	33	30	33	2	2	0,6	17
42-53	<i>SCi2</i>	0	39	29	28	2	2	0,5	20
53-66	<i>IISCi1</i>	0	41	28	25	2	4	0,4	22
66-82	<i>IISCi2</i>	0	43	26	21	2	8	0,3	23
82-110	<i>IISCi3</i>	0	43	22	17	3	15	0,3	24
110-145	<i>IICg1</i>	0	39	17	12	4	28	0,2	22
145-175	<i>IICg2</i>	0	27	9	4	4	56	0,1	14
175-190	<i>IICg3</i>	0	29	6	3	4	58	0,0	13

L'analyse physico-chimique des horizons de la fosse 16 (Tab. 4.3) permet de distinguer :

- une couche argilo-limoneuse non calcaire de 42 cm constituée par les quatre premiers horizons. La teneur en argile dans ces horizons varie entre 30 et 33 % du total de la terre fine,
- un horizon nettement plus argileux (teneur en argile 39,2 %) représenté par l'horizon *SCi2*. Ce dernier ne peut pas être considéré comme un horizon d'accumulation étant donné que l'on ne rencontre pas d'horizon blanchi au sein de cette fosse et que le complexe absorbant des horizons sus-jacents est saturé,
- une première couche argilo-sableuse située entre 53 et 110 cm de profondeur. Celle-ci se caractérise par des teneurs en argile qui varient entre 41 et 43 % et des teneurs en sables grossiers qui peuvent atteindre les 15 % du total de la terre fine,
- une deuxième couche argilo-sableuse à sablo-argileuse située entre 110 et 190 cm de profondeur moins argileuse que la couche sus-jacente. La teneur en argile varie entre 26 et 39 % du total de la terre fine. Néanmoins la teneur en sables grossiers est plus importante au sein de cette couche, en effet celle-ci varie entre 28 et 58 % du total de la terre fine.

L'analyse minéralogique effectuée sur les horizons *LS3*, *SCi2*, *IISCi2*, *IICg1*, et *IICg3* (Chéry, 1995) montre la présence de minéraux argileux du type smectite, illite, et kaolinite à côté des minéraux non argileux tels le quartz, les feldspaths potassiques et la goethite identifiée dans l'horizon *IISCi2*.

Conclusion partielle

La prospection pédologique et les fosses décrites permettent de noter la présence :

1. d'un ensemble "argilo-limoneux à limono-argileux" en surface d'épaisseur variable, carbonaté ou non,

2. d'un ensemble "matériaux cryoturbés" souvent en position intermédiaire entre l'ensemble argilo-limoneux supérieur et les calcaires sous-jacents, avec des poches plus ou moins profondes, parfois orientées dans le sens de la pente,
3. d'un ensemble inférieur "calcaires pulvérulents" qui peut être absent ou présenter par endroit des épaisseurs importantes,
4. d'un ensemble "calcaires durs" dans lequel on note l'absence de toute activité biologique et racinaire,
5. d'un ensemble argilo-sableux à sablo-argileux moins fréquent sur le secteur d'étude que les autres ensembles.

Le paragraphe suivant est consacré à la caractérisation des différents grands ensembles d'horizons présents sur le secteur d'étude afin de déterminer les critères qui les différencient et par conséquent déduire les caractères pertinents pour la cartographie des sols du secteur d'étude.

2. Détermination et caractérisation des principaux horizons pédologiques présents sur le secteur d'étude

2.1 : Identification des différents horizons pédologiques

Les 27 fosses pédologiques réalisées sur le secteur d'étude correspondent en tout à 172 horizons décrits. Chaque horizon a été rattaché à l'un des cinq ensembles cités ci-dessus sur la base de la texture, de la couleur, de l'effervescence à l'acide, et de la charge en éléments grossiers, c'est-à-dire sur la base de considérations morphologiques de terrain. Ainsi, nous avons distingué :

- 97 horizons pour l'ensemble argilo-limoneux (*AL*) dont 37 ne sont pas carbonatés et qui seront notés dans la suite de ce travail (*ALNC*),
- 37 horizons pour l'ensemble matériaux cryoturbés (*MC*),
- 08 horizons pour l'ensemble calcaires pulvérulents (*CP*),
- 15 horizons pour l'ensemble argilo-sableux à sablo-argileux (*FAS*),
- 15 horizons pour l'ensemble calcaires durs (*K*).

2.2 : Caractères morphologiques de terrain des différents ensembles d'horizons

L'ensemble "argilo-limoneux supérieur" (*AL*) se caractérise par une épaisseur variable, une faible différenciation verticale correspondant à une texture argilo-limoneuse à limono-argileuse en surface qui devient plus argileuse dans les horizons de profondeur.

Les horizons non carbonatés dans cet ensemble (*ALNC*) sont néanmoins saturés et toujours présents en surface. Dans les horizons riches en carbonates, nous remarquons des réprécipitations de type nodule et pseudomycélium.

L'ensemble argilo-limoneux est de couleur brun foncé (10 YR 3/3 à 10 YR 6/6). La structure de ses différents horizons est polyédrique sub-angulaire à sous structure grumeleuse. Cet ensemble se caractérise aussi par : (1) une grande porosité ; (2) de nombreux racines ; (3) la présence de peu d'éléments grossiers ; (4) une effervescence qui varie suivant les horizons (de nulle à forte) ; et (5) une absence de taches d'oxydation.

Enfin, dans certaines fosses, on note la présence d'un encroûtement calcaire de faible épaisseur à la base de l'ensemble argilo-limoneux. Cet encroûtement est de structure litée et de couleur principale 10 YR 7/6, à taches calcaires 10 YR 8/3 et rougeâtres 5 YR 6/6. L'encroûtement calcaire, qui peut être continu, constitue un obstacle aux racines (Nicoulaud *et al.*, 1995).

L'ensemble "matériaux cryoturbés" (*MC*) se présente sous la forme d'une succession de poches de nature hétérogène, résultant de l'action du gel en climat périglaciaire. Cet ensemble est très calcaire (effervescence forte et généralisée), très hétérogène et riche en graviers calcaires et en cailloux. Il possède une structure grenue à sous structure grumeleuse et il est très peu cohérent. Sa couleur est variable et l'on peut rencontrer du rouge ocre (5 YR 5/6), des taches de couleur brune (7,5 YR 5/6) et des calcaires gris pâle (5 Y 7/2).

Enfin, au sein de cet ensemble, nous pouvons rencontrer des matériaux très argileux organisés en poches et dont la couleur varie. En effet, ces matériaux argileux peuvent être de couleur brun olive (2,5 YR 5/4), brun ocre (5 YR 5/6) ou bien gris brun pâle (2,5 Y 6/2).

La composition des *MC* varie donc verticalement et latéralement sur de faibles distances. Cette variation de composition est liée aux types de matériaux calcaires ayant subi la cryoturbation. Ces matériaux cryoturbés sont généralement organisés en poches.

L'ensemble "calcaires pulvérulents" (*CP*) est constitué d'un calcaire friable, pulvérulent à l'état sec et d'aspect "marneux". Au sein de cet ensemble, la structure est polyédrique à grumeleuse vers le haut, et plus massive vers le bas. Cet ensemble se caractérise aussi par : (1) une couleur grise (10 YR 6/1) ; (2) de nombreuses taches rouilles (7,5 YR 5/8) d'oxydation dans les horizons profonds ; (3) une forte effervescence et l'absence de graviers et de blocs calcaires.

L'ensemble "argilo-sableux à sablo-argileux" (*FAS*) se caractérise principalement par l'absence totale d'effervescence. La distinction entre les horizons de cet ensemble se fait sur la base de la texture (argilo-sableuse ou sablo-argileuse) et de la couleur brun jaune (10 YR 5/5) pour les horizons argilo-sableux et brun rougeâtre (7,5 YR 5/6) pour les horizons sablo-argileux.

Dans cet ensemble, on note aussi la présence : (1) de graviers de quartz ; (2) de taches d'oxydation en profondeur. Enfin, au sein de *FAS*, la structure est prismatique avec une sous structure polyédrique sub-anguleuse nette.

L'ensemble "calcaires durs" (*K*) est constitué des premières strates du calcaire aquitainien et dont l'organisation n'a pas été profondément modifiée par l'action du gel. La couleur au sein de cet ensemble est généralement jaune pâle (2,5 YR 7/4) et blanche. Il est très compact et on note l'absence totale de racines dans *K*. Des taches ocres d'oxydation peuvent être rencontrées au sein de cet ensemble.

2.3 : Caractérisation analytique des différents ensembles d'horizons

Pour chacun des 172 horizons pédologiques rattachés à l'un ou l'autre des cinq ensembles cités ci-dessus, des mesures de la teneur en carbonate de calcium ($CaCO_3$), de la capacité d'échange cationique (*CEC*), et de la granulométrie (sans décarbonatation et après décarbonatation) de la terre fine ont été réalisées. La granulométrie a été effectuée en cinq

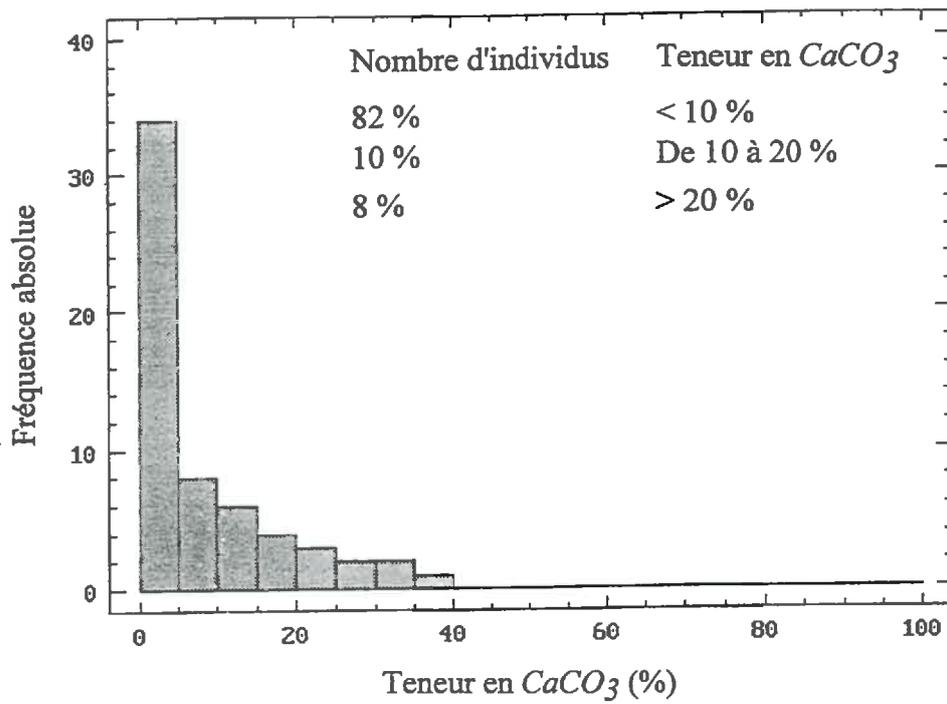


Figure 4.5a : Histogramme de la teneur en calcaire total ($CaCO_3$) des individus de l'ensemble argilo-limoneux (AL).

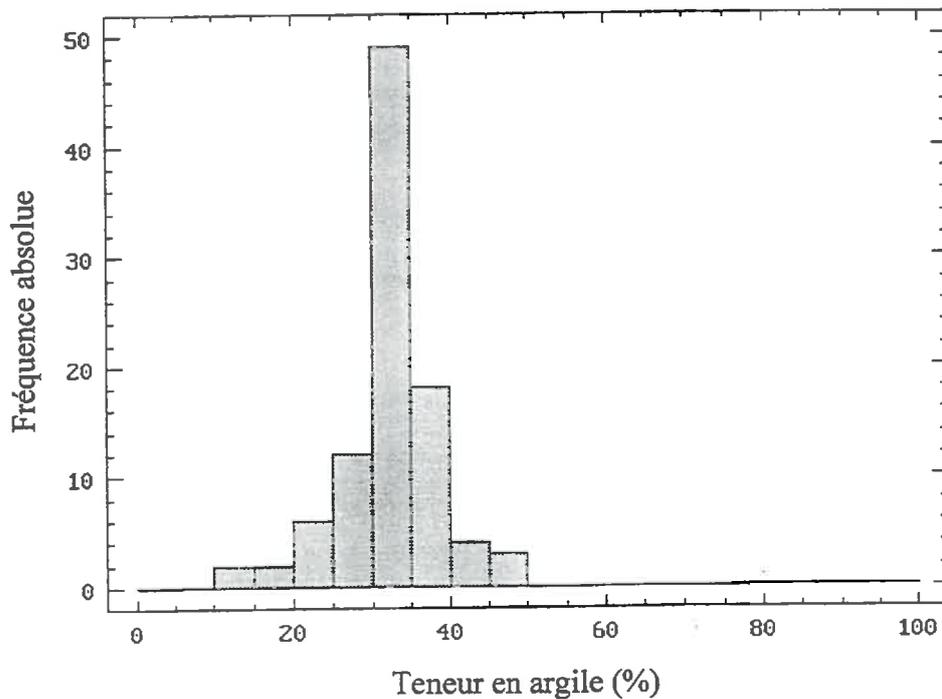


Figure 4.5b : Histogramme de la teneur en argile des individus de l'ensemble argilo-limoneux (AL).

fractions : argile ($A : 0 - 2 \mu m$), limon fin ($LF : 2 - 20 \mu m$), limon grossier ($LG : 20 - 50 \mu m$), sable fin ($SF : 50 - 200 \mu m$) et sable grossier ($SG : 200 \mu m - 2 mm$).

La granulométrie après décarbonatation permet de comparer la composition granulométrique du résidu insoluble après traitement à l'HCl des différents horizons d'un même profil : comparaisons dites verticales, ou bien entre des horizons issus de profils différents : comparaisons dites horizontales (Baize, 1988). Il est ainsi possible de tester l'unicité du matériau en faisant abstraction du degré de décarbonatation. Pour les profils non calcaires, l'analyse des fractions limoneuses et sableuses permet de vérifier la parenté entre les horizons supérieurs et les horizons sous-jacents.

Pour comparer les horizons entre eux sur la base de leur constitution actuelle, il est proposé de ne pas tenir compte de la fraction argile car celle-ci est trop mobile et trop altérable à cause de sa forte réactivité (Baize, 1980). Ainsi, des confrontations granulométriques feront appel seulement aux fractions limoneuses et sableuses réputées plus stables chimiquement et peu mobiles sous nos climats. Les fractions LF , LG , SF , et SG sont alors exprimées en pour-cent de leur somme sous la forme dite des "squelettes granulométriques".

Dans le cas de l'analyse des squelettes granulométriques, la notation LFs , LGs , SFs , et SGs est adoptée pour les fractions limoneuses et sableuses.

- **L'ensemble argilo-limoneux (AL)**

Les caractéristiques statistiques de la granulométrie du calcaire total et de la capacité d'échange cationique des individus (horizons) affectés à AL sont présentées dans le tableau 4.4. Ce tableau montre que les individus de l'ensemble AL peuvent atteindre des teneurs en $CaCO_3$ de l'ordre de 40 %. Cela étant, 82 % des individus de cet ensemble possèdent des teneurs en $CaCO_3$ inférieures à 10 % dont 38 % sont totalement non carbonatés (Fig. 4.5a).

La teneur en argile dans cet ensemble montre une amplitude relativement grande (Tab. 4.4). Cependant, l'histogramme indique qu'une majorité des individus au sein de AL possède une teneur en argile de l'ordre de 32 % (Fig. 4.5b).

Les individus de l'ensemble AL se caractérisent aussi par de faibles taux de sables insolubles par HCl (Tab. 4.4). A noter également la grande ressemblance des granulométries des individus de l'ensemble argilo-limoneux. En effet, la majorité des individus possède une texture argilo-limoneuse (Fig. 4.6a). Cette ressemblance est d'autant plus marquée après décarbonatation où nous constatons une concentration plus importante des individus presque exclusivement dans le pôle argilo-limoneux (Fig. 4.6b).

La comparaison latérale des horizons de cet ensemble par une analyse des squelettes granulométriques des résidus insolubles à l'HCl (Fig. 4.7), ne décèle pas de discontinuités texturales. Les différents individus de AL seraient donc développés dans un matériau homogène sur place, ou bien il s'agit d'un ensemble qui proviendrait d'un même matériau qui serait déposé au cours du temps.

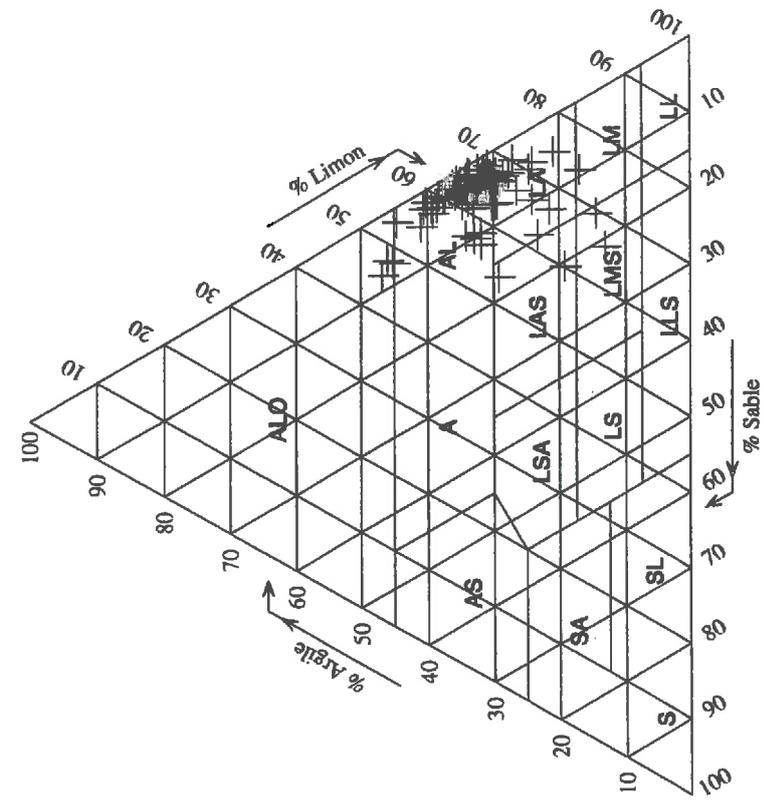


Figure 4.6a : Granulométrie sans décarbonatation des individus (horizons) de l'ensemble argilo-limoneux (AL).

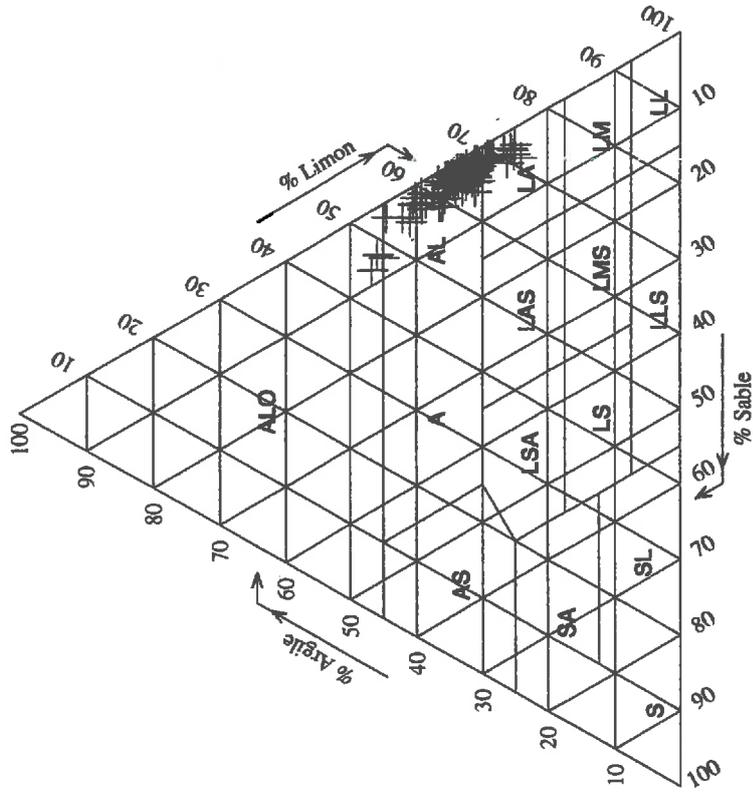


Figure 4.6b : Granulométrie des résidus insolubles des individus (horizons) de l'ensemble argilo-limoneux (AL).

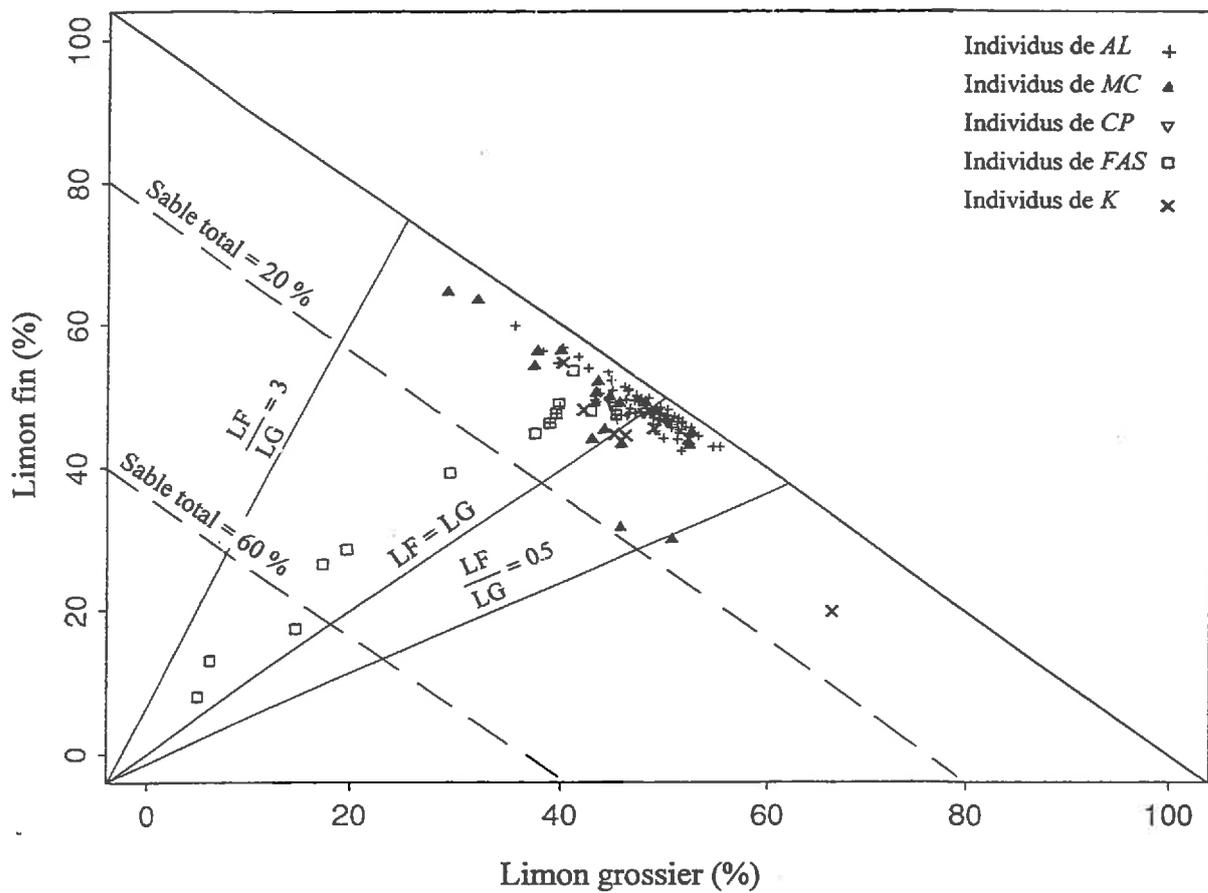
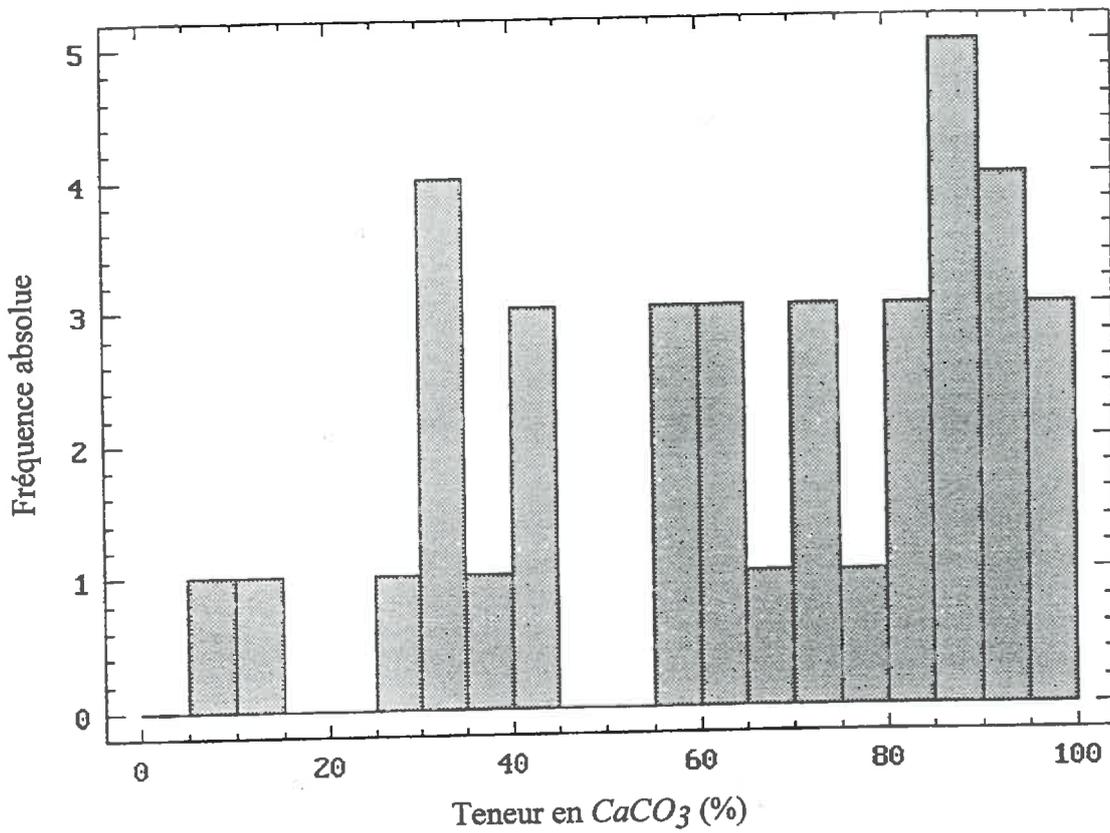


Figure 4.7 : Squelettes granulométriques des résidus insolubles (horizons) des cinq ensembles d'horizons.



Nombre d'individus

70 %

25 %

5 %

Teneur en $CaCO_3$

> 50 %

De 20 à 50 %

< 20 %

Figure 4.8 : Histogramme de la teneur en calcaire total ($CaCO_3$) des individus de l'ensemble matériaux cryoturbés (MC).

Tableau 4.4 : Caractéristiques granulométriques, $CaCO_3$ et CEC des horizons *AL*.

		Ensemble argilo-limoneux (<i>AL</i>)				
		Min	Max	Moy	Mode	Std
Carbonate de calcium	$CaCO_3$ (%)	0	40	5	0	9
Capacité d'échange cationique	CEC (méq 100 g^{-1})	10	25	18	17	3
Granulométrie sans décarbonatation	<i>A</i> (%)	13	47	32	32	6
	<i>LF</i> (%)	25	44	32	33	4
	<i>LG</i> (%)	21	36	31	32	3
	<i>SF</i> (%)	1	12	2	2	2
	<i>SG</i> (%)	0	10	2	1	2
Granulométrie après décarbonatation (résidus insolubles)	<i>A</i> (%)	24	47	33	31	4
	<i>LF</i> (%)	25	45	32	31	3
	<i>LG</i> (%)	21	37	32	34	3
	<i>SF</i> (%)	1	3	2	2	0,5
	<i>SG</i> (%)	0	5	1	0,4	1
Squelettes granulométriques des résidus insolubles	<i>LFs</i> (%)	42	60	48	46	3
	<i>LGs</i> (%)	36	55	48	48	4
	<i>SFs</i> (%)	1	5	2	2	1
	<i>SGs</i> (%)	0	10	1	1	2

Min = Minimum, Max = Maximum, Moy = Moyenne, Std = Ecart-type.

• *L'ensemble 'matériaux cryoturbés' (MC)*

Le tableau 4.5 montre que la teneur en carbonate de calcium des individus rattachés à l'ensemble 'matériaux cryoturbés' (*MC*) présente une grande gamme de variation (92 % d'amplitude). Toutefois, la figure 4.8 montre que les individus de *MC* restent en général fortement calcaires. En effet, 70 % des individus possèdent une teneur en $CaCO_3$ supérieure à 50 % du total de la terre fine.

Compte tenu de la faible quantité de résidus dans les matériaux très calcaires, nous sélectionnons au sein des ensembles *MC*, *CP* et *K* les individus dont la teneur en $CaCO_3$ est inférieure à 75 % du total de la terre fine. La figure 4.9a montre une grande variation des granulométries des individus de *MC*. Cela étant, après décarbonatation, les résidus insolubles de ces individus présentent des granulométries moins dispersées qui se concentrent principalement dans les pôles *AL* et *LA* (Fig. 4.9b), ce domaine granulométrique étant identique à celui de l'ensemble *AL* décrit précédemment. Les deux individus dans le pôle *ALO* de ce triangle correspondent aux horizons les plus calcaires (teneur supérieure à 70 % du total de la terre fine). A noter aussi que les taux de sables insolubles par HCl sont faibles chez les individus de cet ensemble.

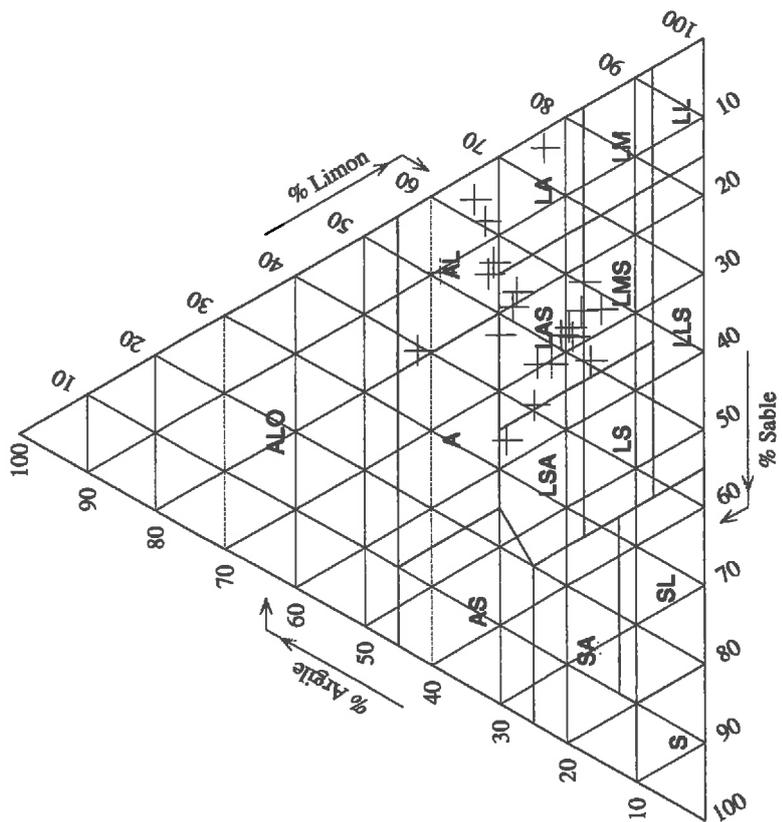


Figure 4.9a : Granulométrie sans décarbonatation des individus (horizons) de l'ensemble matériaux cryoturbés (MC).

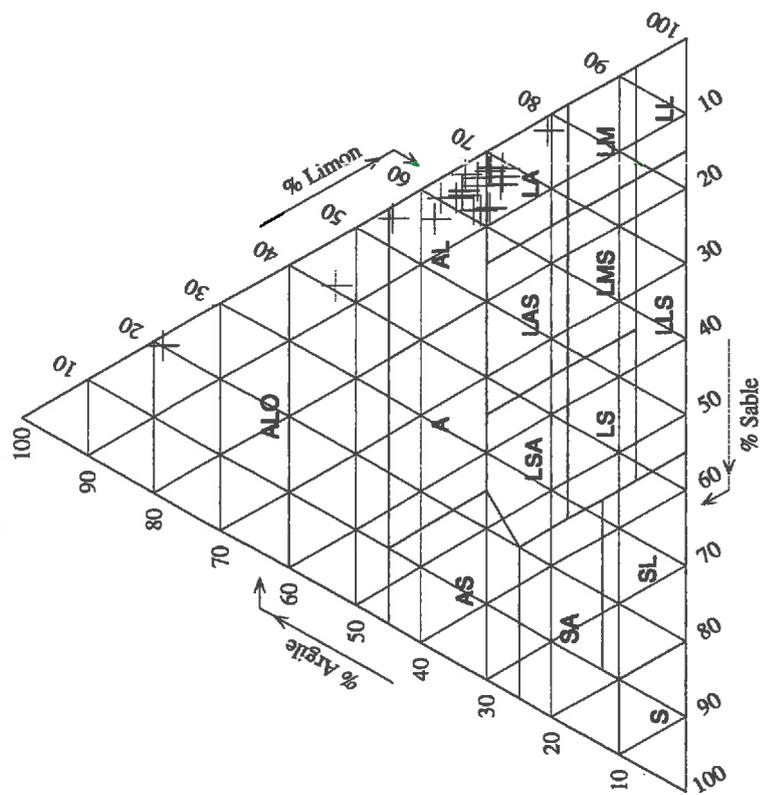


Figure 4.9b : Granulométrie des résidus insolubles des individus (horizons) de l'ensemble matériaux cryoturbés (MC).

Tableau 4.5 : Caractéristiques granulométriques, $CaCO_3$ et CEC des horizons *MC*.

		Ensemble 'matériaux cryoturbés' (<i>MC</i>)				
		Min	Max	Moy	Mode	Std
Carbonate de calcium	$CaCO_3$ (%)	6	98	65	87	25
Capacité d'échange cationique	CEC (méq 100 g^{-1})	2	21	8	8	1
Granulométrie sans décarbonatation	A (%)	5	42	24	28	9
	LF (%)	15	49	31	29	7
	LG (%)	3	38	15	7	10
	SF (%)	1	19	8	8	4
	SG (%)	0,4	56	21	18	15
Granulométrie après décarbonatation (résidus insolubles)	A (%)	21	100	55	100	28
	LF (%)	0	40	21	0	15
	LG (%)	0	38	20	0	13
	SF (%)	0	7	2	0	2
	SG (%)	0	6	1	0	1
Squelettes granulométriques des résidus insolubles	LFs (%)	0	75	46	49	14
	LGs (%)	0	87	43	43	13
	SFs (%)	0	38,7	6,3	3,3	6,8
	SGs (%)	0	13	4	1	4

L'analyse des squelettes granulométriques des résidus insolubles des individus de *MC* (Fig. 4.7) montre que les taux de limons fins et de limons grossiers peuvent être dans des proportions très variées. En effet, ces matériaux présentent la plus grande dispersion (entre 0,6 et 2,2) des rapports *LF / LG* dont l'origine est certainement à rapprocher de leur forte hétérogénéité morphologique. Toutefois, nous remarquons qu'une majorité des individus de l'ensemble *MC* (Fig. 4.7) se localise dans un domaine similaire à celui des individus de l'ensemble *AL* dont le rapport *LF / LG* est égal à 1 en moyenne. Ceci laisse supposer que la décarbonatation des matériaux cryoturbés serait à l'origine de l'ensemble argilo-limoneux. Suivant le degré de décarbonatation des *MC*, les individus de *AL* présenteraient alors différentes teneurs en carbonate de calcium.

- **L'ensemble 'calcaires pulvérulents' (*CP*)**

Les individus de l'ensemble 'calcaires pulvérulents' (*CP*) sont nettement plus calcaires que les matériaux cryoturbés. Le tableau 4.6 montre que la teneur en $CaCO_3$ est supérieure à 30 % et peut atteindre des teneurs de 95 % du total de la terre fine. Nous remarquons aussi que les taux de sables insolubles sont négligeables.

Les individus de cet ensemble dont la teneur en $CaCO_3$ est inférieure à 75 % sont au nombre de deux. Pour ces deux individus, la décarbonatation donnerait aussi des individus de texture identique à celle des individus de l'ensemble *AL*. L'analyse des squelettes granulométriques montre que le résidu de décarbonatation des calcaires pulvérulents donne un rapport *LF / LG* égal à 1. Ces matériaux ne se distinguent donc pas des précédents. Cela étant, le nombre réduit d'individus de *CP* dont la teneur en calcaire est inférieure à 75 % rend les conclusions délicates.

Tableau 4.6 : Caractéristiques granulométriques, $CaCO_3$ et CEC des horizons CP.

		Ensemble 'calcaires pulvérulents' (CP)				
		Min	Max	Moy	Mode	Std
Carbonate de calcium	$CaCO_3$ (%)	33	95	76	89	27
Capacité d'échange cationique	CEC (méq 100 g ⁻¹)	2	14	7	3	5
Granulométrie sans décarbonatation	A (%)	12	36	25	25	8
	LF (%)	19	60	42	40	12
	LG (%)	3	25	10	7	8
	SF (%)	2	10	6	5	3
	SG (%)	3	55	17	11	16
Granulométrie après décarbonatation (résidus insolubles)	A (%)	35	100	79	100	27
	LF (%)	0	31	10	0	13
	LG (%)	0	31	9	0	13
	SF (%)	0	3	1	0	1
	SG (%)	0	1	0,2	0	0,4
Squelettes granulométriques des résidus insolubles	LFs (%)	22	100	55	48	29
	LGs (%)	0	60	37	45	24
	SFs (%)	0	22	7	4	8
	SGs (%)	0	2	0,5	0	1

• *L'ensemble argilo-sableux à sablo-argileux (FAS)*

Les individus de cet ensemble se caractérisent principalement par l'absence totale de carbonate de calcium et leurs fortes teneurs en argile (Tab. 4.7).

Tableau 4.7 : Caractéristiques granulométriques, $CaCO_3$ et CEC des horizons FAS.

		Ensemble argilo-sableux à sablo-argileux (FAS)				
		Min	Max	Moy	Mode	Std
Carbonate de calcium	$CaCO_3$ (%)	0	0	0	0	0
Capacité d'échange cationique	CEC (méq 100 g ⁻¹)	13	25	22	20	3
Granulométrie	A (%)	27	59	43	41	8
	LF (%)	6	31	19	10	9
	LG (%)	3	27	15	7	8
	SF (%)	2	4	3	3	1
	SG (%)	2	57	20	19	19
Squelettes granulométriques	LFs (%)	8	53	34	17	15
	LGs (%)	5	45	27	14	14
	SFs (%)	3	10	6	6	2
	SGs (%)	3	81	33	44	28

La figure 4.10a montre que 80 % des individus de *FAS* possèdent une teneur en argile supérieure à 40 % du total de la terre fine.

Les individus de *FAS* se caractérisent par des textures très dispersées dans le triangle de référence (Fig. 4.10b). Toutefois, ces textures restent principalement argilo-limoneuses à argilo-sableuses.

L'analyse des squelettes granulométriques des individus de *FAS* (Fig. 4.7) montre une continuité texturale nette (rapport $LF / LG = 1,3$). Ceci implique une homogénéité granulométrique des individus de cet ensemble. Globalement, les individus de *FAS* et ceux de *AL* sont de texture argilo-limoneuse. Cependant, les individus de *AL* sont en général à 30 % d'argile, tandis que les individus de *FAS* sont presque toujours à plus de 40 % d'argile à l'exception des individus où la teneur en sable est élevée. Dans ce cas, il n'y a pas de confusion possible avec aucune des autres formations citées. Par contre, les rapports LF / LG des individus les plus limoneux de *FAS* coïncident avec les rapports LF / LG de décarbonatation des autres ensembles.

• *L'ensemble 'calcaires durs' (K)*

Les individus affectés à l'ensemble 'calcaires durs' (*K*) et dont la teneur en calcaire est inférieure à 75 % se caractérisent par des textures limono-argilo-sableuses à limono-sablo-argileuses (Fig. 4.11a). Cela dit, après décarbonatation l'ensemble des individus de *K* se concentrent principalement dans le pôle AL du triangle textural de référence (Fig. 4.11b). Par conséquent, nous pouvons dire que les produits de la décarbonatation de *K* pourraient être des individus à texture argilo-limoneuse qui rejoindraient l'ensemble argilo-limoneux.

Tableau 4.8 : Caractéristiques granulométriques, $CaCO_3$ et *CEC* des horizons *K*.

		Ensemble 'calcaires durs' (<i>K</i>)				
		Min	Max	Moy	Mode	Std
Carbonate de calcium	$CaCO_3$ (%)	47	97	73	65	5
Capacité d'échange cationique	<i>CEC</i> (méq 100 g^{-1})	2	11	6	2	3
Granulométrie sans décarbonatation	<i>A</i> (%)	16	31	23	21	5
	<i>LF</i> (%)	21	62	34	32	11
	<i>LG</i> (%)	4	18	13	18	6
	<i>SF</i> (%)	4	12	10	12	3
	<i>SG</i> (%)	9	32	19	16	7
Granulométrie après décarbonatation (résidus insolubles)	<i>A</i> (%)	31	100	53	38	26
	<i>LF</i> (%)	0	38	20	0	14
	<i>LG</i> (%)	0	36	22	0	13
	<i>SF</i> (%)	0	12	3	3	3
	<i>SG</i> (%)	0	3	1	0	1
Squelettes granulométriques des résidus insolubles	<i>LFs</i> (%)	20	54	43	45	10
	<i>LGs</i> (%)	40	66	49	46	8
	<i>SFs</i> (%)	2	9	5	5	1
	<i>SGs</i> (%)	1	5	3	1	2

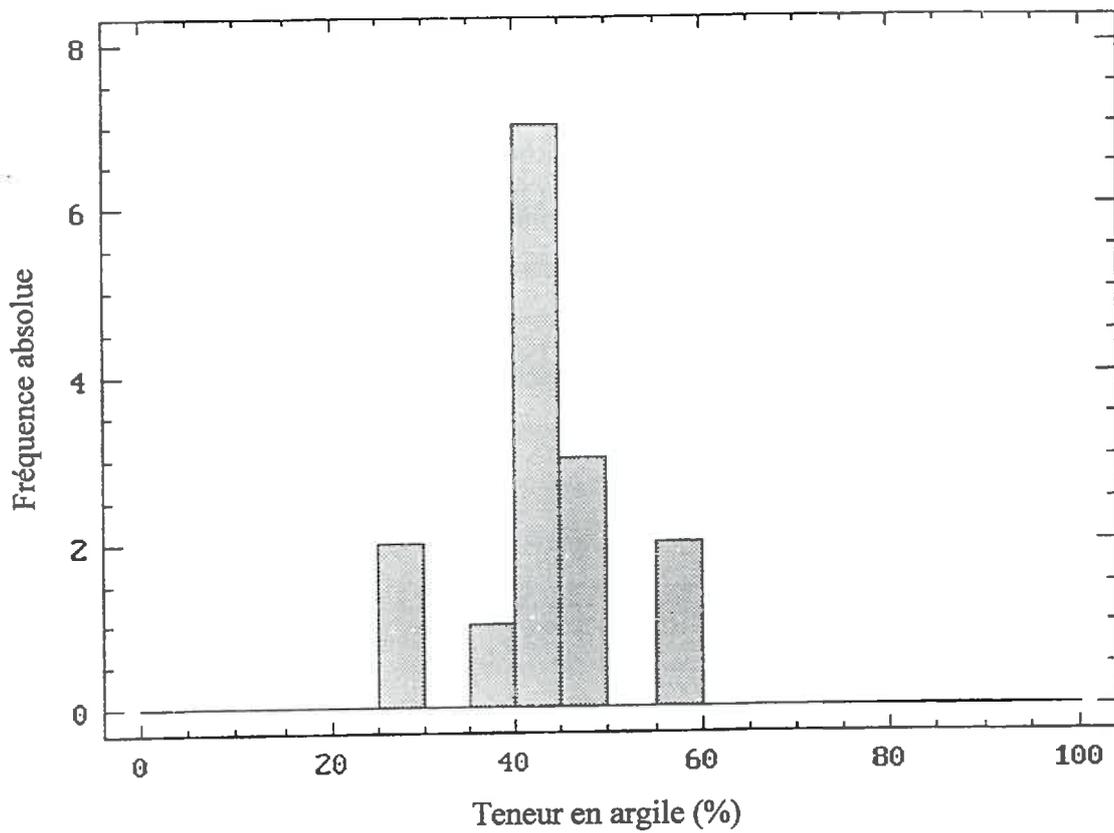


Figure 4.10a : Histogramme de la teneur en argile des individus de l'ensemble argilo-sableux à sablo-argileux (FAS).

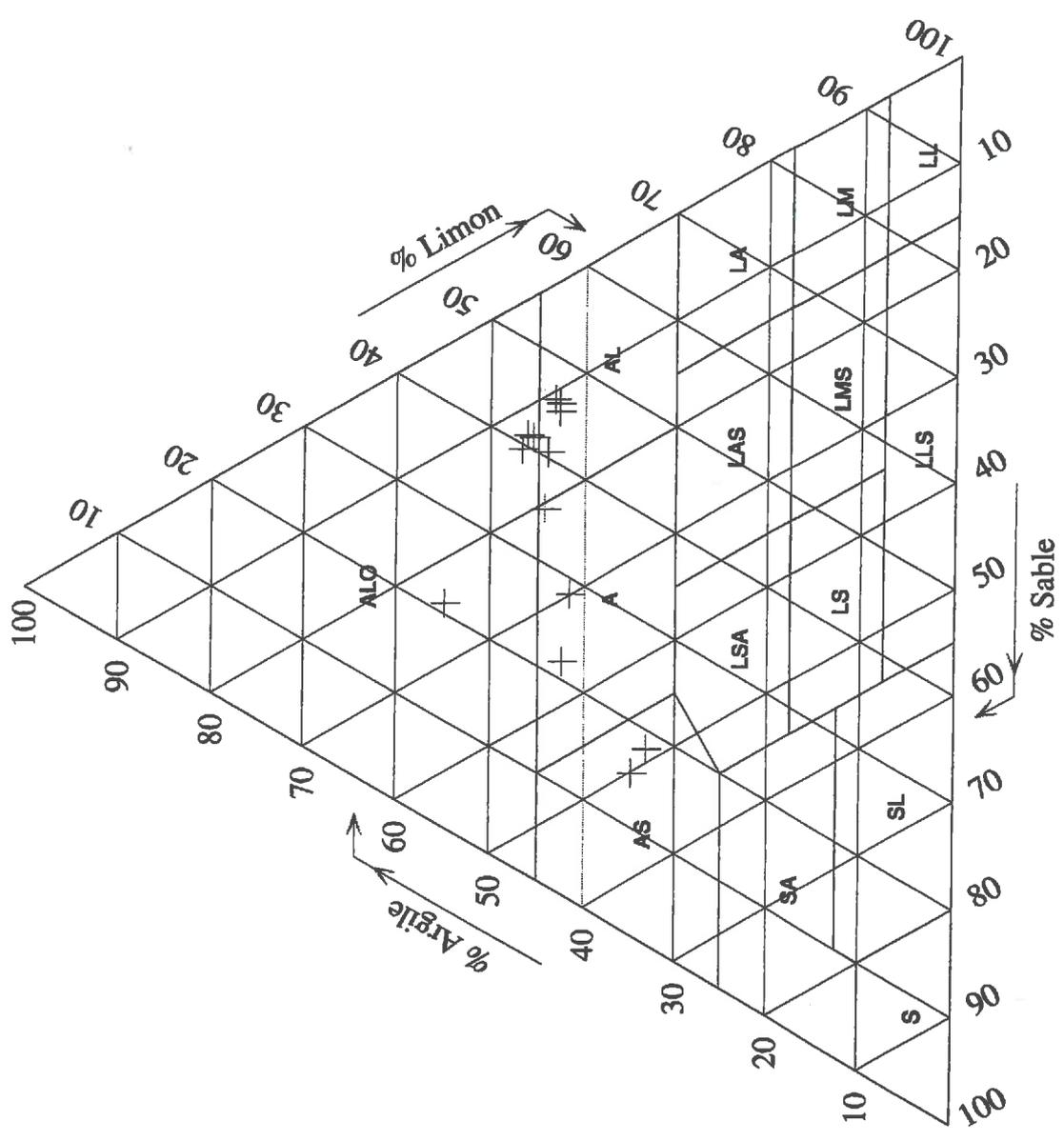


Figure 4.10b : Granulométrie des individus (horizons) de l'ensemble argilo-sableux à sablo-argileux (FAS).

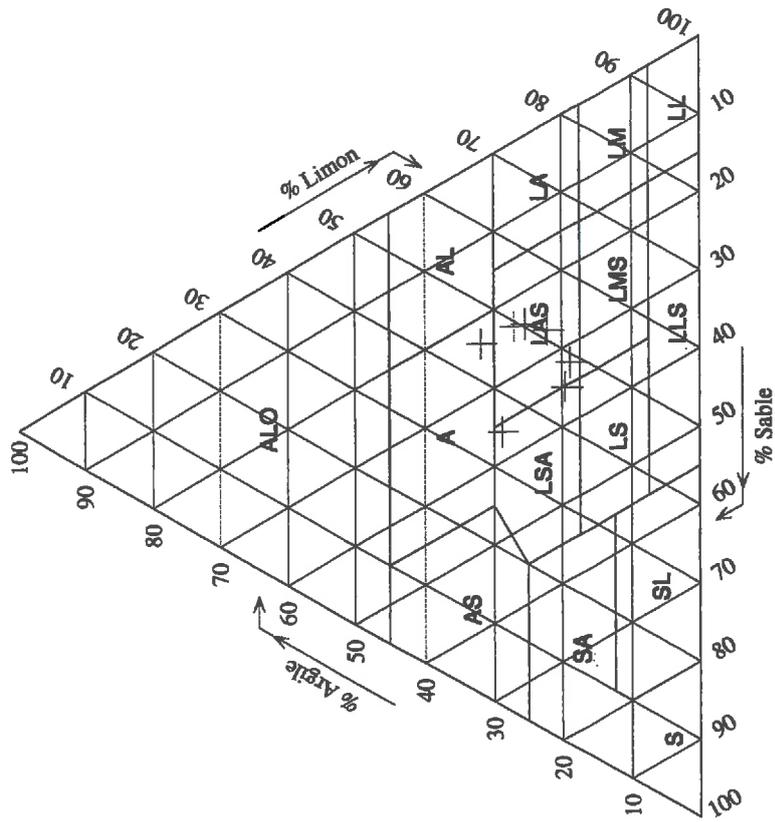


Figure 4.11a : Granulométrie sans décarbonatation des individus (horizons) de l'ensemble calcaires durs (K).

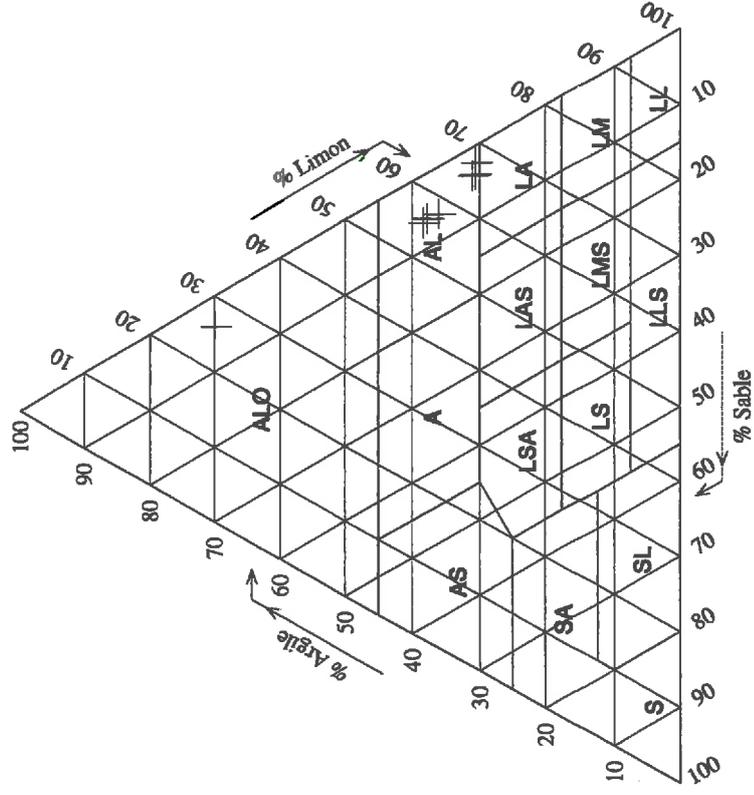


Figure 4.11b : Granulométrie des résidus insolubles des individus (horizons) de l'ensemble calcaires durs (K).

Les individus de *K* sont évidemment très calcaires. Cela étant, les teneurs des autres fractions granulométriques ne sont pas négligeables (Tab. 4.8). L'analyse des squelettes granulométriques des résidus insolubles de *K* (Fig. 4.7) montre clairement que la décarbonatation des individus de *K* fait évoluer ces derniers vers des individus de l'ensemble argilo-limoneux. A noter enfin, que le rapport LF/LG est assez constant (0,9 en moyenne), ceci indiquerait une certaine homogénéité des matériaux calcaires.

2.4 : Synthèse, discussion et premières hypothèses

Les analyses réalisées sur les 172 horizons correspondant aux 27 fosses décrites sur le secteur d'étude confirment les déterminations morphologiques ainsi que la typologie élaborée sur le terrain : (1) argile limoneuse ; (2) matériaux cryoturbés ; (3) calcaires pulvérulents ; (4) formation argilo-sableuse à sablo-argileuse ; (5) calcaires durs. Les résultats permettent également d'avancer de premières hypothèses sur les relations entre les différents matériaux. Ces premières hypothèses sont basées sur une étude "multilocale" puisqu'elles sont le résultat de l'étude sur des fosses pédologiques géoréférencées que nous pouvons considérer comme "ponctuelles". De plus, nous ne tenons pas compte de la position relative des fosses les unes par rapport aux autres. Nous pouvons tout de même proposer une description synthétique des ensembles rencontrés et indiquer les facteurs possibles de leur formation. Ces premières interprétations orienteront les investigations et la discussion dans les chapitres ultérieurs.

L'ensemble "argilo-limoneux supérieur" (*AL*) se caractérise par son homogénéité tant au niveau de la structure qu'au niveau de la distribution granulométrique de la fraction non calcaire. Seuls deux caractères marquent une hétérogénéité spatiale. Il s'agit d'une part, de la présence ou non de carbonates et, d'autre part de l'épaisseur. La faible différenciation de cet ensemble argilo-limoneux rend difficile l'identification des processus qui en sont à l'origine. Néanmoins, la dissolution des carbonates en surface et leur reprécipitation en profondeur semblent être les processus essentiels d'évolution de cet ensemble. Cette dissolution serait à l'origine des encroûtements calcaires rencontrés parfois à la base de *AL*. Ces encroûtements, qui se trouvent en position intermédiaire entre l'ensemble argilo-limoneux supérieur et les autres ensembles (matériaux cryoturbés ou calcaires pulvérulents), souligneraient une discontinuité pédogénétique.

Ces processus de dissolution et de reprécipitation se seraient développés dans une formation "allochtone" ou "sub-allochtone" de texture argilo-limoneuse et très calcaire. L'hypothèse la plus probable est celle d'un apport éolien régional durant la période périglaciaire (Macaire, 1971). Cependant, la texture argilo-limoneuse de *AL* est assez inhabituelle pour une formation éolienne. Cette texture pourrait s'expliquer par l'influence des niveaux argileux de l'Orléanais situés à proximité (Duval & Isambert, 1992).

Ce dépôt éolien de la formation limoneuse aurait eu lieu sur des matériaux déjà cryoturbés et qui auraient subi une seconde phase de cryoturbation, d'où un remaniement et une incorporation de l'argile limoneuse supérieure dans les poches de cryoturbation, argile que l'on retrouve dans la composition granulométrique des individus issus de matériaux cryoturbés.

Enfin, nous retiendrons aussi que l'ensemble *AL* se caractérise par une épaisseur variable. Cette variation de l'épaisseur de l'ensemble *AL* fera l'objet des études qui seront réalisées dans les chapitres suivants.

L'ensemble 'matériaux cryoturbés' (*MC*), souvent en position intermédiaire entre l'ensemble argilo-limoneux supérieur et les autres ensembles calcaires (calcaires pulvérulents

et/ou calcaires durs), a été profondément remanié par les alternances des cycles gel-dégel durant les périodes périglaciaires. Dans cet ensemble, il a été noté sur fosses pédologiques la présence de gros blocs calcaires. Ceci indiquerait qu'une couche de calcaire dur préexistait. Nous pouvons ainsi penser que l'ensemble 'calcaires pulvérulents' (*CP*) était intercalé entre deux niveaux de l'ensemble 'calcaires durs' (*K*). A partir de là, nous pouvons imaginer le déclenchement de la première phase de cryoturbation par : (1) une dissolution partielle du premier niveau de l'ensemble 'calcaires durs' ; (2) une gélifraction de ce calcaire en climat périglaciaire ; (3) des alternances de périodes de gel-dégel qui ont favorisé l'apparition de fentes de retrait puis de structures sous forme de poches. A cet égard, Shumskii (1964) et Van Vliet-Lanoë (1984 & 1987) indiquent que la glace de ségrégation à l'origine des poches lors de la cryoturbation, est souvent guidée par les discontinuités texturales et/ou une rupture dans l'alimentation capillaire à cause de la présence de pierres ou de structures préexistantes.

L'ensemble 'calcaires pulvérulents' (*CP*) présente une texture très homogène et ne semble pas avoir été profondément remanié lors des périodes froides du quaternaire. Néanmoins, le développement d'une structure polyédrique vers le haut alors qu'elle est massive vers la base peut être la conséquence d'une cryodessiccation et ceci avant et pendant la formation des matériaux cryoturbés qui sont souvent sus-jacents.

L'ensemble 'argilo-sableux à sablo-argileux' (*FAS*) se caractérise principalement par sa teneur en sables et par l'absence totale de carbonate de calcium ($CaCO_3$). Cet ensemble est toujours intercalé entre l'ensemble argilo-limoneux supérieur (*AL*) et l'ensemble 'calcaires durs' (*K*). Il s'agit probablement de matériaux de remplissage de dépressions d'origine karstique qui auraient été piégés par les dépôts postérieurs de la formation limoneuse durant le quaternaire (Chéry, 1995). Il faut souligner aussi qu'il existe une grande analogie entre ces matériaux argilo-sableux à sablo-argileux et les matériaux burdigaliens décrits par Macaire (1971, 1972a et b) et Gigout (1973) et qui sont contemporains des sables et des argiles de Sologne et de l'Orléanais.

Enfin, les calcaires durs (*K*) constituent le sommet du toit calcaire non directement affecté par les phénomènes périglaciaires du quaternaire.

Il est à noter que la plupart des horizons étudiés ont une faible teneur en sable et un rapport LF / LG peu variable avoisinant la valeur 1 ($0,3 < LF / LG < 2,2$). Seules les formations argilo-sableuses (*FAS*) ont des teneurs en sable plus élevées mais nous constatons également un rapport LF / LG remarquablement constant. Il est fort probable que la formation *AL* soit issue de la décarbonatation des calcaires sous-jacents. Cette décarbonatation ne s'est certainement pas produite directement au contact du calcaire dur. Celui-ci aurait connu différents remaniements liés aux phénomènes périglaciaires (cryoturbation, cryodessiccation, déplacements par le vent ou reptation le long de la pente). Il est donc difficile de retracer les différents épisodes ayant marqué ces remaniements. Nous pouvons imaginer qu'ils ont pu incorporer des matériaux argileux burdigaliens entraînant une certaine dispersion du rapport LF / LG au sein des matériaux cryoturbés. Enfin, étant donné que nous ne connaissons pas l'amplitude géographique des déplacements, nous pouvons seulement constater une forte similitude entre les produits de décarbonatation des matériaux calcaires et l'argile limoneuse. Il est donc fort probable que les matériaux d'origine de l'ensemble *AL* soient autochtones à sub-allochtones. Ainsi, l'hypothèse d'autochtonie (différenciation selon le matériau) de l'ensemble *AL* sera abordé dans le chapitre suivant en terme d'étude de la variation de l'épaisseur de *AL* en fonction des matériaux sous-jacents.

Conclusions du chapitre IV

L'étude morphologique et analytique des horizons observés sur 27 fosses du secteur permet de proposer une typologie en cinq grands ensembles nommés successivement : 'Argile limoneuse' (*AL*) ; 'Matériaux cryoturbés' (*MC*) ; 'Calcaires pulvérulents' (*CP*) ; 'Formation argilo-sableuse à sablo-argileuse' (*FAS*) et 'Calcaires durs' (*K*).

La différenciation des sols du secteur d'étude semble être sujette à plusieurs hypothèses, nous pouvons dire que les individus (horizons) des cinq ensembles cités ci-dessus restent facilement reconnaissables sur le terrain sur la base de la texture, de la couleur, de la teneur en carbonate de calcium estimée par l'acide chlorhydrique et de la charge en éléments grossiers. Ces caractéristiques constituent les critères de discrimination entre les différents ensembles. Par conséquent, elles seront retenues comme critères de cartographie sur le secteur d'étude.

Ainsi, lors d'une prospection cartographique à la tarière, il est aisé d'affecter tout horizon pédologique identifié à l'un des cinq ensembles d'horizons préétablis avec un risque de classement erroné minimum. Certains doutes pourront être maintenus quant à la présence d'un horizon dur en profondeur, difficilement différenciable d'un arrêt de la tarière sur cailloux.

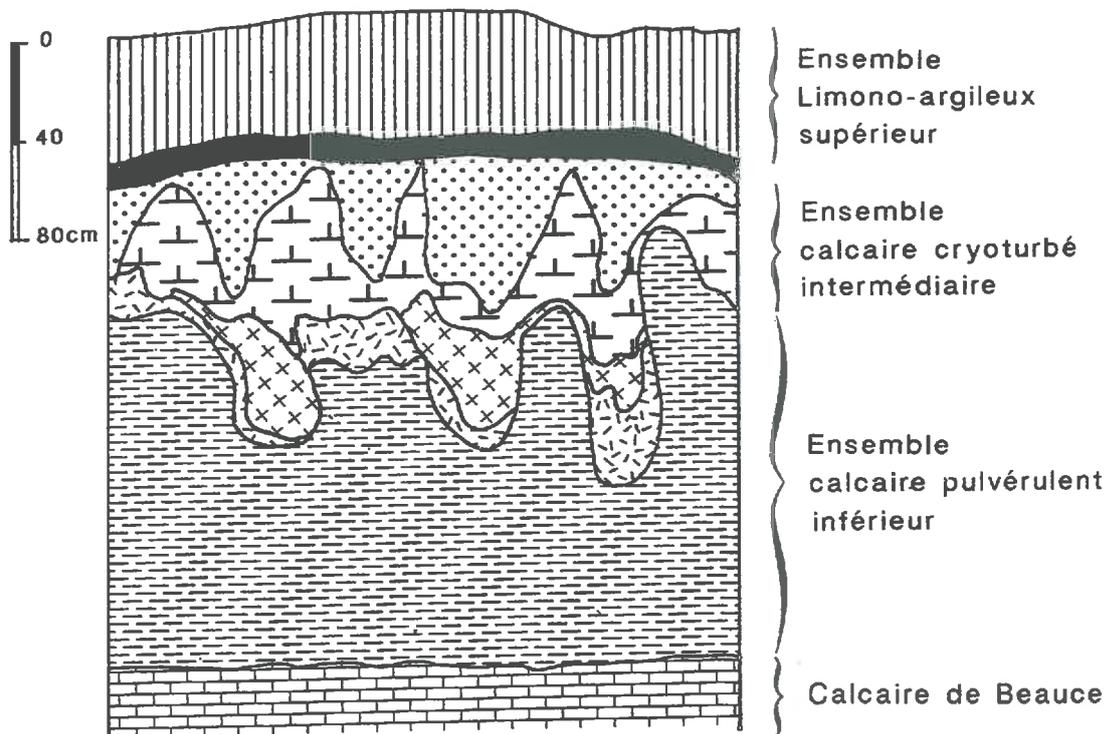


Figure 5.1 : Coupe pédologique schématique des trois ensembles d'horizons (d'après Ould Mohamed, 1991)

Chapitre V : Etude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse selon le matériau parental

Introduction

Le chapitre IV a permis d'identifier les principaux ensembles constituant les formations superficielles et la couverture pédologique de Petite Beauce. Rappelons qu'il s'agit de : (1) l'ensemble argilo-limoneux ; (2) l'ensemble 'matériaux cryoturbés' ; (3) l'ensemble 'calcaires pulvérulents' ; (4) la formation argilo-sableuse ; (5) l'ensemble 'calcaires durs' (*cf. pour exemple le schéma de la figure 5.1*).

L'objectif du présent chapitre est d'analyser les relations entre l'ensemble argilo-limoneux et les autres matériaux constituant généralement le substrat du secteur. Si de telles relations sont mises en évidence, nous essaierons de préciser les redistributions éventuelles au sein de la couverture pédologique pouvant expliquer la variabilité de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux.

Une telle analyse pédogénétique peut impliquer des études très détaillées utilisant des techniques de géochimie ou de micromorphologie. Compte tenu des objectifs de la thèse, nous avons privilégié une approche spatiale macroscopique à partir des données 'classiques' de la cartographie, complétées par une prospection géophysique. La réflexion portera principalement sur la recherche d'indicateurs permettant d'orienter l'analyse spatiale de la variabilité de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux que l'on appellera indifféremment dans la suite de ce travail "horizon pédologique argilo-limoneux", "couverture limoneuse" ou parfois, tout simplement "sol".

Nous étudions les relations entre sol et matériaux d'une part à partir d'une analyse utilisant un échantillonnage de fosses pédologiques couvrant l'ensemble du secteur d'étude, et d'autre part à partir d'une analyse détaillée d'une parcelle à l'aide d'un appareillage géophysique. L'étude des fosses pédologiques prolonge le chapitre précédent. L'approche géophysique complète de façon plus détaillée cette analyse relationnelle entre les matériaux en tentant une reconstitution tridimensionnelle des ensembles présents sur la parcelle étudiée.

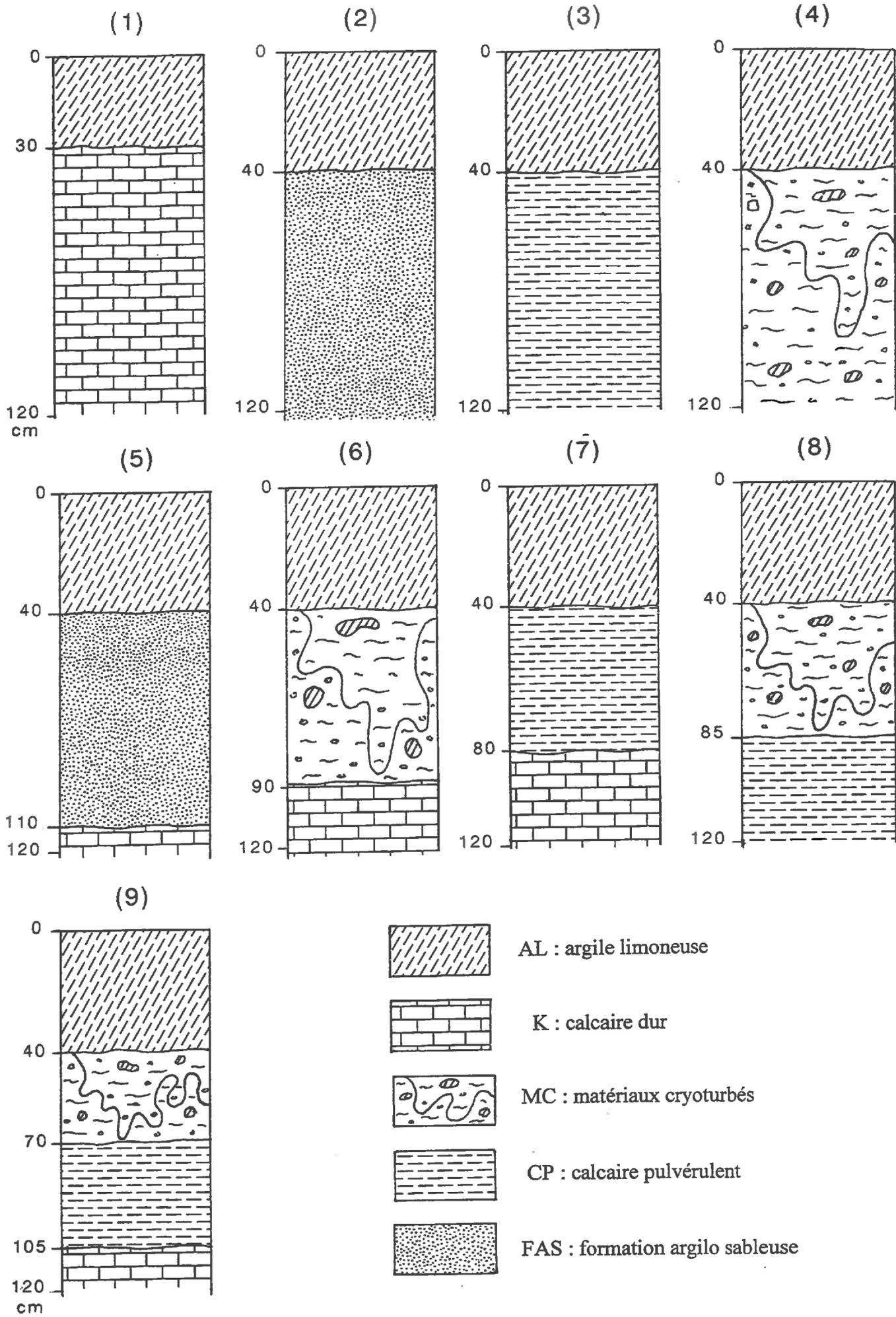


Figure 5.2 : Différents types de succession d'horizons au niveau des fosses pédologiques

1. Relation entre sol et matériaux sous-jacents à l'échelle du secteur de 3500 ha

Les fosses pédologiques réalisées sur le secteur d'étude (cf. Fig. 4.1, chapitre IV) ont permis de mesurer l'épaisseur de l'argile limoneuse et au même temps d'identifier le matériau sous-jacent à cette argile limoneuse (Tab. 5.1). La figure 5.2 montre les neuf types de successions d'horizons rencontrés au sein des 27 fosses pédologiques réalisées. Nous distinguons ainsi :

1. de l'argile limoneuse sur des calcaires durs directement (*AL-K*),
2. de l'argile limoneuse sur des formations argilo-sableuses (*AL-FAS*),
3. de l'argile limoneuse sur des calcaires pulvérulents (*AL-CP*),
4. de l'argile limoneuse sur des matériaux cryoturbés (*AL-MC*),
5. de l'argile limoneuse sur des formations argilo-sableuses puis des calcaires durs (*AL-FAS-K*),
6. de l'argile limoneuse sur des matériaux cryoturbés puis des calcaires durs (*AL-MC-K*),
7. de l'argile limoneuse sur des calcaires pulvérulents puis des calcaires durs (*AL-CP-K*),
8. de l'argile limoneuse sur des matériaux cryoturbés puis des calcaires pulvérulents (*AL-MC-CP*),
9. de l'argile limoneuse sur des matériaux cryoturbés, des calcaires pulvérulents puis des calcaires durs (*AL-MC-CP-K*).

Tableau 5.1 : Epaisseur de l'argile limoneuse et type de matériau sous-jacent rencontré au sein des fosses pédologiques.

Fosse	EPAL	Matériau	Fosse	EPAL	Matériau
1	40	MC55 / CP120	15	50	K
2	90	MC125	16	50	FAS210
3	30	MC75 / K	17	70	MC120
4	70	MC125 / K	18	75	MC95 / K
5	90	MC165	19	40	MC105
6	80	CP120	20	60	FAS210
7	50	MC100 / K	21	30	MC50 / K
8	90	FAS10 / K	22	40	MC65 / K
9	70	FAS15 / K	23	40	MC100 / CP160 / K
10	60	CP120 / K	24	45	MC220 / K
11	65	K	25	50	MC100 / CP210
12	65	MC130 / K	26	40	MC80 / CP170
13	50	MC70 / K	27	65	MC190 / CP260
14	120	FAS210	/	/	/

EPAL = épaisseur de l'argile limoneuse mesurée. K = calcaire dur. MC = matériau cryoturbé. CP = calcaire pulvérulent. FAS = formation argilo-sableuse.

Pour la fosse 23 par exemple, EPAL = 40 cm et l'écriture MC100 / CP160 / K veut dire que le matériau cryoturbé (MC) va de 40 cm à 100 cm de profondeur puis nous avons le calcaire pulvérulent (CP) jusqu'à 160 cm de profondeur (de 100 cm à 160 cm de profondeur) et enfin le calcaire dur (K).

L'étude de la relation entre l'épaisseur de l'argile limoneuse et les types de matériaux sous-jacents (Fig. 5.3a et Fig. 5.3b) montre que l'épaisseur de la couverture limoneuse varie indifféremment des types de matériaux sur lesquels elle repose. Par exemple pour le cas (*AL-MC-K*) rencontré au sein de neuf fosses, l'épaisseur de l'argile limoneuse varie de 30 à 75 cm. Ainsi, de cette analyse multilocale des 27 fosses pédologiques du secteur, nous pouvons dire que :

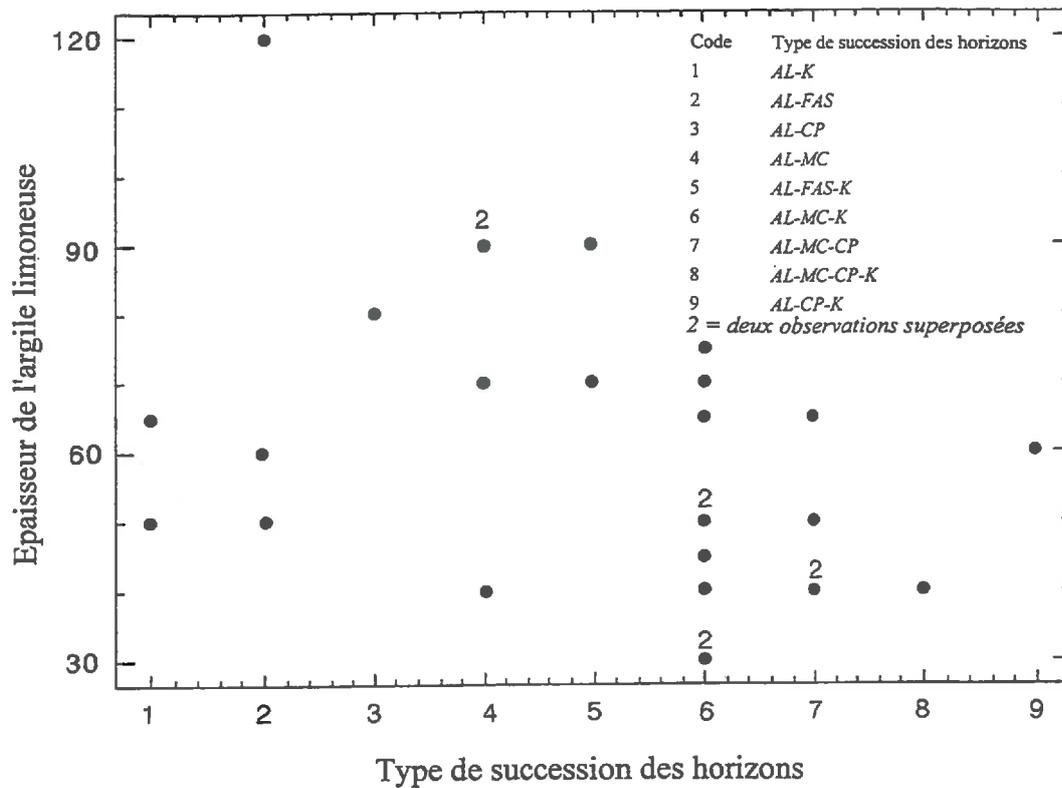


Figure 5.3a : Variation de l'épaisseur de l'argile limoneuse au sein des 27 fosses pédologiques réalisées sur le secteur d'étude suivant le type d'agencement des horizons.

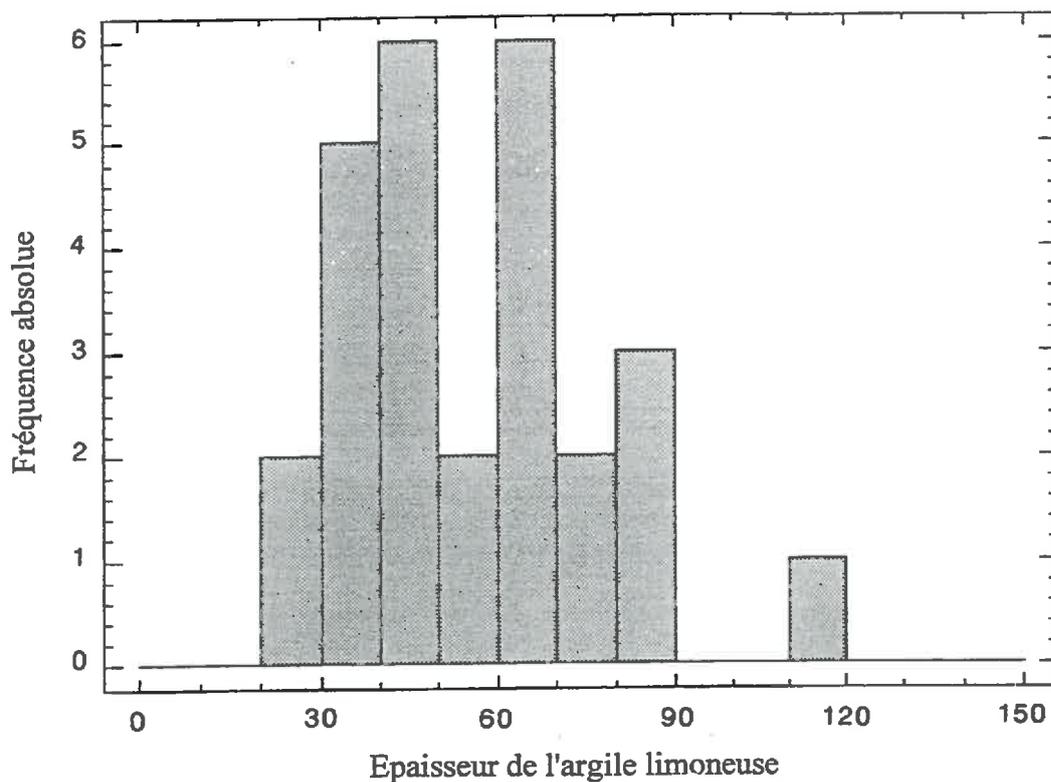


Figure 5.3b : Histogramme de l'épaisseur de l'argile limoneuse au sein des 27 fosses pédologiques réalisées sur le secteur d'étude.

- (1) l'argile limoneuse rencontrée dès la surface recouvre indifféremment calcaire dur, calcaire pulvérulent, matériau cryoturbé et formation sableuse,
- (2) l'épaisseur de l'horizon argilo-limoneux ne dépend pas du type de matériau sous-jacent.

Toutefois, le nombre restreint de situations observées (27), comparé au nombre assez grand de combinaisons possibles (9), ne permet pas de généraliser les résultats.

2. Relation entre sol et matériaux à l'échelle d'une parcelle de 20 ha

2.1 : Introduction

L'approche multilocale à partir des fosses pédologiques "ponctuelles" ne permet pas d'avoir une vision continue de la variabilité spatiale des matériaux. L'objectif de ce sous paragraphe est de décrire l'organisation tridimensionnelle du sol et des matériaux géologiques qui lui sont immédiatement sous-jacents. A nouveau, nous examinerons si nous pouvons en déduire des arguments permettant d'expliquer la variabilité spatiale de l'épaisseur de l'horizon argilo-limoneux.

Une approche tridimensionnelle des formations superficielles se heurte à la difficulté d'acquérir des données en profondeur. Nous avons choisi la prospection géophysique et en particulier la résistivité électrique pour accéder à moindre coût à ces informations de profondeur. L'étude porte sur une parcelle de 20 ha (*cf. Fig. 2.1, chapitre II*). Les arguments du choix de cette parcelle sont présentés dans le chapitre II.

En partant de l'hypothèse que les variations de la résistivité électrique sont liées principalement à une variation de l'épaisseur des différents horizons (couches), nous avons été conduits à tester l'aptitude des méthodes de géophysique à différencier les différents horizons pédologiques sur la parcelle de 20 ha.

Pour ce faire, deux types de mesures électriques ont été réalisés : (1) une mesure électrique par sondages électriques le long d'un transect. Ces sondages permettent localement d'explorer des couches de plus en plus profondes et ainsi d'analyser les discontinuités verticales ; (2) une mesure électrique exhaustive et quasi continue par traînés électriques. L'interprétation de ces traînés électriques qui rendent compte des discontinuités latérales est faite sur la base des sondages électriques réalisés sur la même surface.

Dans ce paragraphe, nous présentons successivement :

1. les résultats obtenus à partir des sondages électriques, c'est-à-dire l'analyse verticale de la succession des horizons,
2. la variabilité latérale des matériaux obtenue par traînés électriques,
3. la validation de l'approche géophysique,
4. une étude de la variation de l'épaisseur du sol en fonction de la succession des matériaux.

Les données géophysiques ont été acquises dans le cadre d'un programme GEOFCAN en collaboration avec l'Institut des Sciences et Technologies de l'Université de Paris VI. Le travail d'acquisition et de traitement des mesures électriques ont fait l'objet d'un mémoire d'ingénieur (Le Parco, 1995). Nous ne présentons ici qu'une synthèse qui tente de souligner les relations entre le sol et les matériaux.

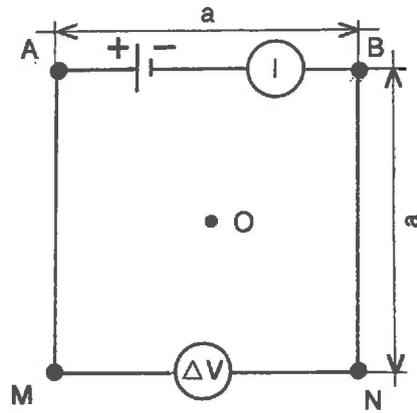
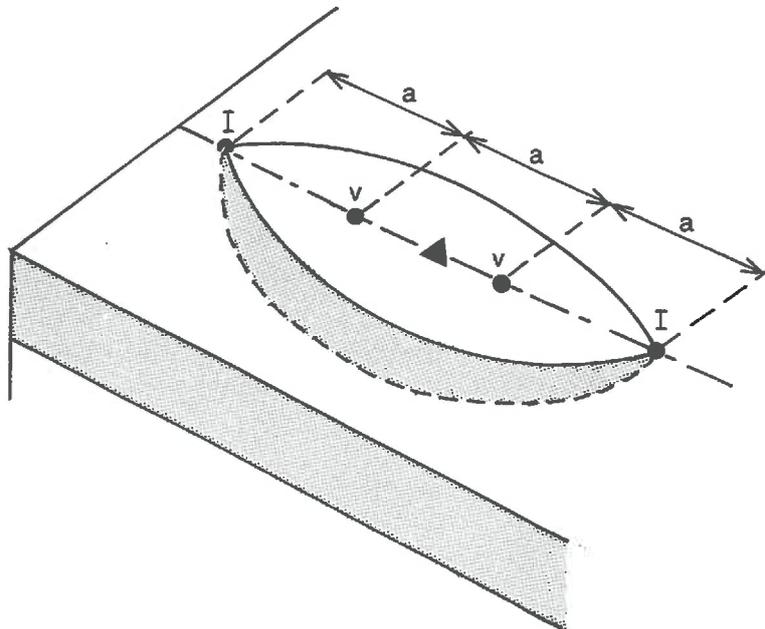


Figure 5.4a : Quadripôle électrique : cas du dispositif carré.



- I Electrodes d'injection du courant
- v Electrodes de mesure de la différence de potentiel
- ▲ Point central du dispositif
- - - Ligne de mesure
- a Ecartement entre les électrodes
- Lignes de courant

Figure 5.4b : Configuration du dispositif Wenner (d'après Lamotte, 1993).

2.2 : Etude de la variabilité verticale par sondages électriques

2.2.1 : Méthode

La mesure de la résistivité électrique nécessite quatre électrodes (Fig. 5.4a) : deux électrodes (A et B) permettant l'injection du courant et entre lesquelles est mesurée l'intensité du courant injecté I , et deux électrodes (M et N) entre lesquelles est mesurée une différence de potentiel ΔV . L'intensité du courant décroît lorsqu'on s'éloigne des électrodes d'injection. La mesure électrique concerne donc un certain volume, à l'intérieur duquel la présence d'une hétérogénéité aura une influence sur la valeur globale mesurée. Cependant, la mesure est attribuée au centre du dispositif.

Les sondages électriques servent à déterminer la succession des différentes couches sur la base des résistivités et des épaisseurs (Dabas *et al.*, 1989). Dans le cas de ce type de mesure électrique, le centre du dispositif de mesure est fixe, et nous faisons varier l'écartement des électrodes (dispositif Wenner Fig. 5.4b). Ainsi, une épaisseur de terrain de plus en plus importante est prise en compte.

Pour notre étude, douze sondages électriques ont été réalisés le long d'une toposéquence orientée Nord-Sud et située à l'Est de la parcelle d'étude pour des écartements (a) des électrodes variant de 10 cm à 10 m. L'interprétation des couples de valeurs résistivité apparente (ρ_a) et écartement entre les électrodes (a) permet de déterminer la résistivité et l'épaisseur des différentes couches.

L'interprétation des sondages électriques ou encore inversion du sondage électrique consiste à faire coïncider au mieux la courbe théorique $\rho_a = f(a)$ aux points expérimentaux obtenus pour les différents écartements effectués lors de la réalisation d'un sondage électrique. Cette interprétation soulève souvent certaines difficultés, qui existent dans tous les problèmes d'inversion en géophysique. Ces difficultés comportent deux aspects :

(1) le principe d'équivalence dans lequel il est admis qu'une couche résistante située entre deux couches conductrices est caractérisée par sa résistance transversale, égale au produit de son épaisseur par sa résistivité ($e \times \rho$). Du point de vue du sondage électrique, cette couche sera équivalente (c'est-à-dire que l'on obtiendra pratiquement la même courbe) à la superposition de plusieurs autres couches pourvu que ces n couches vérifient :

$$e \times \rho = \sum_{i=1}^n e_i \times \rho_i.$$

Cela se vérifie d'autant mieux que le contraste de résistivité entre la couche résistante et les couches conductrices est marqué. Le même raisonnement s'applique dans le cas d'une couche conductrice située entre deux couches résistantes.

(2) lorsqu'une couche ayant une résistivité de valeur intermédiaire par rapport aux couches sous-jacente et sus-jacente possède une épaisseur restreinte comparativement à ces dernières, elle n'aura que peu d'influence sur la courbe de sondage. Il est alors possible de l'enlever sans modifier significativement la forme de la courbe : c'est le phénomène de disparition.

2.2.2 : Différenciation des couches par sondage électrique

Les douze sondages électriques réalisés (Fig. 5.5a) font apparaître trois matériaux distincts d'un point de vue électrique :

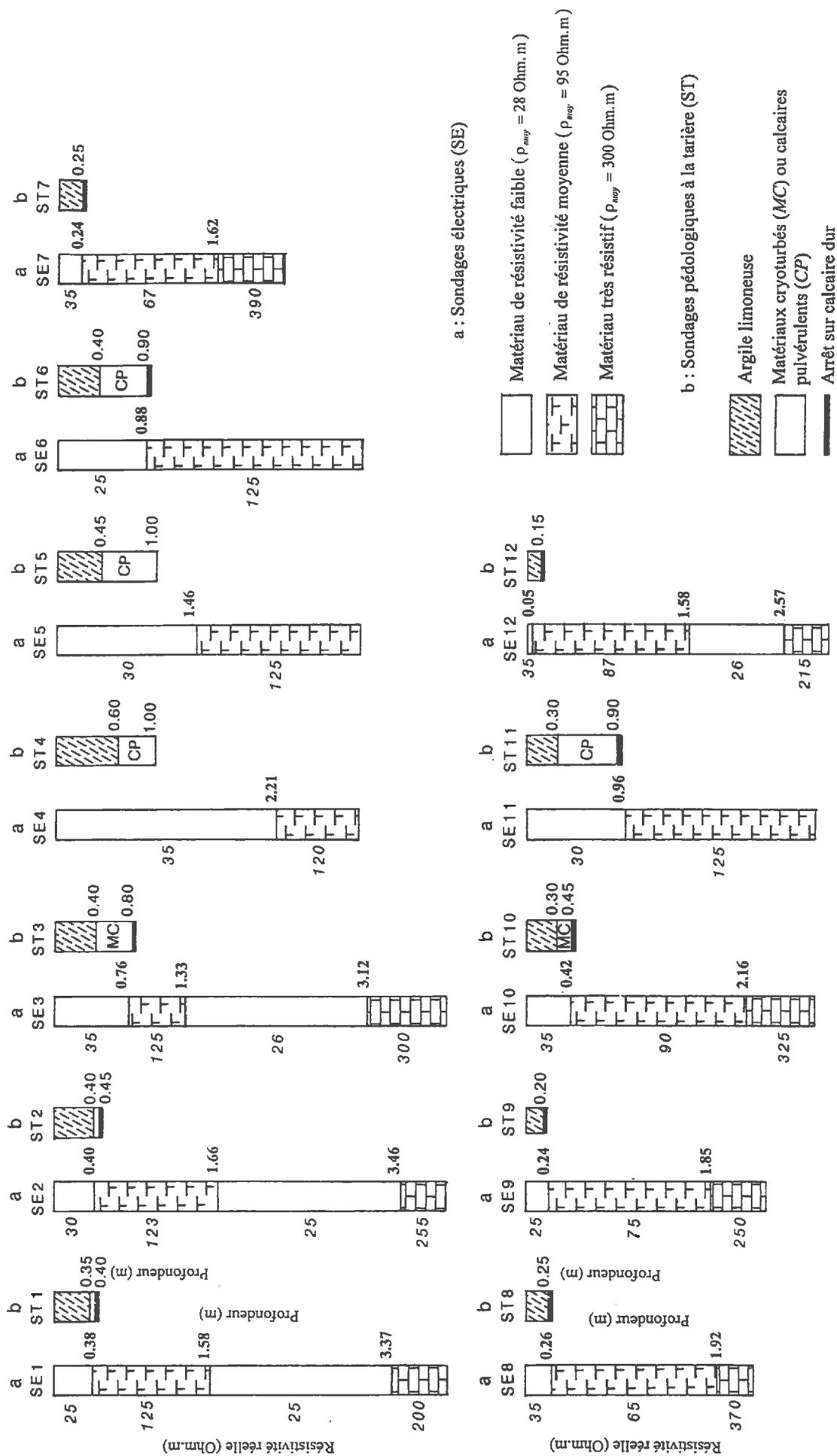


Figure 5.5 : (a) Matériaux détectés par sondages électriques et leurs épaisseurs. (b) Matériaux détectés par sondages pédologiques et leurs épaisseurs.

- un premier matériau dont la résistivité varie entre 25 et 35 $\Omega.m$ au sein des douze sondages électriques (résistivité moyenne 28 $\Omega.m$),
- un second matériau de 95 $\Omega.m$ de résistivité moyenne. La résistivité au sein de ce matériau peut varier de 65 à 125 $\Omega.m$ suivant les sondages,
- un troisième matériau dont la résistivité varie entre 215 et 390 $\Omega.m$ (résistivité moyenne 300 $\Omega.m$).

Ces trois matériaux apparaissent le plus souvent dans cet ordre de la surface vers la profondeur. Cependant, il faut noter la présence au sein de certains sondages électriques d'une couche peu résistive et assez épaisse, souvent en position intermédiaire (sondages électriques 1, 2, 3 et 12 Fig. 5.5a) par rapport au second et au troisième matériaux cités ci-dessus.

Aux mêmes emplacements que les douze sondages électriques, douze sondages pédologiques (Fig. 5.5b) ont été réalisés. L'objectif était d'identifier les matériaux pédologiques situés dans le premier mètre de profondeur et de déterminer leurs épaisseurs. Ces sondages pédologiques montrent : (1) que l'épaisseur de l'argile limoneuse varie entre 15 et 60 cm (épaisseur moyenne de 35 cm) ; (2) que l'on rencontre les trois types de matériaux précédemment décrits.

La comparaison des sondages électriques et des sondages pédologiques deux à deux (Fig. 5.5a et Fig. 5.5b) permet de constater une remarquable coïncidence entre les profondeurs d'arrêt sur calcaire dur à la tarière et les profondeurs d'apparition du matériau de résistivité moyenne. Par contre les sondages électriques ne distinguent qu'un seul matériau peu résistif alors qu'il est aisé de distinguer à la tarière les différents horizons et matériaux sous-jacents. Par exemple, au niveau du sondage électrique numéro 4 (Fig. 5.5a), il est distingué électriquement deux types de matériaux : un premier de faible résistivité jusqu'à une profondeur d'environ 2 m puis un second matériau de résistivité moyenne. Au même endroit, le sondage pédologique (Fig. 5.5b) montre deux matériaux sur une profondeur de 1 m : (i) une argile limoneuse de 60 cm d'épaisseur puis ; (ii) des calcaires pulvérulents.

Ce même scénario est constaté pour les matériaux cryoturbés de poches au niveau du sondage numéro 10 par exemple.

Ainsi, nous pouvons dire que les trois matériaux (argile limoneuse, calcaires pulvérulents et matériaux cryoturbés) apparaissent confondus au sein d'un sondage électrique. Ceci explique aussi le fait de rencontrer des matériaux en profondeur ayant une résistivité électrique semblable à celle de l'argile limoneuse supérieure.

Nous pouvons ainsi interpréter les résultats des sondages électriques. Les matériaux de forte résistivité correspondent aux calcaires durs que nous supposons en place et en général à plus de deux mètres de profondeur. La présence d'une couche de plus faible résistivité située au dessus de cette première couche peut s'interpréter comme étant ce même calcaire mais partiellement altéré, remanié ou déplacé. Cela lui donnerait une plus grande porosité favorable à la circulation de l'eau et changerait ses propriétés de conductivité électrique. Ce second matériau reste toutefois un obstacle à la tarière. Il se différencie totalement du matériau de faible résistivité que l'on retrouve également en position sommitale du calcaire dur en place. Lorsque nous pouvons l'atteindre à la tarière, ce matériau est identifié comme étant des calcaires pulvérulents ou bien des matériaux cryoturbés très faiblement chargés en cailloux. Du point de vue électrique, ce matériau ne se distingue pas de l'argile limoneuse qui surmonte

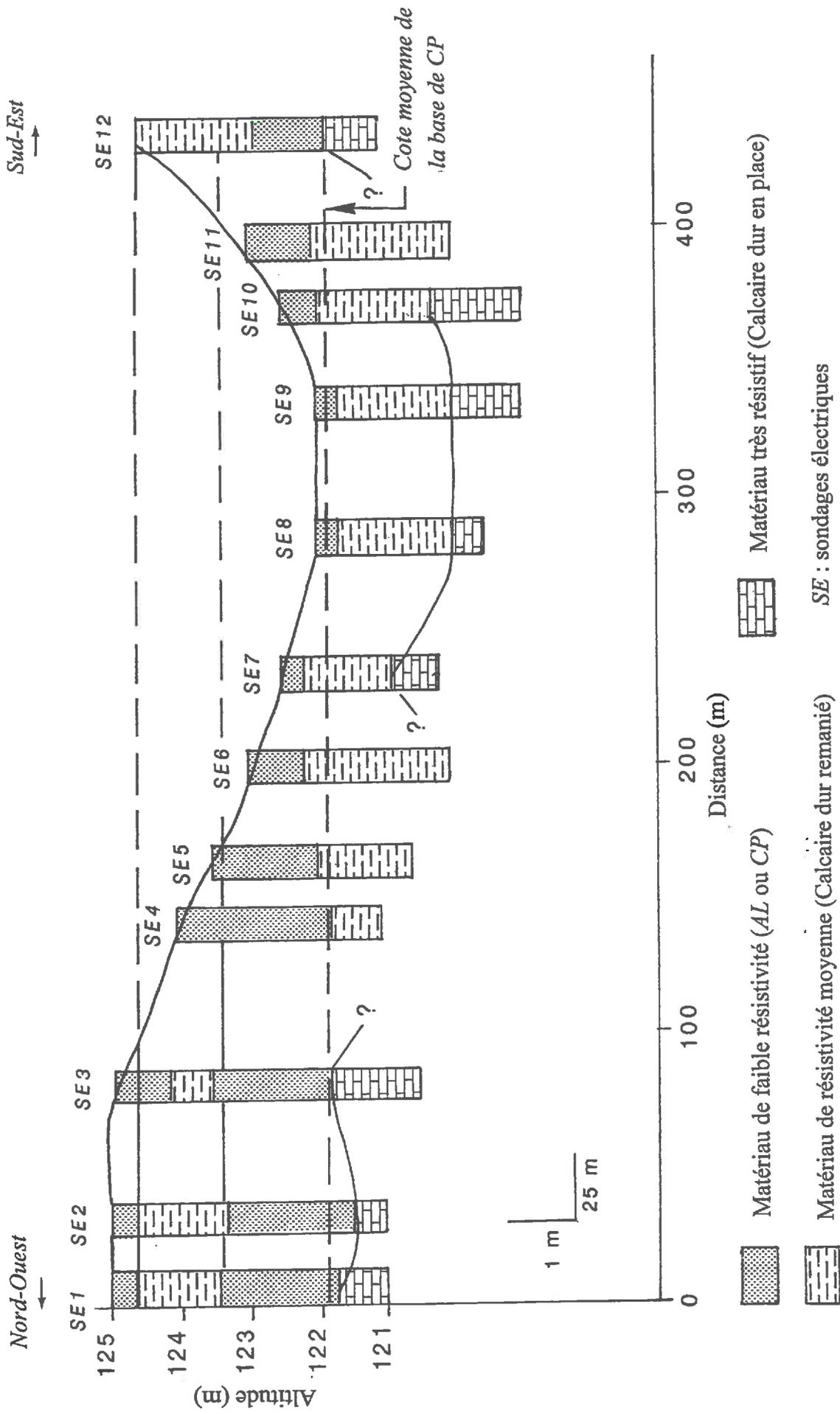


Figure 5.6 : Coupe schématique du terrain sur la base des résistivités électriques.

l'ensemble de toutes ces formations. Une forte épaisseur du matériau peu résistif peut alors s'interpréter soit comme une forte épaisseur de l'argile limoneuse surmontant le calcaire dur soit comme une épaisseur inconnue de l'argile limoneuse surmontant le calcaire pulvérulent et/ou des matériaux cryoturbés très peu chargés en cailloux.

2.2.3 : Analyse structurale des matériaux le long du transect

En replaçant les sondages électriques le long de la toposéquence (Fig. 5.6), nous confirmons les interprétations proposées précédemment. Nous pouvons retracer la stratigraphie du bas vers le haut sur la base de quatre matériaux.

Le calcaire dur de profondeur

En théorie, le matériau de forte résistivité, interprété comme étant le calcaire dur en place, devrait servir de référence stratigraphique. En fait, nous constatons que le toit de cette couche n'est pas horizontal. Il est même difficile de joindre les points de sondage électrique puisque cette couche n'est parfois pas atteinte par cette technique. Plusieurs interprétations pourraient s'envisager : d'une part, il existerait une hétérogénéité spatiale des matériaux calcaires, d'autre part, la mesure de la résistivité ne permettrait pas une estimation suffisamment précise des profondeurs. En l'absence d'observations de sondages géologiques, nous ne poursuivrons pas les investigations au-delà de ces hypothèses.

Le calcaire pulvérulent

Si nous nous intéressons désormais à la base du calcaire pulvérulent ou de l'argile limoneuse lorsque celui-ci est absent, nous constatons ici un niveau quasi horizontal. La cote moyenne est de 121,9 m pour un écart-type de 20 cm.

Cette cote correspond au toit du calcaire en place ou remanié. L'épaisseur du calcaire pulvérulent lorsqu'il est présent est en moyenne de 105 cm, plutôt moins épais sur le versant orienté vers le Nord-Ouest que sur celui orienté vers le Sud-Est. Le faible nombre de points de sondages électriques et l'erreur d'estimation des épaisseurs par cette technique ne permet pas de conclure à un biseautage de cette couche.

Le calcaire dur "remanié"

Des calcaires durs de résistivité moyenne au dessus du calcaire pulvérulent sont présents principalement sur le versant orienté vers le Sud-Est (*SE1*, *SE2*, et *SE3*). Cela confirme la nature stratigraphique du calcaire pulvérulent et non une origine d'altération puisqu'il est présent entre deux bancs de calcaires durs. La cote du toit du calcaire dur sommital de résistivité moyenne semble également horizontal mais le nombre de points où il est observé est insuffisant pour réellement conclure.

L'argile limoneuse

Enfin, l'argile limoneuse ne se distingue pas par sondage électrique du calcaire pulvérulent. Toutefois, sa base a été atteinte par tous les sondages à la tarière. Nous pouvons donc en déduire quelques premières conclusions. L'argile limoneuse recouvre toutes les formations calcaires. Son épaisseur varie quel que soit le matériau sous-jacent. Elle est plus épaisse sur le versant exposé vers le Sud-Est que sur le versant plus "raide" exposé vers le Nord-Ouest. Elle

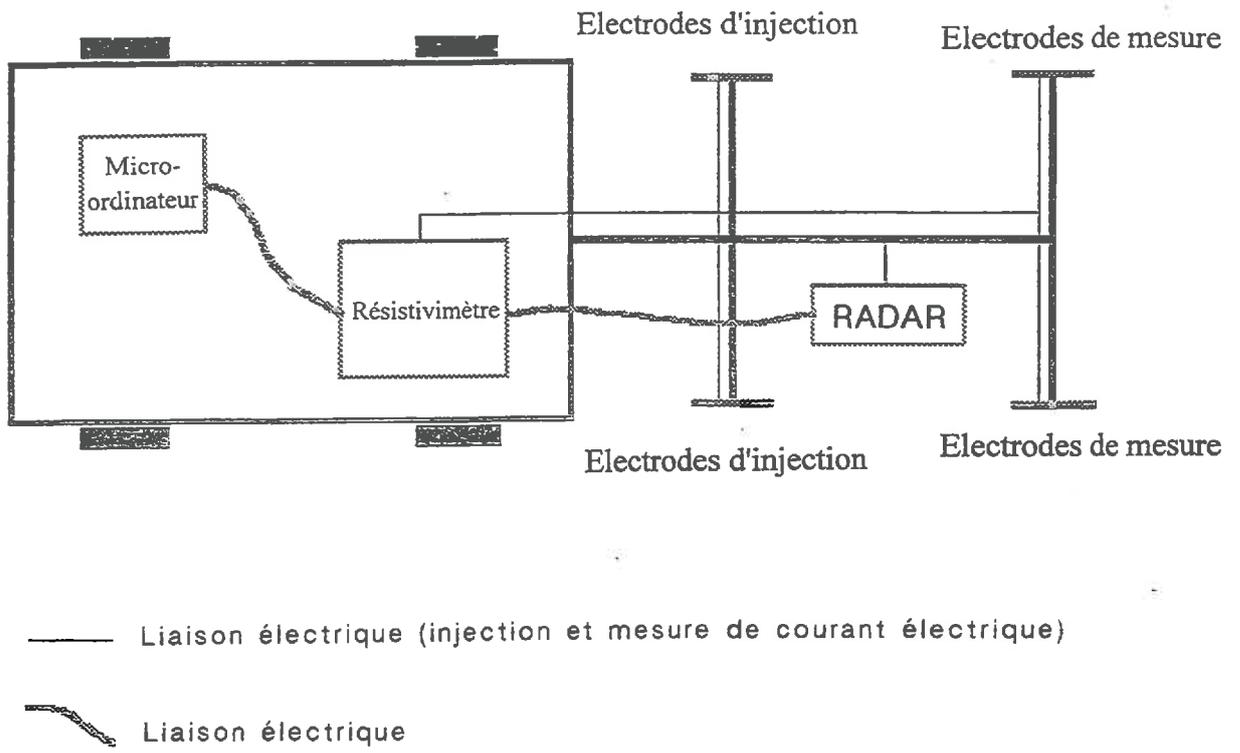


Figure 5.7 : Principaux éléments du dispositif RATEAU.

est quasi absente en fond de talweg montrant une absence du colluvionnement. Malgré des pentes très faibles, la dissymétrie de versant est nettement visible sur la figure 5.6.

En résumé, nous retiendrons que (1) le matériau calcaire est hétérogène verticalement et horizontalement ; (2) la stratigraphie est sub-horizontale ; (3) l'argile limoneuse recouvre l'ensemble des matériaux avec des épaisseurs variables ; (4) l'épaisseur de l'argile limoneuse n'est pas indépendante de la morphologie du relief. Du point de vue méthodologique, la résistivité électrique permet l'identification du toit calcaire (en place ou partiellement remanié), par contre elle ne permet pas de distinguer l'argile limoneuse, le matériau cryoturbé et le calcaire pulvérulent. Il ne sera donc pas possible d'obtenir directement une cartographie de l'épaisseur de l'argile limoneuse.

2.3 : Etude de la variabilité latérale par traînés électriques

Les sondages électriques permettent de déterminer les principaux matériaux et leur organisation le long d'un transect. L'objectif dans la suite de ce travail, est de confirmer les résultats en multipliant les mesures sur un plus grand nombre de transects. La mise en évidence d'une dissymétrie de versant nécessite une compréhension tridimensionnelle de la couverture pédologique. Nous limiterons l'étude à l'épaisseur de l'argile limoneuse.

La technique mise en oeuvre est une prospection électrique à l'aide de traînés électriques. Dans ce cas, l'écartement entre les électrodes est fixe et le déplacement du dispositif appelé RATEAU (Fig. 5.7) permet d'obtenir des "profils électriques" (Fig. 5.8), c'est-à-dire un tracé de la résistivité apparente en fonction de la distance parcourue. Ainsi, par les profils électriques, les variations latérales dans la structure du terrain sont mises en évidence.

2.3.1 : Méthode : description du dispositif RATEAU

Le sigle RATEAU signifie Résistivimètre Auto Tracté à Enregistrement AUtomatique. Ce dispositif est composé de quatre éléments (Fig. 5.7) :

- un quadripôle carré de 1 m de côté. Les deux électrodes d'injection sont à l'avant et les deux électrodes de mesure sont à l'arrière. Les électrodes sont constituées de roues munies de picots. Le quadripôle est tracté par un véhicule à faible vitesse,
- un résistivimètre RMCA4, qui envoie automatiquement des impulsions électriques au RATEAU, et effectue les mesures de résistance électrique ($\frac{\Delta V}{I}$),
- un ordinateur portable qui enregistre les valeurs de résistivité apparente (ρ_a) et trace à l'écran les profils électriques au fur et à mesure de l'acquisition,
- un radar Doppler qui déclenche par l'intermédiaire du résistivimètre l'acquisition d'une mesure tous les 10 cm parcourus.

Les sondages électriques exposés précédemment (Fig. 5.5a) font apparaître jusqu'à quatre couches pour 4 m de profondeur prospectée. Cependant, le signal obtenu sur les profils électriques grâce au RATEAU ne dépasse pas 1 m de prospection en profondeur. Le terrain d'étude peut donc être assimilé à un modèle à deux couches (modèle à deux terrains) car les troisième et quatrième couches détectées par sondage électrique n'apparaissent qu'au-delà d'une profondeur de 1,5 m. Ainsi, si nous considérons un modèle de terrain à deux couches, la résistivité apparente (ρ_a) pour le dispositif RATEAU peut être calculée par :

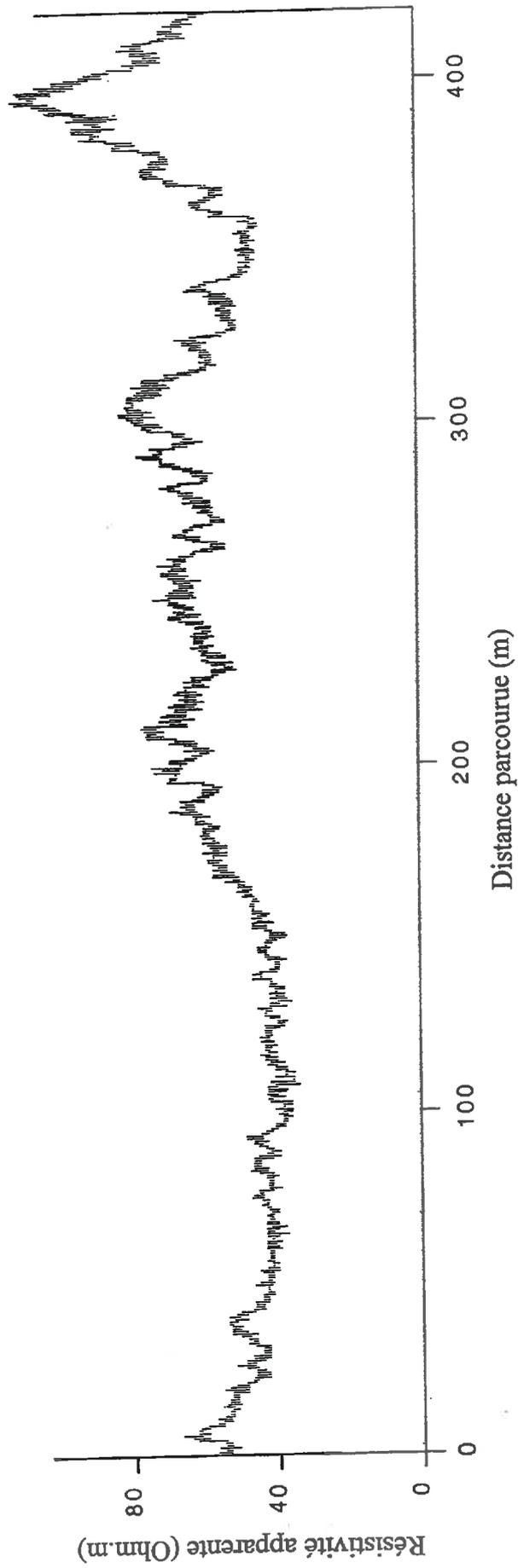


Figure 5.8 : Résistivité apparente en fonction de la distance parcourue : profil électrique.

$$\rho_a = \rho_1 \times \left[1 + \frac{4a}{2 - \sqrt{2}} \times \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ C^n \times \left(\frac{1}{\sqrt{a^2 + 4n^2 \times h^2}} - \frac{1}{\sqrt{2a^2 + 4n^2 \times h^2}} \right) \right\} \right],$$

avec $C = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$; ρ_1 et ρ_2 résistivités respectives des deux couches du modèle de terrain ; h est l'épaisseur de la première couche et $a = 1$ m, l'écartement entre les électrodes. Connaissant ρ_1 et ρ_2 grâce aux sondages électriques, nous pouvons inverser l'équation ci-dessus et obtenir h à partir de ρ_a .

2.3.2 : Résultat de la prospection par traînés électriques

La prospection par traînés électriques a permis la réalisation de 170 profils électriques. Pour éliminer les très hautes fréquences du signal, tout en conservant les variations rapides pouvant correspondre à des changements dans les matériaux du sol, un filtrage par la médiane (Tabbagh, 1988) est appliqué à l'ensemble des 170 profils. Ainsi, pour chaque profil électrique nous avons gardé une mesure tous les mètres. L'écartement entre profils a été fixé à 1 m. Compte tenu de la faible variabilité latérale observée, les impératifs techniques nous ont conduit à poursuivre les travaux avec un écartement de 5 m puis de 10 m. Les 170 profils après filtrage correspondent à un échantillon de 51294 individus pour une parcelle de 20 hectares. Les résistivités varient entre 21 et 95 Ω .m.

Pour obtenir une carte des résistivités apparentes, une analyse variographique (Fig. 5.9) puis un krigeage ordinaire aux noeuds d'une grille de 25 m² de résolution ont été réalisés.

Les résultats montrent que les zones de plus faibles résistivités sont sur le plateau et le versant exposé vers le Sud-Est (Fig. 5.10). La présence d'une même zone faiblement résistive sur le versant exposé au Nord-Ouest se marque par un liseré de faible extension. Le fond de talweg est fortement résistif.

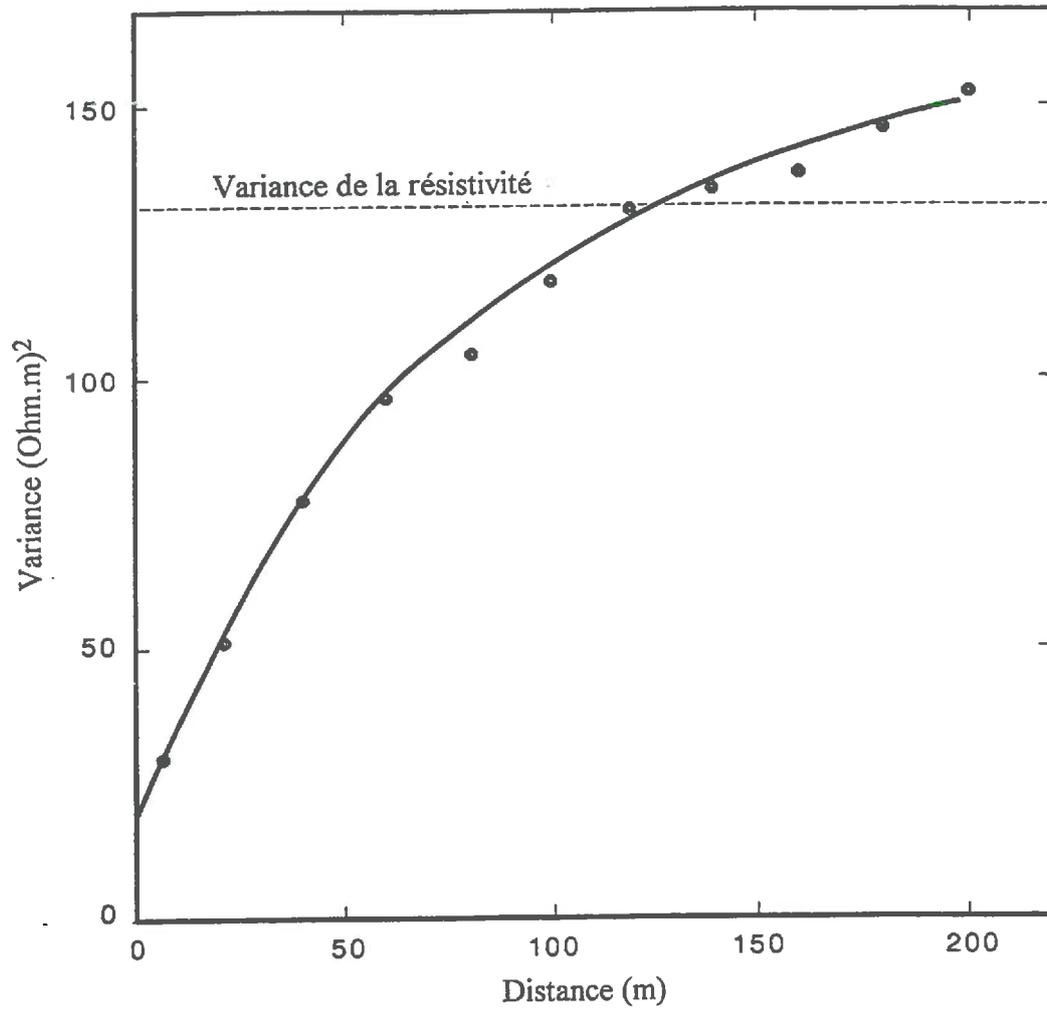
Tous ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus à partir des sondages électriques. Par contre, nous constatons des structures nouvelles, très linéaires d'orientation Nord-Ouest Sud-Est. Ces structures correspondent à d'anciennes limites de parcelles où l'argile limoneuse se trouve accumulée.

2.3.3 : Cartographie de la profondeur d'apparition du toit calcaire

La connaissance de la résistivité des matériaux grâce aux sondages électriques permet d'exprimer les résistivités apparentes obtenues à l'aide du RATEAU en terme de "profondeur d'apparition du toit du calcaire dur".

Les résistivités électriques réelles des matériaux meubles et des matériaux compacts sont respectivement de 28 et 95 Ω .m en moyenne, et l'écartement des électrodes est de un mètre. En faisant varier h de 0 à 120 cm avec un incrément de 1 cm, nous obtenons ainsi autant de valeurs de ρ_a que l'on a de valeurs de h (120 valeurs).

Le tableau 5.2 montre les variations de la résistivité apparente ρ_a pour des classes fixées de l'épaisseur de la première couche (h).



Structure gignone :

Effet de pépite : 19 (Ohm.m)²

Première structure : modèle sphérique

Deuxième structure : modèle exponentiel

- portée (a) : 69,43 m

- portée (a) : 103,58 m

- palier (c) : 23,52 (Ohm.m)²

- palier (c) : 126,66 (Ohm.m)²

Figure 5.9 : Variogramme de la résistivité apparente.

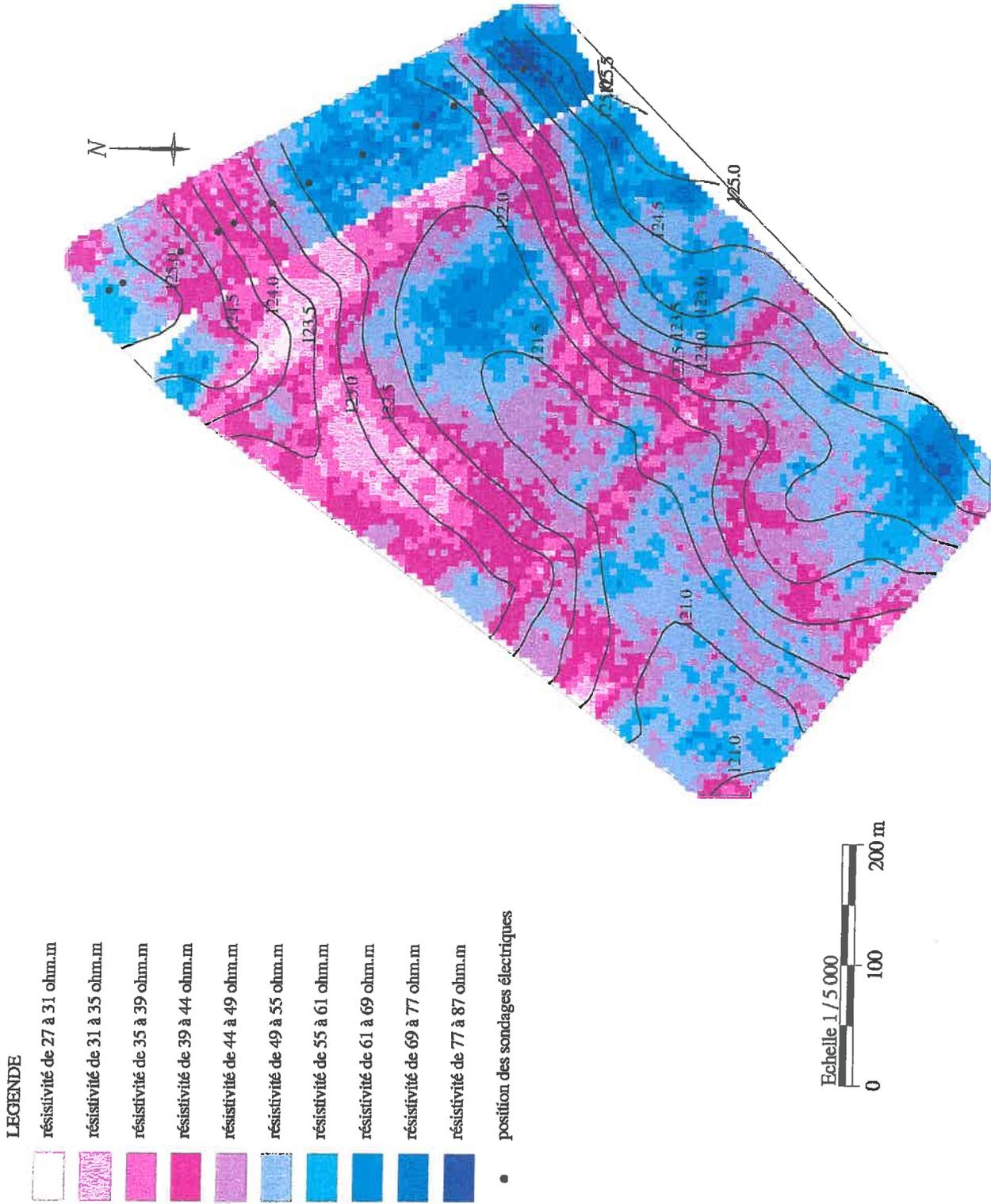


Figure 5.10 : Carte des résistivités apparentes estimées par krigeage ordinaire et courbes d'isoaltitudes issues d'un Modèle Numérique de Terrain.

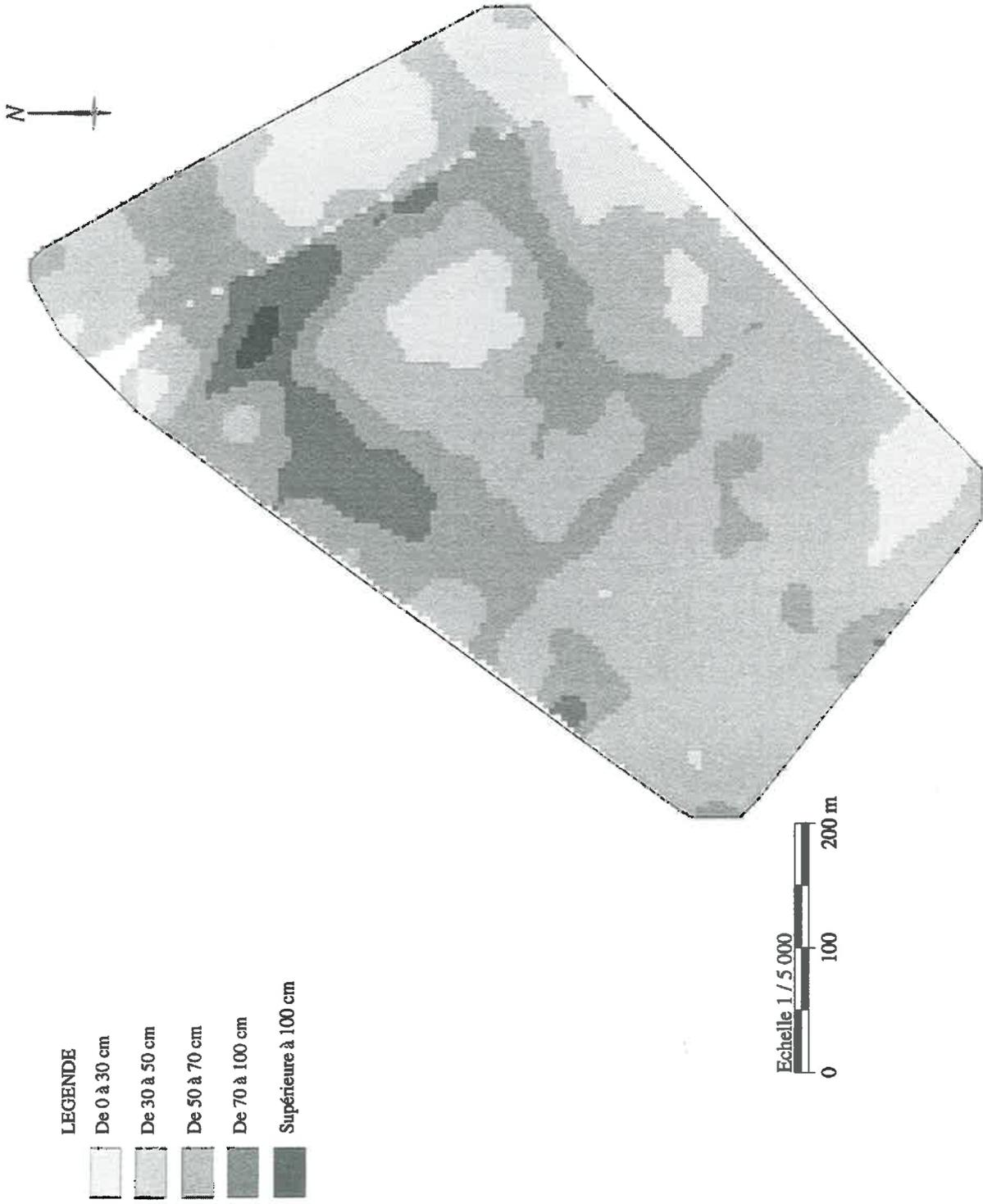


Figure 5.11 : Carte de la profondeur d'apparition du toit calcaire.

L'inversion du modèle permet ainsi d'exprimer la carte des résistivités apparentes sous forme de carte de profondeur d'apparition du toit calcaire (Fig. 5.11). Cette dernière indique la variabilité de l'épaisseur des matériaux meubles. Cependant, nous ne distinguons pas l'argile limoneuse du reste des matériaux meubles, bien que nous sachions que cet horizon est toujours présent dès la surface. Autrement dit, c'est l'épaisseur de l'argile limoneuse supérieure qui risque d'être surestimée par l'approche géophysique dans le contexte de cette étude. Toutefois, il faut signaler que les calcaires pulvérulents, s'ils possèdent de mauvaises qualités agronomiques en raison notamment de leur teneur élevée en carbonate de calcium, jouent par contre un rôle important dans la rétention et le transfert d'eau et de soluté. De plus, ils ne constituent pas un obstacle aux racines (Nicoullaud *et al.*, 1995). La prospection électrique est donc d'un intérêt premier pour l'évaluation des ressources en eau à l'échelle du parcellaire agricole.

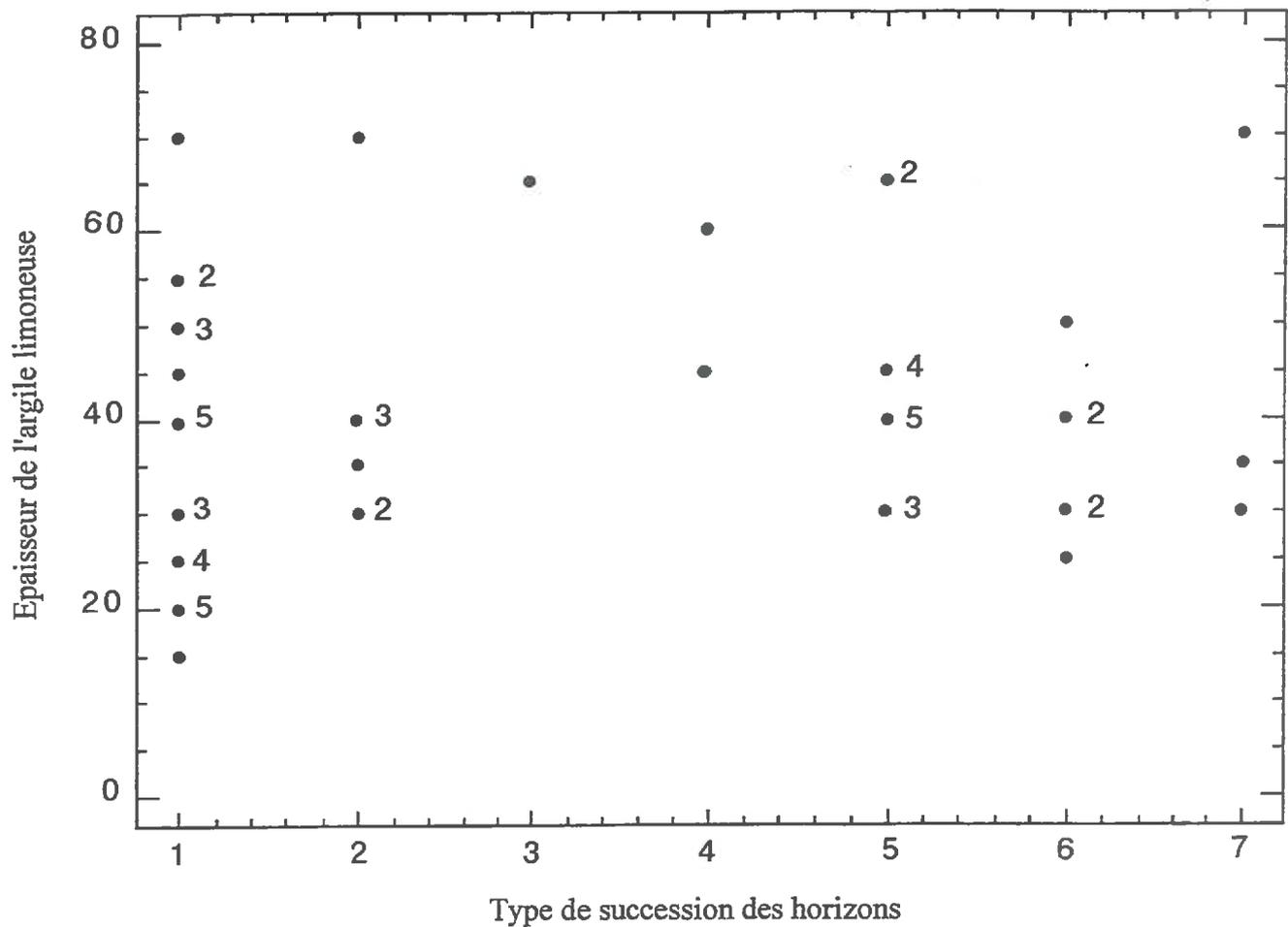
Tableau 5.2 : Variation de la résistivité apparente au sein de chaque classe de l'épaisseur de la première couche.

<i>Variation de la résistivité apparente ($\Omega.m$)</i>	<i>Classes d'épaisseur de la première couche (cm)</i>
30 - 32,5	100 - 120
32,5 - 37,4	70 - 100
37,4 - 44,3	50 - 70
44,3 - 57,4	30 - 50
57,4 - 95	0 - 30

2.4 : Validation de l'approche géophysique

Une prospection pédologique à la tarière a été réalisée sur la parcelle de 20 ha dans le but de valider la carte de profondeur d'apparition du toit calcaire. Cette prospection a permis la réalisation de 58 sondages pédologiques. Pour chaque sondage, nous avons mesuré la profondeur d'apparition du toit du calcaire dur quand celui-ci se trouve à moins de 120 cm de profondeur. La carte de profondeur d'apparition du toit calcaire (Fig. 5.11) a permis d'informer chaque sondage de la classe de profondeur d'apparition du toit calcaire estimée par l'approche géophysique. Pour la comparaison des deux types de mesures, nous retiendrons uniquement les sondages pédologiques (44 sondages) réalisés jusqu'à 1 m de profondeur, étant donné que le dispositif RATEAU utilisé dans cette étude ne va pas au-delà de cette profondeur d'investigation.

Le tableau 5.3 montre que l'approche géophysique estime bien la classe de profondeur d'apparition du toit calcaire (*PATC*) dans 39 % des cas. Pour les autres observations, nous remarquons un décalage entre les deux approches : (1) d'une classe chez 25 observations (57 %) ; (2) de deux classes chez 2 observations (4 %). Les plus forts écarts apparaissent en profondeur. La charge en cailloux, variable au sein d'un même horizon est certainement à l'origine des erreurs. D'une part, elle intervient dans le signal sans que l'on sache quantifier son effet, et d'autre part elle est à l'origine d'erreurs d'interprétation pour estimer l'apparition du toit calcaire à la tarière.



Code	Type de succession des horizons
1	<i>AL - K</i>
2	<i>AL - CP</i>
3	<i>AL - MC</i>
4	<i>AL - MC - CP</i>
5	<i>AL - MC - K</i>
6	<i>AL - CP - K</i>
7	<i>AL - MC - CP - K</i>

Les chiffres au sein du graphique désignent le nombre d'observations superposées

Figure 5.12a : Variation de l'épaisseur de l'argile limoneuse au sein des 58 sondages pédologiques suivant le type de succession des horizons.

Tableau 5.3 : Comparaison des profondeurs d'apparition du toit calcaire (*PATC*) selon la prospection pédologique et la prospection géophysique.

<i>Classe de PATC selon la prospection pédologique</i>	<i>0 - 30</i>	<i>30 - 50</i>	<i>50 - 70</i>	<i>70 - 100</i>
<i>Classe de PATC selon la prospection géophysique</i>				
<i>00 - 30</i>	08	04		
<i>30 - 50</i>	05	07	03	02
<i>50 - 70</i>		03	01	09
<i>70 - 100</i>			01	01

Nous pouvons ainsi dire que globalement l'approche géophysique estime de manière satisfaisante la profondeur d'apparition du toit calcaire pour les faibles épaisseurs mais qu'une profondeur d'investigation de 1 m reste insuffisante pour déterminer la profondeur d'apparition du toit calcaire. L'utilisation d'un appareillage à multi-écartement serait nécessaire ainsi qu'une prise en compte de la charge en cailloux dans la modélisation du signal.

2.5 : Etude de la variation de l'épaisseur du sol en fonction de la succession des matériaux

A partir des 58 sondages pédologiques à la tarière, nous avons pu estimer l'épaisseur de l'argile limoneuse supérieure et identifier les matériaux sous-jacents à l'argile limoneuse (Tab. 5.4). Une typologie simplifiée des successions des horizons a été élaborée à partir des 58 sondages de façon similaire à celle utilisée pour l'analyse des fosses (*cf. paragraphe 1.2*). Ainsi, nous avons distingué :

1. de l'argile limoneuse sur des calcaires durs directement (*AL-K*),
2. de l'argile limoneuse sur des calcaires pulvérulents (*AL-CP*),
3. de l'argile limoneuse sur des matériaux cryoturbés (*AL-MC*),
4. de l'argile limoneuse sur des matériaux cryoturbés puis des calcaires pulvérulents (*AL-MC-CP*),
5. de l'argile limoneuse sur des matériaux cryoturbés puis des calcaires durs (*AL-MC-K*),
6. de l'argile limoneuse sur des calcaires pulvérulents puis des calcaires durs (*AL-CP-K*),
7. de l'argile limoneuse sur des matériaux cryoturbés, des calcaires pulvérulents puis des calcaires durs (*AL-MC-CP-K*).

Les figures 5.12a et 5.12b montrent qu'il n'existe pas de relations entre l'épaisseur de l'argile limoneuse et les différentes successions de matériaux possibles. La comparaison multiple des moyennes des épaisseurs pour chaque type de succession d'horizons (Fig. 5.12c test de Tukey) confirme qu'il n'existe pas de différences significatives entre les différentes moyennes.

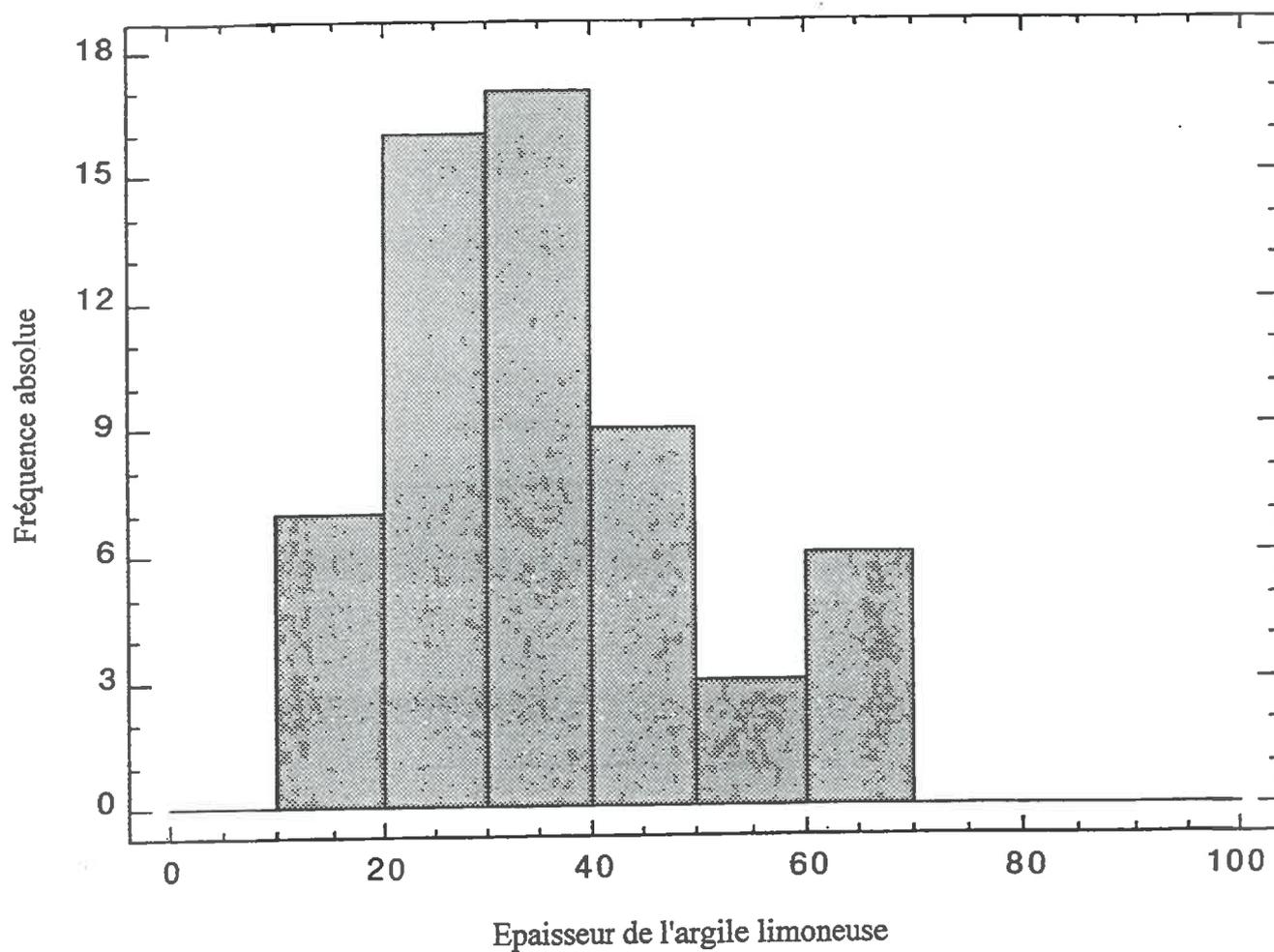
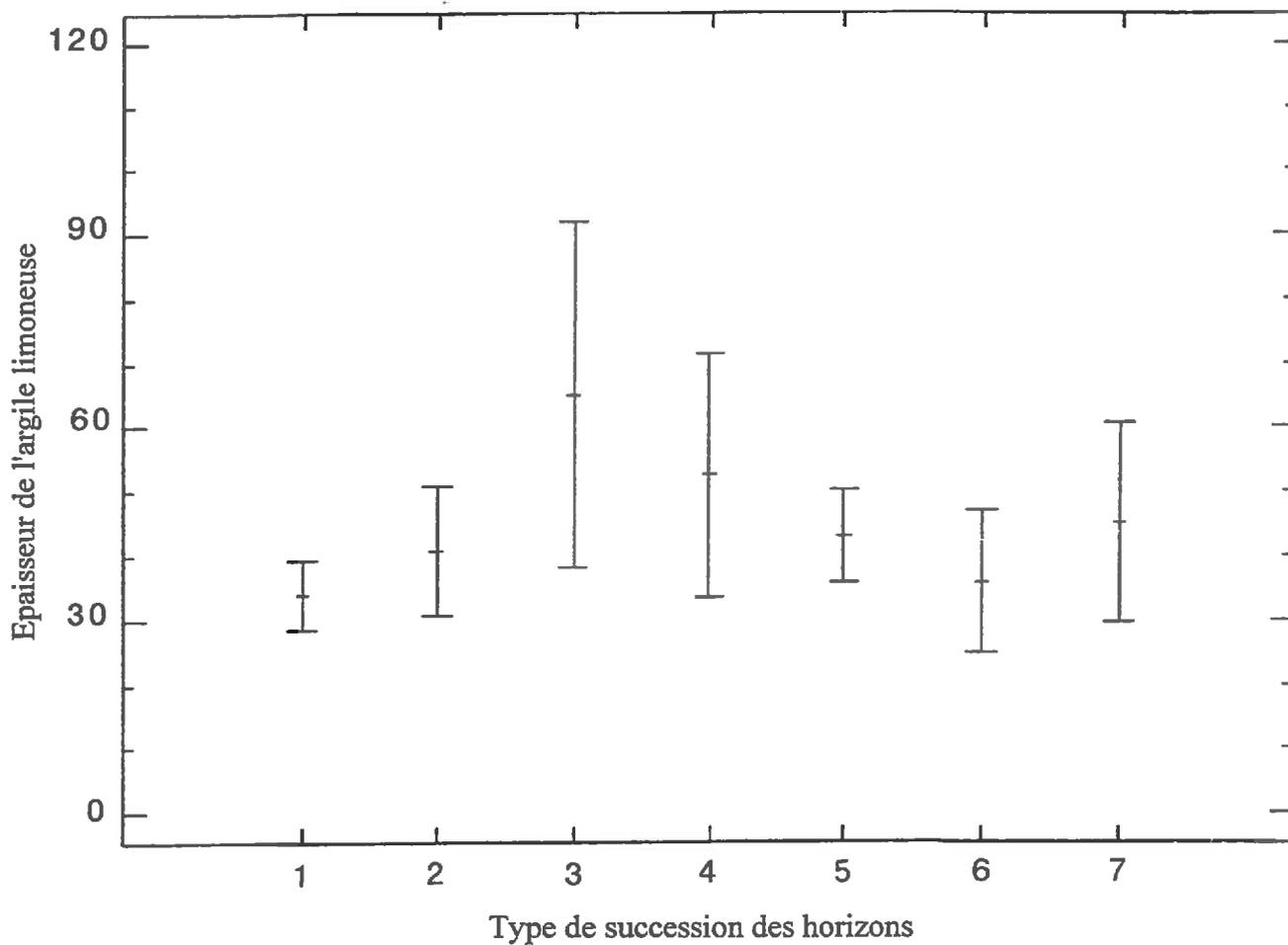


Figure 5.12b : Histogramme de l'épaisseur de l'argile limoneuse au sein des 58 sondages pédologiques.



Code	Type de succession des horizons
1	<i>AL - K</i>
2	<i>AL - CP</i>
3	<i>AL - MC</i>
4	<i>AL - MC - CP</i>
5	<i>AL - MC - K</i>
6	<i>AL - CP - K</i>
7	<i>AL - MC - CP - K</i>

Figure 5.12c : Comparaison multiple des moyennes (Test de Tukey).

Tableau 5.4 : Epaisseur de l'argile limoneuse et type de matériau sous-jacent rencontré déterminés à partir de sondages pédologiques.

Sondage	EPAL	Matériau	Sondage	EPAL	Matériau	Sondage	EPAL	Matériau
32	60	MC100 / CP120	65	65	MC80	44	25	K
33	40	MC70	70	45	MC110	45	20	K
35	30	CP120	71	35	CP120	48	15	K
39	40	MC80	73	40	MC70	51	30	K
40	70	CP120	74	45	MC90	53	70	K
41	40	CP120	75	45	MC100	57	25	K
42	50	CP90	78	30	CP120	59	40	K
46	30	MC45	79	40	CP120	66	20	K
47	40	CP90	82	35	MC40 / CP105	67	40	K
52	45	MC70 / CP120	83	40	MC80	68	20	K
54	40	CP120	85	45	MC105	69	20	K
55	40	MC80	88	40	CP50	72	30	K
56	65	MC120	89	30	MC80	76	50	K
58	30	CP45	90	30	CP35	77	40	K
60	30	MC40 / CP105	31	50	K	80	55	K
61	70	MC100 / CP110	34	30	K	81	55	K
62	30	MC80	36	20	K	84	40	K
63	65	MC75	37	40	K	86	50	K
64	25	CP100	38	45	K	87	25	K
			43	25	K			

EPAL = Epaisseur de l'argile limoneuse mesurée. K = calcaire dur. MC = matériau cryoturbé. CP = calcaire pulvérulent.

Pour le sondage 52 par exemple, EPAL = 45 cm et l'écriture MC70 / CP120 veut dire que le matériau cryoturbé (MC) va de 45 cm à 70 cm de profondeur puis on a le calcaire pulvérulent (CP) jusqu'à 120 cm de profondeur (de 70 cm à 120 cm de profondeur).

Conclusions du chapitre V

L'analyse de la variabilité spatiale de l'ensemble argilo-limoneux selon le facteur pédogénétique "matériau" montre que l'épaisseur de cet ensemble n'est pas liée au type de matériau immédiatement sous-jacent. Ceci laisse supposer que d'un point de vue pédogénétique, l'argile limoneuse supérieure serait remaniée ou proviendrait d'un matériau remanié puis décarbonaté. Autrement dit, elle ne serait pas strictement autochtone. Cette hypothèse est à prendre avec précaution car des phénomènes de remaniement par cryoturbation et de redistribution ont pu intervenir sur de courtes distances.

D'un point de vue méthodologique la résistivité électrique par traînés électriques constitue un outil très efficace pour la cartographie du toit calcaire. Cependant, un appareillage plus adapté est nécessaire pour pouvoir distinguer les différents matériaux meubles sus-jacents au calcaire dur en place ou faiblement remanié.

La dissymétrie de versant constatée lors de l'étude réalisée sur la parcelle de 20 hectares, nous oriente vers la réalisation d'une analyse de la distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux et des matériaux qui lui sont sous-jacents en fonction des attributs morphologiques du relief.

Introduction

Dans le chapitre I, nous avons rappelé l'importance de la morphologie du relief dans l'étude de la variabilité des sols. Dans la suite de notre étude, nous privilégions ce facteur non seulement pour le caractère déterminant qu'il a sur la pédogenèse mais également parce qu'il constitue une source d'information aisément accessible. Cette place privilégiée accordée au relief nécessite une présentation détaillée des techniques d'acquisition et de modélisation de celui-ci. Ces techniques ne sont pas spécifiques de la zone d'étude et le développement des procédures automatisées a déjà servi pour d'autres terrains de recherches.

La morphologie de la surface du sol est perçue comme variant de façon continue. Cette variation peut être représentée par des lignes d'isoaltitudes. Bien que les lignes d'isovaleurs soient satisfaisantes pour montrer la variation de la surface, elles ne le sont pas pour des analyses numériques. Ainsi, des méthodes ont été développées afin de modéliser la variation continue d'une composante du paysage (souvent l'altitude).

Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) constituent l'une des méthodes la plus utilisée actuellement. Il s'agit d'une représentation numérique de la variation continue du relief la plus connue. Le MNT est une représentation numérique du relief sous forme d'un champ d'altitudes connues en chaque noeud d'un maillage régulier, généralement à mailles carrées (Burrough, 1986 ; Zevenbergen *et al.*, 1987 ; Moore *et al.*, 1991).

Les données de base servant au calcul du MNT peuvent être : (1) un couple stéréoscopique de photographies aériennes ou d'images satellitaires ; (2) une carte en courbes de niveaux ; (3) un semis de points obtenus par levé topographique. Il existe des MNT fournis de façon normalisée au près de l'IGN. Ils sont eux-mêmes réalisés à partir des algorithmes suscités. Malheureusement, leur précision est insuffisante pour rendre compte de la variation du relief en des zones aussi faiblement ondulées que la Petite Beauce.

La constitution d'un MNT selon la méthode (1) a été tentée à l'aide d'images stéréoscopiques de simulation SPOT5. Elle n'a pas abouti du fait de la résolution trop faible de ce type de capteur pour cette région.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus grâce à deux autres méthodes. Deux MNT ont ainsi été élaborés : (1) à partir d'un levé topographique ; (2) à partir des courbes de niveaux d'une carte topographique IGN au 1/25.000. Nous poursuivons ensuite par le calcul des attributs dérivés de l'altitude : pente, orientation, convexités des pentes, direction et accumulation des flux. Nous indiquons enfin les différentes caractéristiques du relief de la zone d'étude, sans aborder ses relations avec l'ensemble argilo-limoneux et les principaux matériaux inventoriés. Ces relations feront l'objet du chapitre suivant.

La comparaison entre les deux méthodes sera brièvement commentée. Cette comparaison sera approfondie au chapitre X de façon à examiner la robustesse des relations sol-morphologie du terrain selon la précision et la résolution des MNT établis.

Dans la suite de ce chapitre, nous préférons parler de Modèle Numérique d'Altitude (MNA) au lieu de Modèle Numérique de Terrain (MNT). Nous pensons que cette appellation est plus claire. Le "terrain" peut représenter l'altitude mais aussi la pente ou les formes du relief telles que les convexités de la pente.

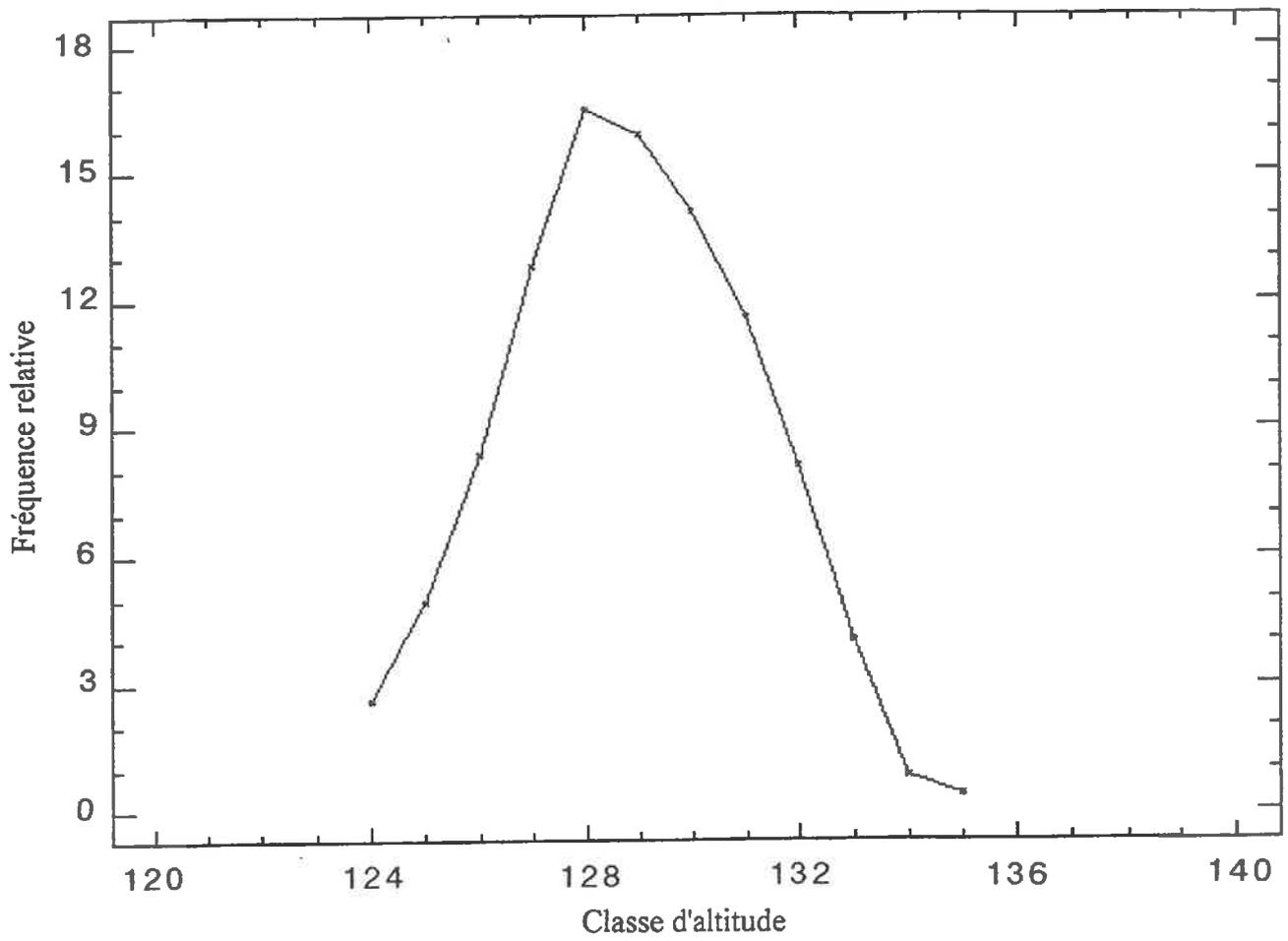


Figure 6.1 : Fréquences relatives des classes d'altitude mesurée.

1. Modèle Numérique d'Altitude et attributs morphologiques dérivés sur le secteur de la simulation SPOT

1.1 : Présentation des mesures d'altimétrie

Dans le cadre de ce travail, la réalisation du MNA sur le secteur de la simulation SPOT, qui s'étend sur une surface de 1600 ha (cf. Fig. 2.1, cf. chapitre II), a été faite à partir d'un levé topographique de 9898 points mesurés sur le terrain à l'aide d'un théodolite (Tab. 6.1). Pour chaque point, nous avons ses coordonnées géographiques (X, Y) et son altitude (Z).

Tableau 6.1 : Statistiques sommaires sur la variable altitude mesurée.

	<i>Effectif</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>	<i>coef.d'asymétrie (g_1)</i>
<i>Altitude Z (m)</i>	9898	123	137	129	2	38×10^{-5}

L'altitude mesurée sur le secteur varie très peu, en effet l'amplitude est de 14 m. La distribution des altitudes mesurées (Fig. 6.1) peut être assimilée à une distribution normale. Ceci est confirmée par le coefficient d'asymétrie ($g_1 = 38 \times 10^{-5}$) qui n'est pas significativement différent de zéro.

1.2 : Estimation de l'altitude aux noeuds d'une grille d'interpolation

A partir de l'ensemble des mesures, les variogrammes directionnels n'ont pas décelé d'anisotropie pour la variable altitude. Ainsi, nous allons supposer l'isotropie de la variable lors du krigeage.

Le variogramme expérimental moyen de l'altitude a été estimé pour un pas de 30 m (Fig. 6.2). Ce variogramme est ajusté par une structure gigogne (un modèle gaussien plus un modèle sphérique). Les coefficients des fonctions des variogrammes théoriques sont présentés dans le tableau 6.2.

Pour vérifier la validité des variogrammes ajustés au variogramme expérimental, la procédure de validation croisée (cf. chapitre IX) est appliquée aux données initiales (altitudes mesurées). Nous calculons ainsi, l'erreur moyenne définie par :

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z^*(x_i) - z(x_i)], \quad (1)$$

qui devrait être proche de zéro, et le rapport de l'erreur quadratique moyenne par la variance du krigeage

$$s_R^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ [z^*(x_i) - z(x_i)] / \sigma_k(x_i) \right\}^2, \quad (2)$$

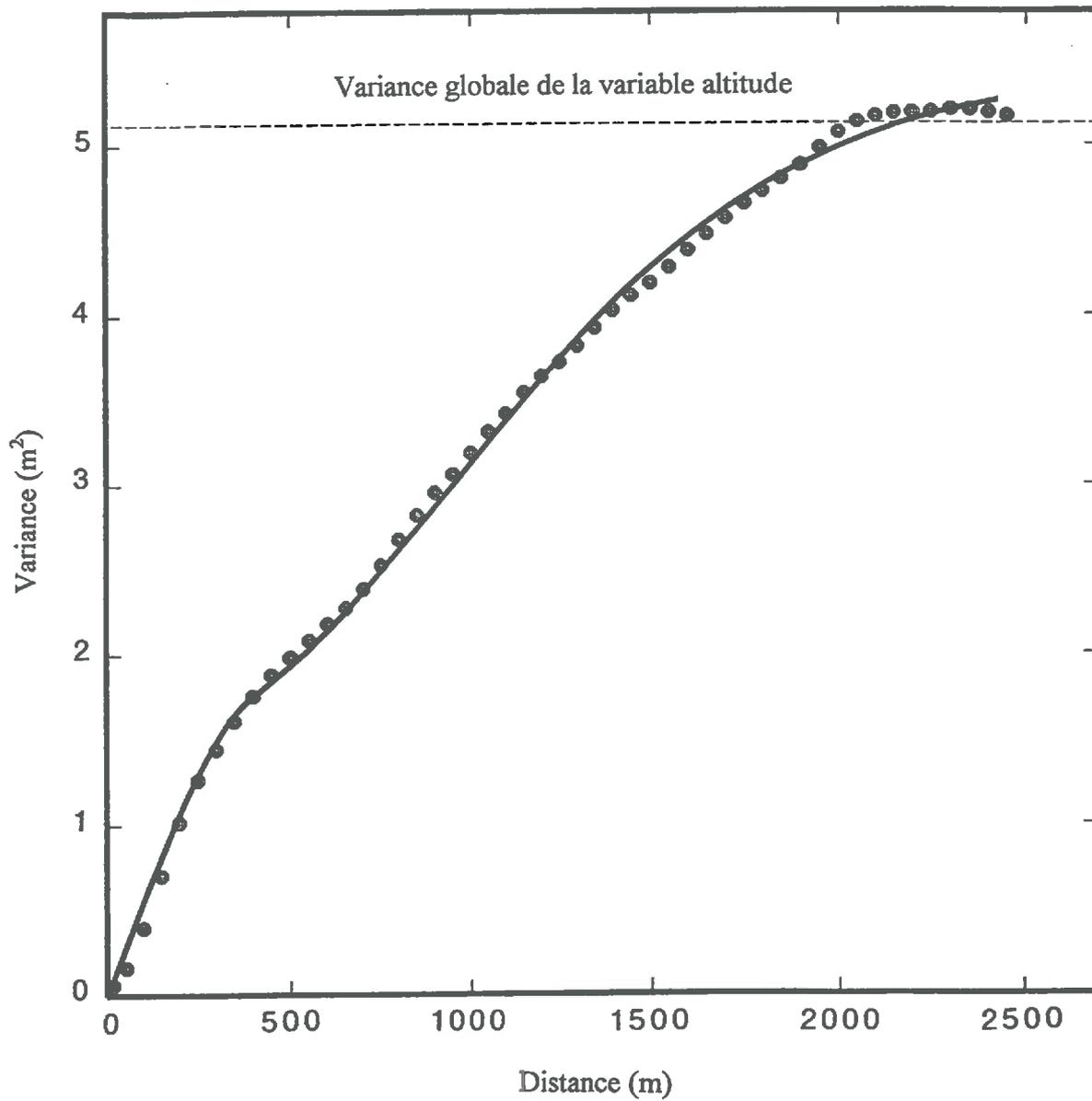


Figure 6.2 : Variogrammes expérimental et théoriques de la variable altitude.

qui devrait être proche de l'unité. Les résultats de ces calculs en voisinage glissant (Fig. 6.3) montrent que R (égale à 0,01) est proche de zéro et s_R^2 (égale à 0,84) est proche de 1. Ainsi, nous pouvons conclure que les options choisies et les hypothèses supposées sont correctes.

Tableau 6.2 : Coefficients des fonctions des variogrammes théoriques.

Modèle gaussien portée (a) palier (c ₂)	1335,6 m 4,0 m ²
Modèle sphérique portée (a) palier (c ₂)	400,6 m 1,4 m ²

En utilisant le système d'équations du krigeage et les variogrammes théoriques, l'altitude est estimée (krigée) tous les 20 mètres en voisinage glissant avec les paramètres suivants : (1) nombre de secteur angulaire 8 ; (2) distance maximale suivant les deux axes 150 m ; (3) nombre de points à considérer : minimum 2 et un optimum de 10. La figure 6.4 montre le résultat de cette interpolation après filtrage, c'est-à-dire le Modèle Numérique d'Altitude (MNA). La première ligne du tableau 6.3 résume les statistiques concernant le MNA. En comparant avec le tableau 6.1, nous remarquons que les minima, les maxima, les moyennes et les écart-types des valeurs mesurées et des valeurs estimées de l'altitude sont pratiquement identiques. Ceci est encore traduit par la grande similitude entre la distribution des fréquences des altitudes mesurées et la distribution des fréquences des altitudes estimées (Fig. 6.1 et Fig. 6.5).

Tableau 6.3 : Statistiques sommaires sur la variable altitude estimée par krigeage (MNA) et les différents attributs morphologiques dérivés du MNA.

	<i>Effectif</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>
<i>Altitude estimée Z* (m)</i>	43101	123,8	137,4	129,6	2,2
<i>Intensité de la pente (β %)</i>	43101	0,001	3,2	0,9	0,5
<i>Orientation de la pente (φ °)</i>	43101	0,000	360	164	93,8
<i>Convexité transversale (m⁻¹)</i>	43101	-0,135	0,119	0,000	0,016
<i>Convexité verticale (m⁻¹)</i>	43101	-0,103	0,101	0,000	0,011
<i>Convexité horizontale (m⁻¹)</i>	43101	-0,060	0,063	0,000	0,009

Le MNA (Fig. 6.4) est introduit au sein du Système d'Information Géographique (SIG) Arc/Info afin de calculer un certain nombre d'attributs du relief.

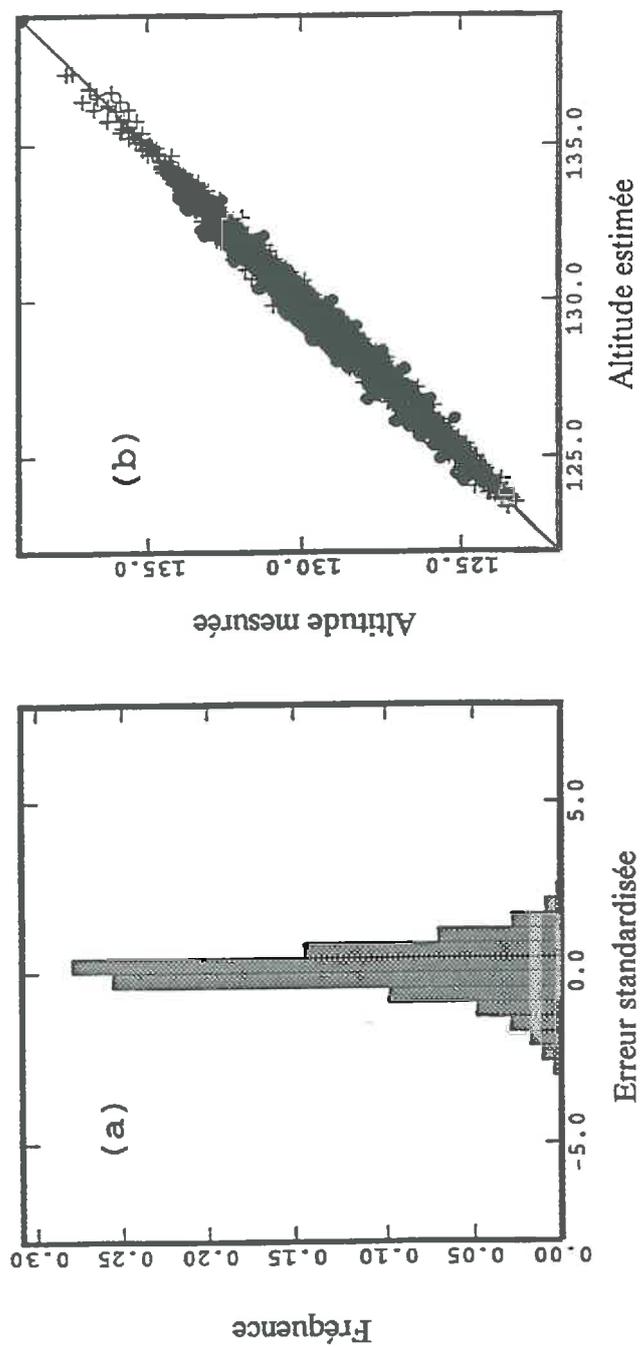


Figure 6.3 : (a) Histogramme des erreurs standardisées. (b) Diagramme de dispersion des altitudes mesurées en fonction des altitudes estimées.

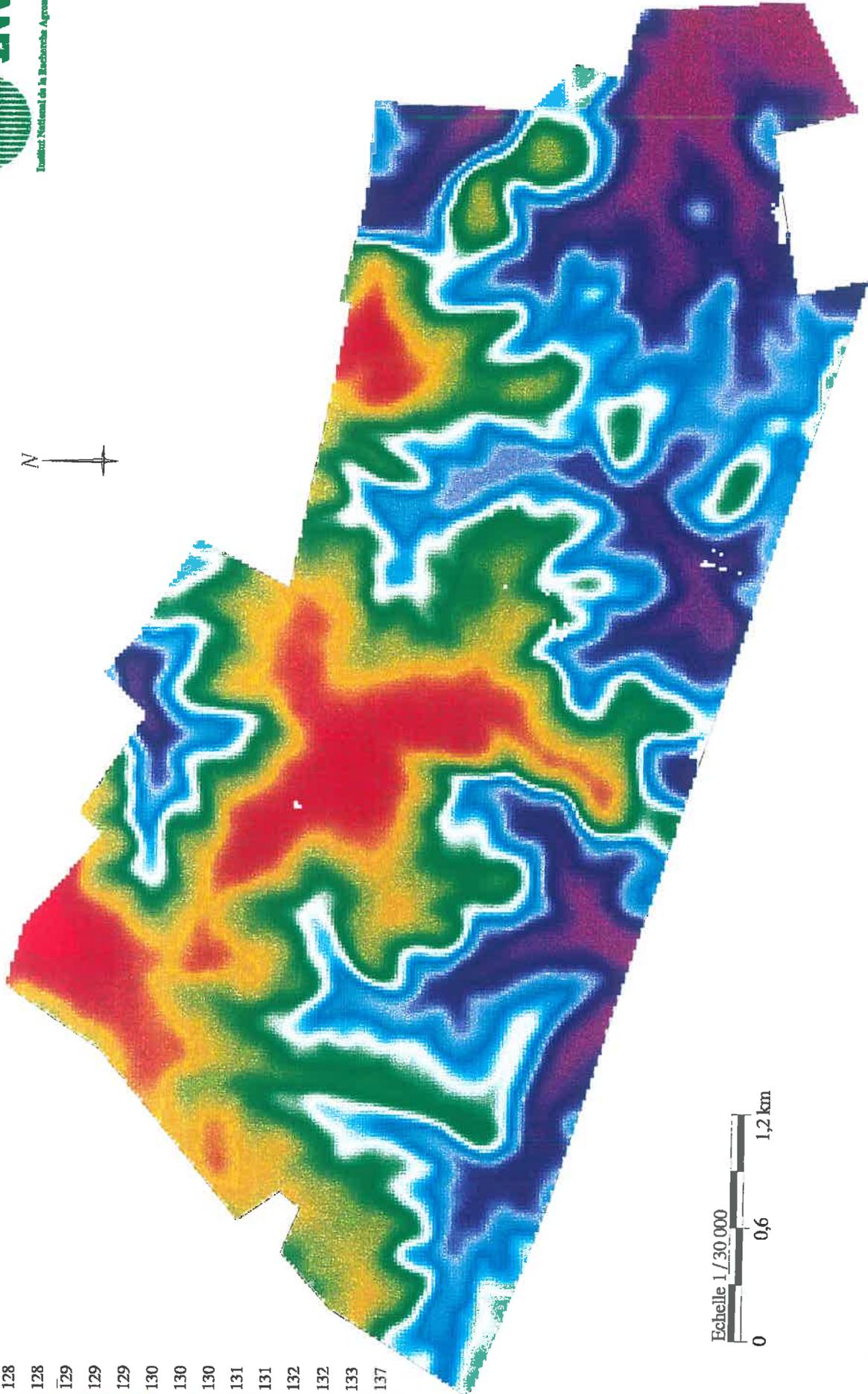
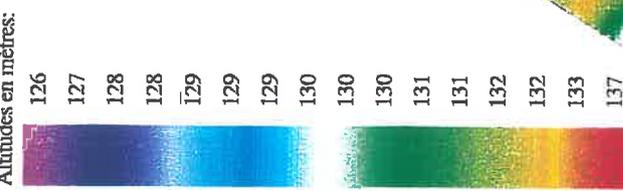


Figure 6.4 : Modèle Numérique d'Altitude (MNA) estimé par krigeage à partir d'un levé topographique sur le secteur de la simulation SPOT.

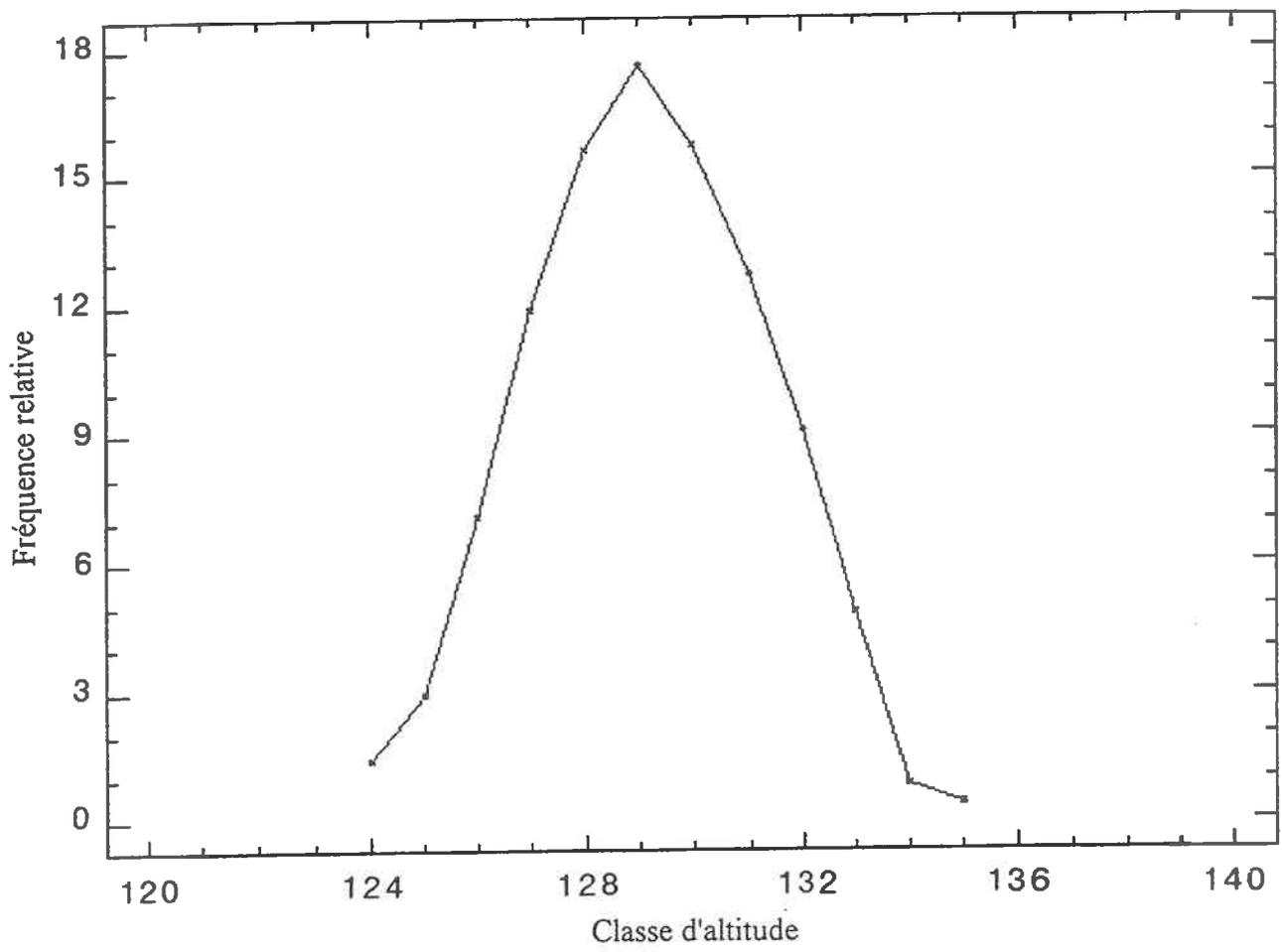


Figure 6.5 : Fréquences relatives des classes d'altitude estimée.

1.3 : Calcul des attributs morphologiques à partir du MNA

Les attributs morphologiques peuvent être divisés en deux catégories :

- les attributs primaires, calculés directement à partir du MNA et qui comprennent des variables telles que l'intensité de la pente, l'orientation et les convexités de la pente, les directions des écoulements, les accumulations des écoulements, les longueurs des trajectoires des écoulements, l'aire de drainage, etc.,
- les attributs secondaires ou attributs composés, obtenus par combinaison des attributs primaires et qui peuvent être utilisés pour caractériser des processus spécifiques qui ont lieu dans le paysage. Les attributs secondaires peuvent être obtenus empiriquement ou par simplification d'équation décrivant les processus physiques sous-jacents.

A travers l'exemple suivant, nous décrivons la méthode pour calculer les attributs topographiques primaires à partir d'un MNA.

soit

$$\begin{array}{ccc}
 Z_1 & Z_2 & Z_3 \\
 \bullet & \bullet & \bullet \\
 Z_4 & Z_5 & Z_6 \\
 \bullet & \bullet & \bullet \\
 Z_7 & Z_8 & Z_9 \\
 \bullet & \bullet & \bullet
 \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{ccc} Z_1 & Z_2 & Z_3 \\ Z_4 & Z_5 & Z_6 \\ Z_7 & Z_8 & Z_9 \end{array}} \right\} \lambda$$

où Z_1 à Z_9 représentent les altitudes aux noeuds du MNA.

Soient x et y les directions orthogonales dans le plan horizontal, et λ l'espacement entre les noeuds de la grille du MNA. Pour calculer des attributs primaires en Z_5 , nous calculons les dérivés partielles suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 f_x = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{Z_6 - Z_4}{2\lambda} \\
 f_y = \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{Z_2 - Z_8}{2\lambda} \\
 f_{xy} = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9}{4\lambda^2} \\
 f_{xx} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{Z_4 + Z_6 - 2Z_5}{\lambda^2} \\
 f_{yy} = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{Z_2 + Z_8 - 2Z_5}{\lambda^2}
 \end{array} \right. \quad (3)$$

On pose $p = f_x^2 + f_y^2$ et $q = p + 1$

Pentes en pourcentages:

0.4
0.5
0.7
0.8
1.0
1.1
1.4
3.2

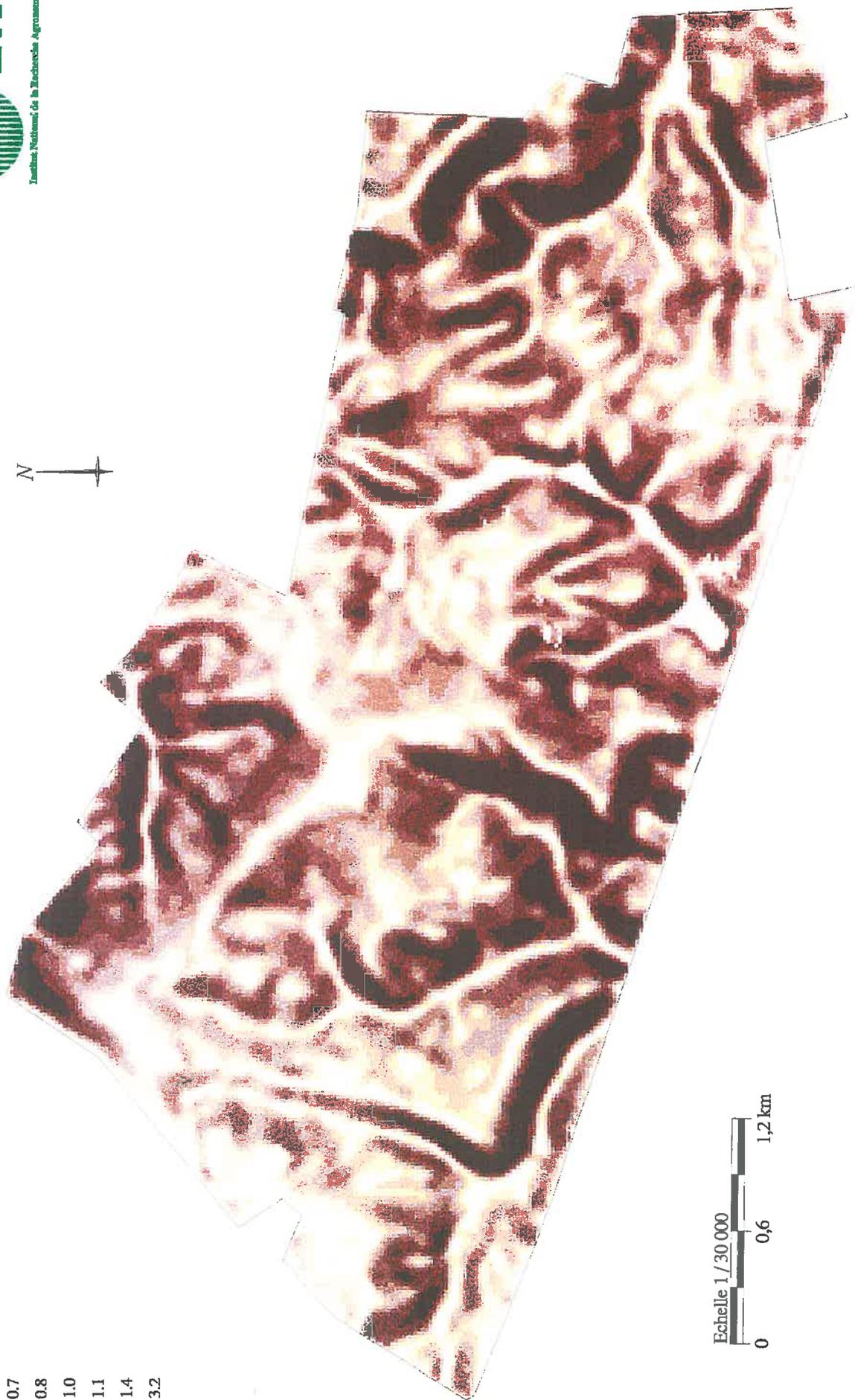


Figure 6.6 : Modèle Numérique des intensités de la Pente (MNP) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

Ainsi, l'intensité de la pente β (en degrés), l'orientation de la pente φ (mesurée en degrés dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord), et la convexité de la surface ρ (m^{-1}) pour une direction quelconque ϕ peuvent être calculées à partir des relations suivantes :

$$\beta = \arctan(p^{1/2}), \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{-f_y}{-f_x}\right), \quad (5)$$

$$\rho = 2(f_{xx} \cos^2 \phi + f_{yy} \sin^2 \phi + f_{xy} \cos \phi \sin \phi). \quad (6)$$

Cependant, les deux principales convexités de la pente du point de vue des applications hydrologique et géomorphologique sont : (1) la convexité verticale $\rho(r)$ qui donne la convexité de la surface dans la direction de la pente maximale, (2) la convexité horizontale $\rho(l)$ qui donne la convexité de la surface perpendiculairement à la direction de la plus grande pente.

Ces deux quantités sont obtenues à partir des expressions suivantes :

$$\rho(r) = \frac{f_{xx}f_x^2 + 2f_{xy}f_xf_y + f_yf_y^2}{pq^{3/2}}, \quad (7)$$

$$\rho(l) = \frac{f_{xx}f_x^2 - 2f_{xy}f_xf_y + f_yf_x^2}{p^{3/2}}. \quad (8)$$

Greenlee (1987), Jenson & Domingue (1988) et Moore *et al.*, (1993) ont décrit et amélioré successivement l'algorithme permettant l'estimation des directions du flux (les écoulements), et par conséquent l'estimation des aires de drainage et les longueurs des drains.

1.3.1 : Intensité de la pente

L'intensité de la pente sur le secteur d'étude est estimée à partir du MNA selon la méthode proposée par Burrough (1986). Autrement dit, à partir de l'expression (4) à travers la fonction "slope" du module Grid du SIG Arc/Info. Nous obtenons ainsi (Fig. 6.6), le Modèle Numérique des intensités de la pente (MNP) dont les statistiques sommaires sont résumées dans le tableau 6.3 sur la deuxième ligne. Nous remarquons que les pentes sont très faibles. Ainsi, plus de 65 % des individus possèdent une pente dont l'intensité est inférieure ou égale à 1 % (Fig. 6.7).

1.3.2 : Orientation de la pente

La fonction "Aspect" du module Grid d'Arc/Info permet l'exécution de l'algorithme permettant l'estimation de l'orientation de la pente (φ) par l'expression (5) selon la méthode proposée par Moore *et al.*, (1991). Nous obtenons ainsi (Fig. 6.8) le Modèle Numérique des Orientations de la pente (MNO) dont les valeurs varient de 0 à 359,9 degrés dans le sens des aiguilles d'une montre. Etant donné que l'orientation de la pente (φ) est une variable circulaire, la moyenne arithmétique et les statistiques qui dépendent de la moyenne ne sont pas appropriées. Ceci est illustré par l'exemple suivant. Soient trois angles

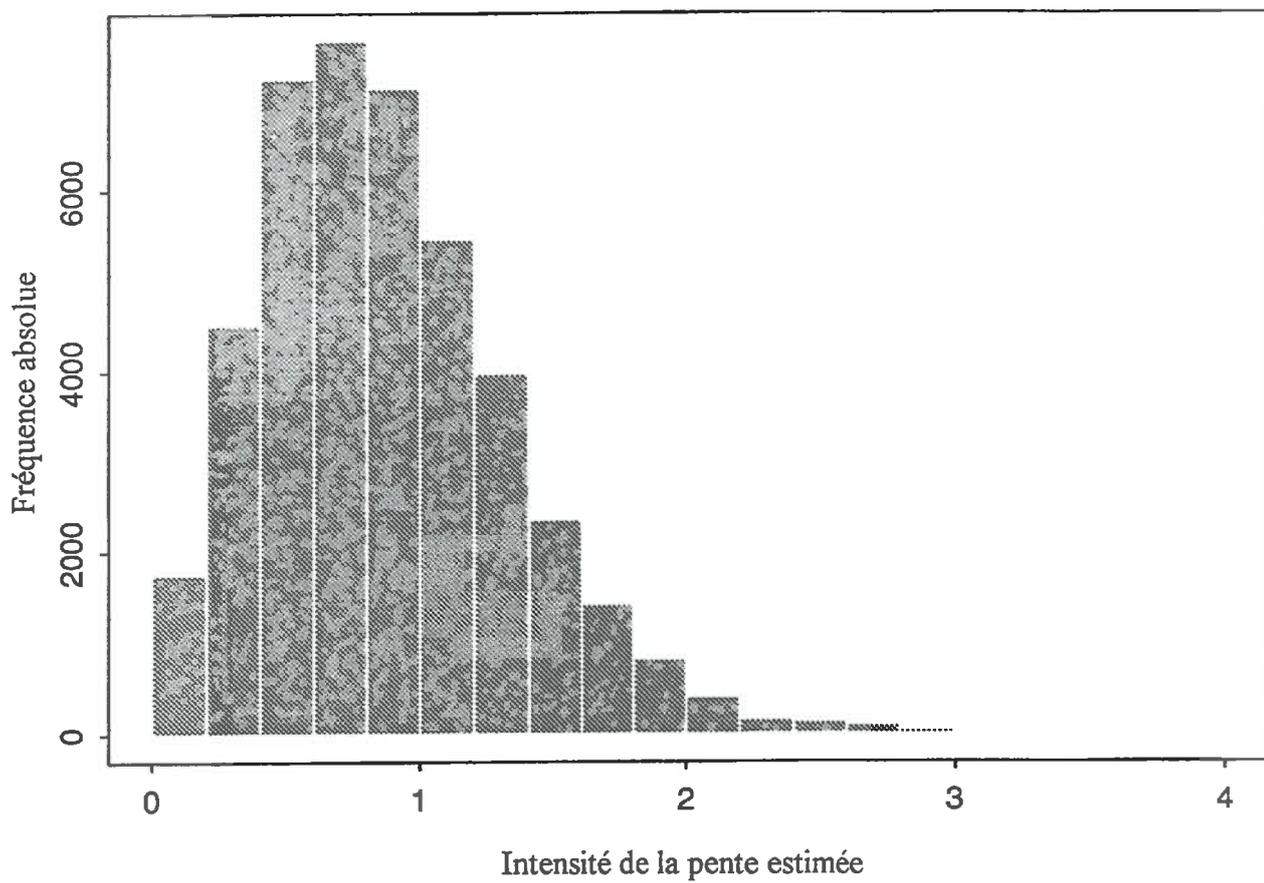
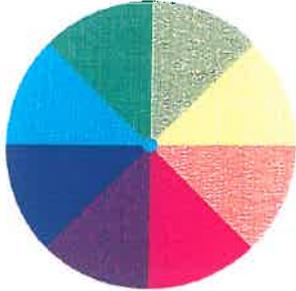


Figure 6.7 : Histogramme des intensités de la pente estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT .

Orientations des pentes:



Institut National de la Recherche Agronomique

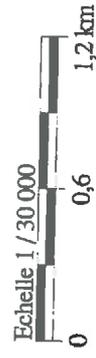
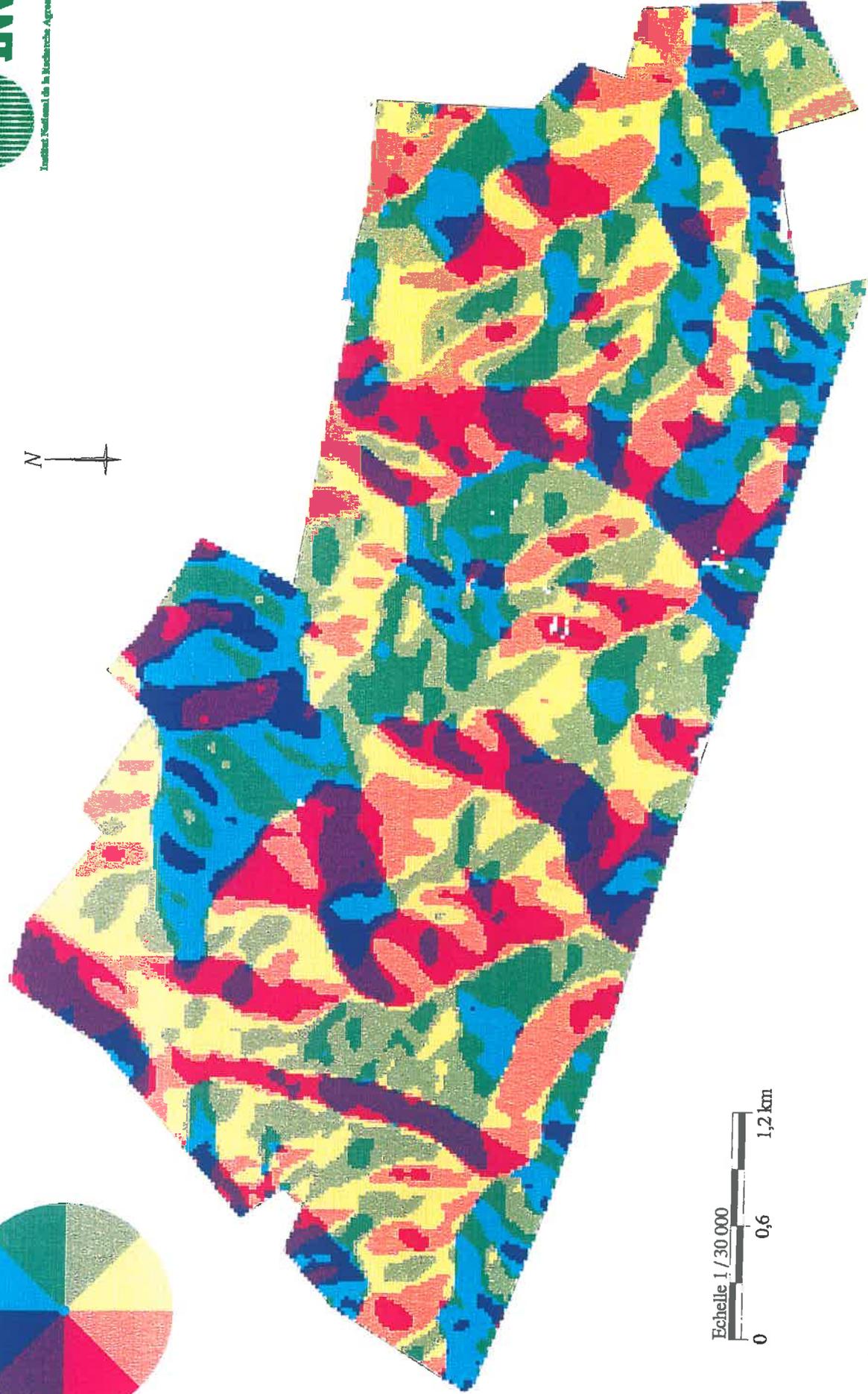


Figure 6.8 : Modèle Numérique des Orientations de la pente (MNO) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.



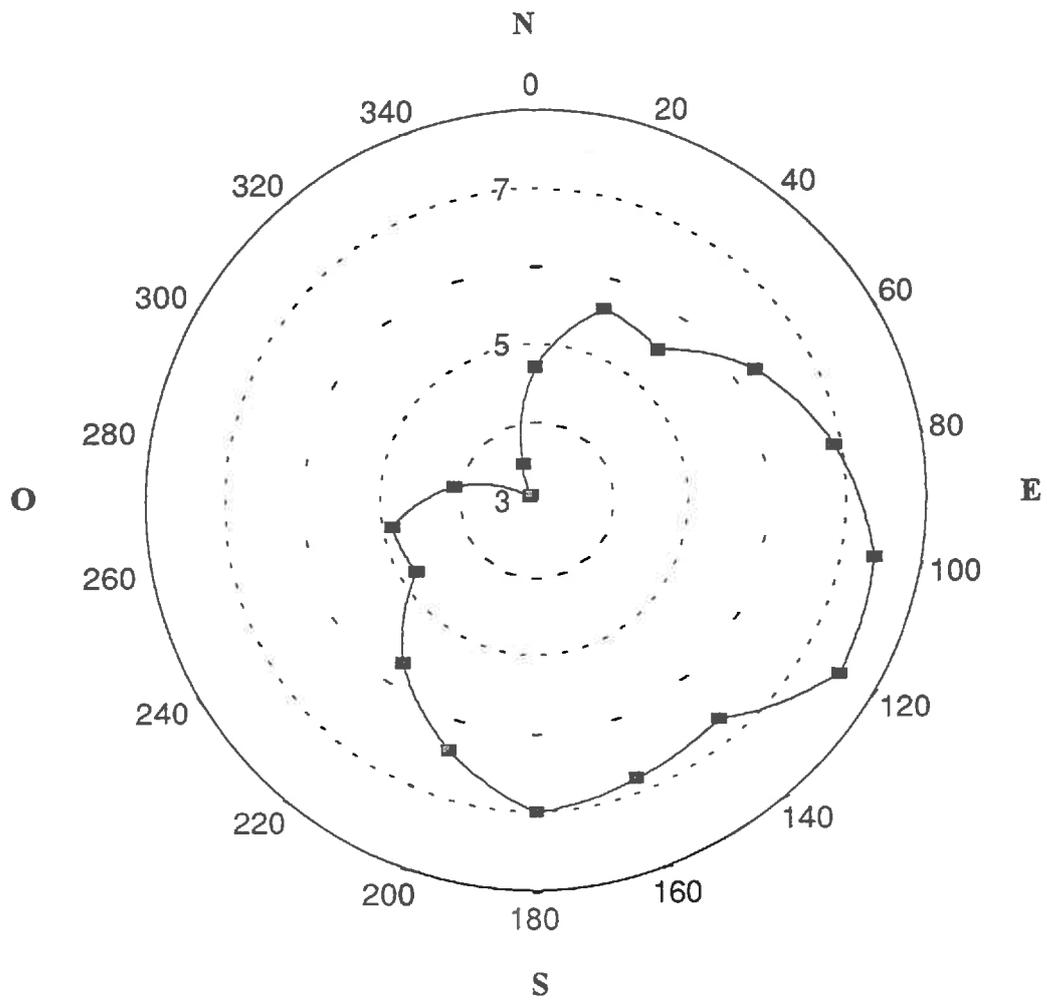


Figure 6.9 : Fréquences relatives des orientations de la pente estimées à partir du M.N.A sur le secteur de la simulation SPOT .

$$\varphi_1 = 80^\circ, \varphi_2 = 340^\circ, \varphi_3 = 30^\circ.$$

Un examen géométrique montre que l'angle moyen est égal à 30° . Par contre, si nous calculons la moyenne arithmétique, nous obtenons : $1/3(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) = 150^\circ$. Si nous remplaçons 340° par son angle équivalent -20° , nous obtenons la véritable valeur, c'est-à-dire :

$$(80^\circ - 20^\circ + 30^\circ) / 3 = 30^\circ.$$

Cependant, avec plus de trois angles il devient délicat de manipuler l'inversion des signes des angles. Ainsi, l'orientation de la pente (φ) est transformée en deux variables, $\sin \varphi$ et $\cos \varphi$ comme il a été recommandé par Mardia (1972) et Batschelet (1981) et la moyenne angulaire se calcule ainsi. Soit ϕ l'angle moyen en degrés

$$\phi = \begin{cases} \arctan(\bar{y} / \bar{x}) & \text{si } \bar{x} > 0 \\ 180^\circ + \arctan(\bar{y} / \bar{x}) & \text{si } \bar{x} < 0, \end{cases} \quad (9)$$

avec $\bar{x} = 1/n (\cos \varphi_1 + \cos \varphi_2 + \dots + \cos \varphi_n)$ et $\bar{y} = 1/n (\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2 + \dots + \sin \varphi_n)$.

Pour la variance angulaire (s^2), nous appliquons la formule suivante :

$$s^2 = 2(1 - r) \quad (10)$$

avec $r = (\bar{x}^2 + \bar{y}^2)^{1/2}$.

Ces calculs effectués, nous obtenons (Tab. 6.3 sur la troisième ligne) les statistiques sommaires sur la variable orientation de la pente.

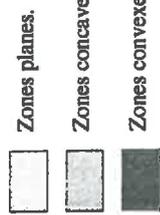
Les figures 6.8 et 6.9 montrent : (1) que l'ensemble des expositions théoriques sont représentées sur le secteur d'étude dans des proportions différentes ; (2) que nous sommes sur une ligne de partage des eaux globalement orientée Nord/Nord-Est et Sud/Sud-Ouest ; (3) une dissymétrie de versant.

1.3.3 : Convexités de la pente

Les convexités sont estimées selon la méthode proposée par Zevenbergen & Thorne (1987) et Moore *et al.*, (1991) et programmée dans la fonction "curvature" du module Grid du SIG Arc/Info. On parle de "convexités" au pluriel car on distingue trois types : (1) la convexité de la surface au centre de chaque pixel (convexité transversale), qui pour des valeurs positives, indique que la surface est convexe, concave pour des valeurs négatives et plane pour des valeurs nulles ; (2) la convexité verticale qui montre la convexité de la surface dans la direction de la pente au niveau de chaque pixel, avec des valeurs négatives pour les zones convexes et des valeurs positives pour les zones concaves ; (3) la convexité horizontale montre la convexité de la surface perpendiculairement à la direction de la pente au sein de chaque pixel avec des valeurs positives qui indiquent les zones convexes et des valeurs négatives qui indiquent les zones concaves. Pour un relief modéré les valeurs des trois types de convexités varient entre plus ou moins 0,5.

D'un point de vue pratique, la convexité de la surface est utilisée pour décrire de façon théorique les caractéristiques physiques d'un versant en terme de flux de surface et donc

LEGENDE :

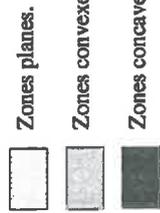


Zones planes.

Zones concaves.

Zones convexes.

LEGENDE :



Zones planes.

Zones concaves (d'accélération du flux).

Zones concaves (de décélération du flux).

LEGENDE :



Zones planes.

Zones concaves (de convergence du flux).

Zones convexes (de divergence du flux).

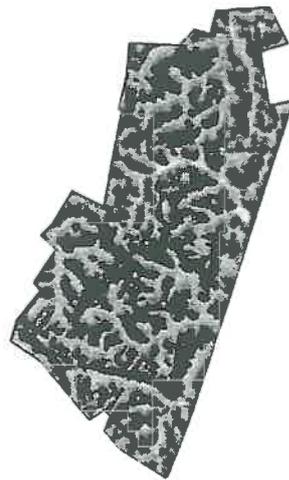


Figure 6.10a : Modèle Numérique des Convexités Transversales (MNCT) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

Figure 6.10b : Modèle Numérique des Convexités Verticales (MNCV) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

Figure 6.10c : Modèle Numérique des Convexité Horizontales (MNCH) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

éventuellement de processus d'érosion. La convexité verticale affecte l'accélération et la décélération des flux, et par conséquent les processus d'érosion et de dépôt. Quant à la convexité latérale, elle influence la convergence et la divergence des flux (Speight, 1980).

L'application de la fonction "curvature" d'Arc/Info permet d'obtenir (Fig. 6.10a, 6.10b, et 6.10c) les trois types de convexités sur le secteur de la simulation SPOT et dont les statistiques sommaires sont présentées dans le tableau 6.3.

Les histogrammes des différents types de convexités (Fig. 6.11a, 6.11b, et 6.11c) montrent des distributions qui peuvent être considérées comme symétriques. Cela signifie que l'on a autant d'individus (de surface) dont la pente est convexe que concave (Tab. 6.4). Il n'apparaît pas de formes 'majeures' ce qui est cohérent avec ce que l'on peut apprécier empiriquement de ce paysage très uniforme. De plus, les faibles dénivelées d'altitude peuvent remettre en cause le calcul de ces convexités compte tenu des erreurs de mesure.

Tableau 6.4 : Forme de la surface en pour-cent suivant les trois types de convexités.

	<i>Surface convexe (%)</i>	<i>Surface concave (%)</i>	<i>Surface plane (%)</i>
<i>Convexité transversale</i>	46	50	4
<i>Convexité horizontale</i>	44	49	7
<i>Convexité verticale</i>	49	44	6

1.3.4 : Directions et accumulations du flux

En supposant que l'infiltration de l'eau est nulle, les directions du flux et ses accumulations sont calculées à partir des altitudes connues aux noeuds du MNA (Fig. 6.12 et 6.13). Ces deux attributs morphologiques sont calculés selon la méthode proposée par Greenlee (1987) et Jenson & Domingue (1988) pour les directions du flux, et la méthode proposée par Jenson & Domingue (1988) et Tarboton *et al.*, (1991) pour les accumulations du flux. Ces deux attributs morphologiques du relief correspondent aux fonctions "flowdirection" et "flowaccumulation" du module Grid d'Arc/Info.

Pour la direction du flux, il est affecté à chaque maille du MNA une direction d'écoulement lui permettant d'atteindre la maille vers laquelle la pente descendante est la plus forte. La recherche de cette maille s'effectue parmi les huit mailles voisines de la maille cible. La grille des directions des flux est codée avec les valeurs 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 et 128. L'Est, le Sud, l'Ouest et le Nord correspondent respectivement aux codes 1, 4, 16 et 64. Les autres codes correspondent aux directions intermédiaires.

Le tableau 6.5 montre que l'ensemble des directions possibles du flux, proposées par l'algorithme, sont représentées sur le secteur d'étude. Les directions du flux comprises entre l'Est et le Sud sont les plus fréquentes, tandis que les directions du flux Nord-Ouest et Nord sont les moins fréquentes. L'examen des orientations de la pente sur le secteur d'étude (Fig. 6.9) permet de trouver une explication à cette répartition des directions du flux. En effet, nous constatons que les versants orientés vers l'Est, le Sud-Est et le Sud représentent une surface plus importante que les versants orientés vers l'Ouest et le Nord-Ouest.

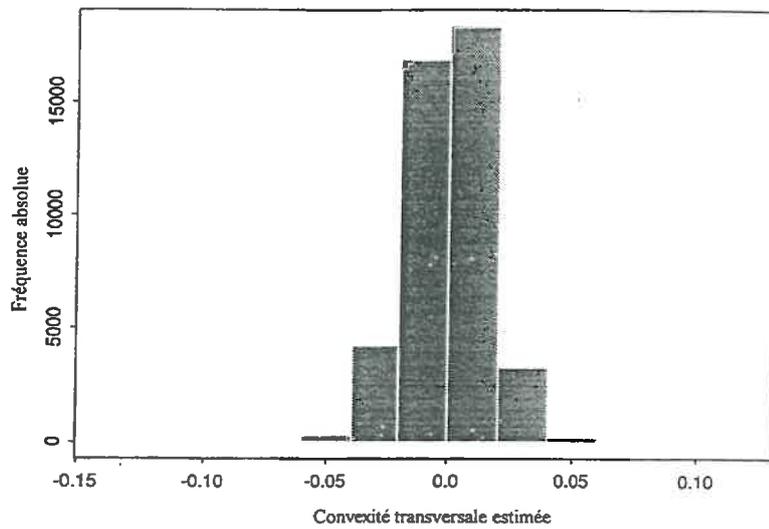


Figure 6.11a : Histogramme des convexités transversales estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

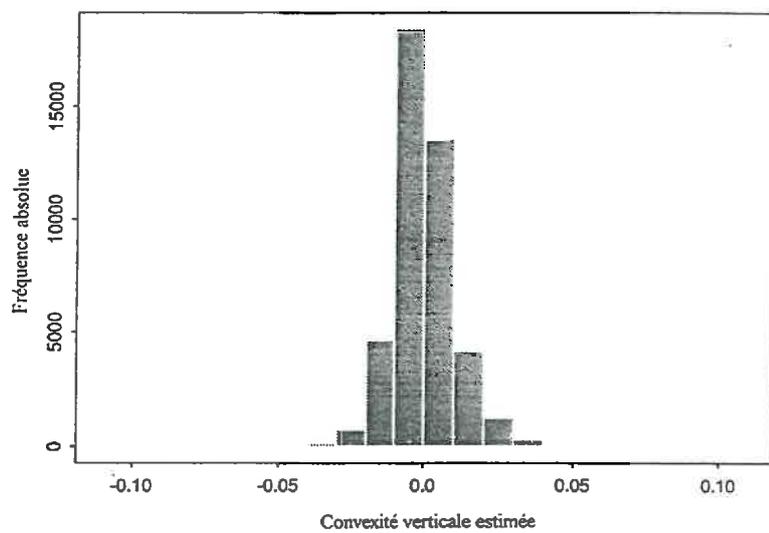


Figure 6.11b : Histogramme des convexités verticales estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

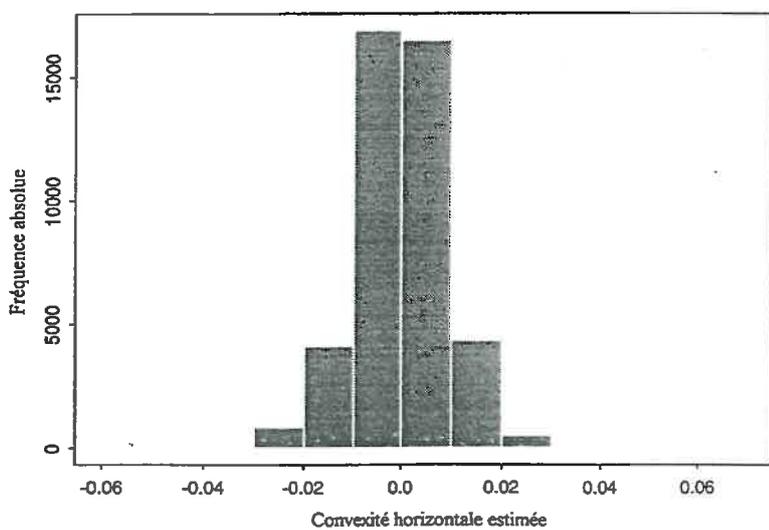


Figure 6.11c : Histogramme des convexités horizontales estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

Nombre de mailles contributives au ruissellement:

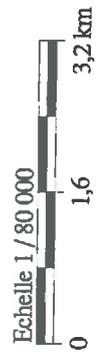
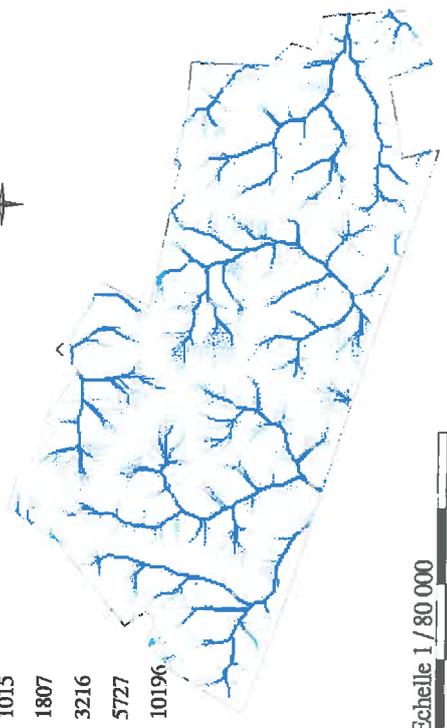


Figure 6.13 : Modèle Numérique des Accumulations du Flux (MNFA) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.



directions du flux:

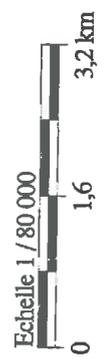
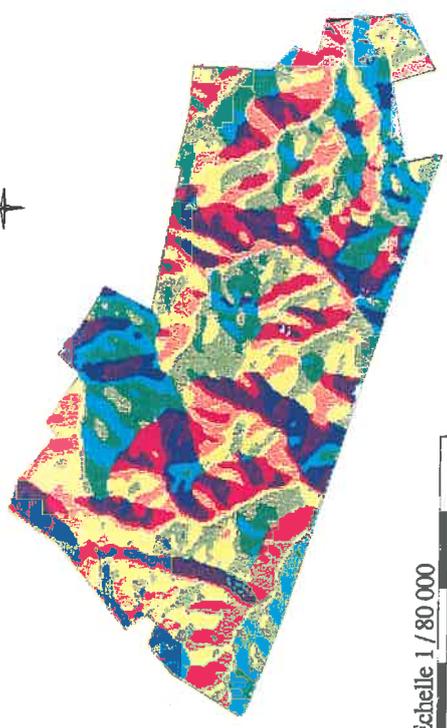
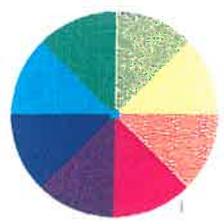


Figure 6.12 : Modèle Numérique des Directions du Flux (MNFD) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

Altitudes en mètres:

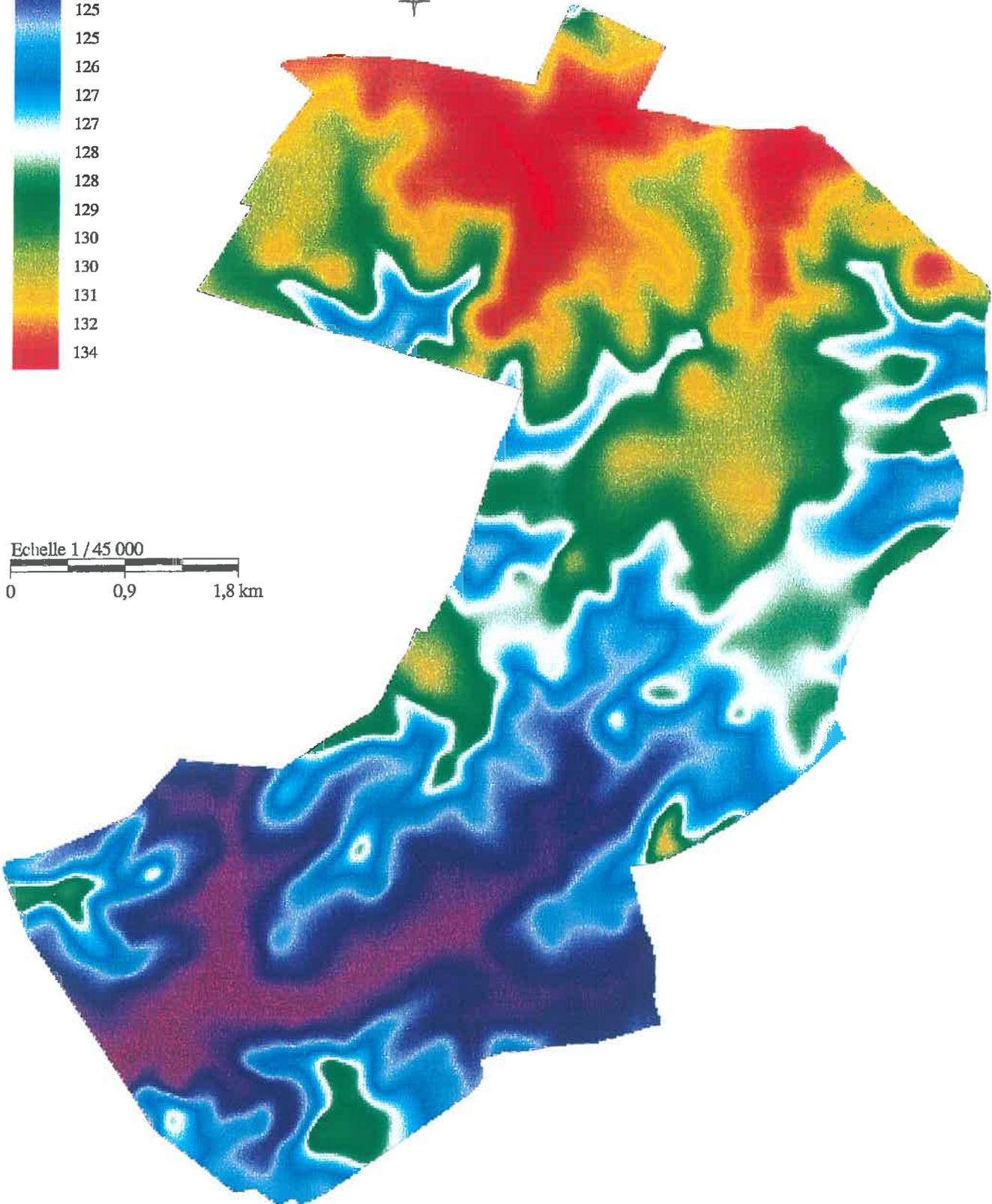
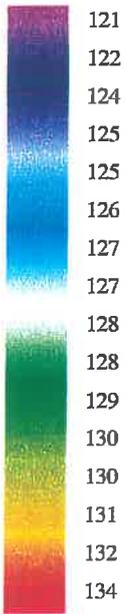


Figure 6.14 : Modèle Numérique d'Altitude (MNA) estimé à partir des courbes de niveaux d'un document IGN au 1/25.000 sur le secteur de Villablain.

Tableau 6.5 : Pourcentage de surface par direction du flux.

<i>Directions proposées</i>	<i>1 (E)</i>	<i>2 (SE)</i>	<i>4 (S)</i>	<i>8 (SO)</i>	<i>16 (O)</i>	<i>32 (NO)</i>	<i>64 (N)</i>	<i>128 (NE)</i>
<i>Surface (%)</i>	16	16	16	13	11	7	9	12

Quant à l'accumulation du flux, il est estimé une fois que le cheminement de l'eau est estimé (direction du flux). il nous permet en particulier de : (1) distinguer les sommets (accumulations du flux nulles) et les fonds c'est-à-dire là où les accumulations sont maximales ; (2) connaître pour une maille quelconque du domaine d'étude le nombre de mailles qui se déverse en cette maille.

Enfin, il faut signaler que le MNA qui sert à calculer les grilles des directions et des accumulations du flux a subi un remplissage des puits afin d'obtenir un cheminement continu de l'eau sur tout le domaine et par conséquent avoir un réseau hydrographique connecté comme le montre la figure 6.13. Ceci est très important à noter, puisque sans ce remplissage préalable, il n'apparaît pas de réseau hydrographique susceptible d'avoir joué un rôle de drainage continu et de ruissellement.

2. Modèle Numérique d'Altitude et attributs morphologiques dérivés sur le secteur de Villamblain

Le secteur de Villamblain représente une surface de 3500 ha et englobe le secteur de la simulation SPOT (*cf. Fig. 2.1, cf. chapitre II*). Sur cette surface, le Modèle Numérique d'Altitude (MNA) est établi au sein du Système d'Information Géographique (SIG) Arc/Info à partir de la carte topographique de l'IGN au 1/25.000 (Ouzouer-le-Marché Ouest).

Cela a nécessité une digitalisation des courbes de niveaux du document de l'IGN. Cependant, en retenant uniquement ces courbes de niveaux, un profil topographique le long d'un versant apparaît comme une ligne brisée avec des paliers et des verticales déformant l'aspect très peu accidenté du terrain. L'ajout de courbes de niveaux intermédiaires permet d'obtenir une représentation du relief plus réaliste. Celles-ci ont été dessinées selon une hypothèse de linéarité entre deux courbes d'altitude successive, présentes sur la carte.

L'ensemble de ces courbes de niveaux a permis la création du MNA (Fig. 6.14) du secteur de Villamblain au pas de 20 m, selon l'algorithme proposé par Hutchinson (1989) à travers la fonction "Topogrid" du SIG Arc/Info.

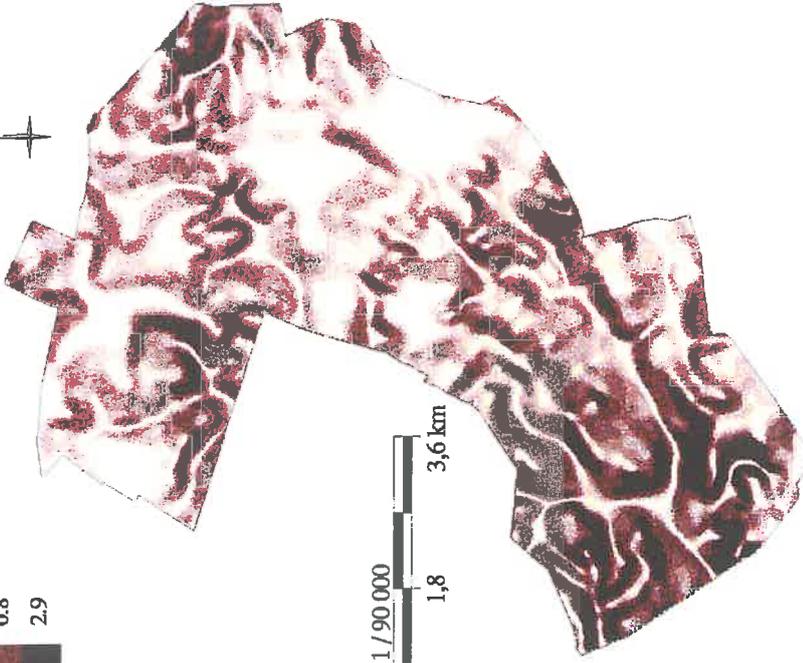
De ce MNA, les différents attributs morphologiques ont été déduits pour le secteur de Villamblain (Fig. 6.15a à 6.15g). Les statistiques sommaires sont résumées dans le tableau 6.6. Nous remarquons que sur l'ensemble du secteur de Villamblain, l'amplitude de l'altitude estimée est de 22 m, la pente reste très faible et les convexités sont typiques d'un relief doux.

Une comparaison entre les minima, les maxima, les moyennes et les écarts types du MNA et de ses attributs dérivés sur le secteur de la simulation SPOT (Tab. 6.3), et le MNA et ses attributs dérivés sur le secteur de Villamblain, montre des différences faibles en valeurs absolues. Ces différences, bien qu'elles soient faibles, ne peuvent pas être considérées comme négligeables, et a priori sans effet sur le modèle de distribution des sols en fonction des attributs de la morphologie, vu l'aspect très doux du relief du secteur d'étude.

Pentes en pourcentages:



N



Echelle 1 / 90 000
0 1,8 3,6 km

Orientations des pentes:

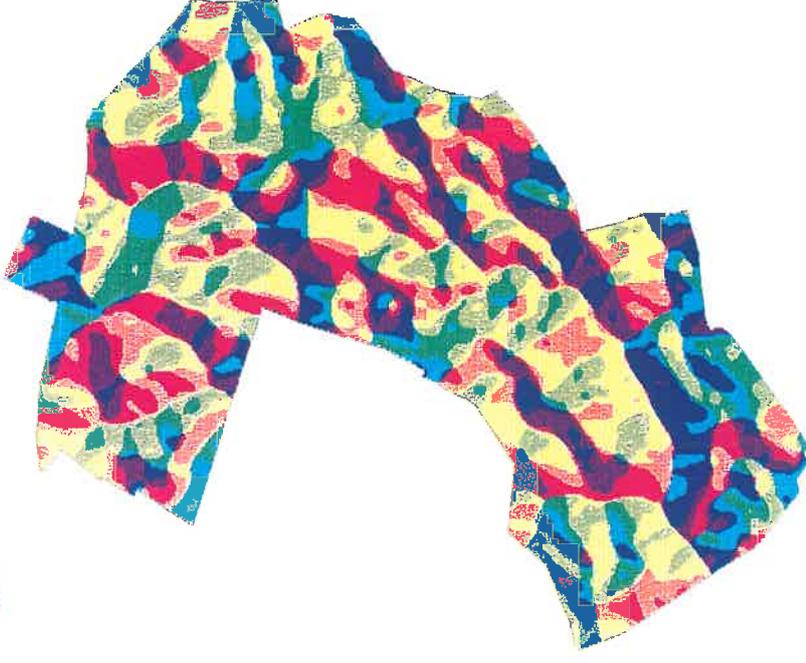
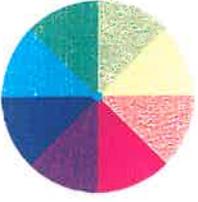


Figure 6.15a : Modèle Numérique des intensités de la Pente (MNP) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villablain.

Figure 6.15b : Modèle Numérique des Orientations de la pente (MNO) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villablain.

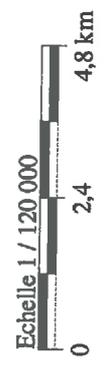
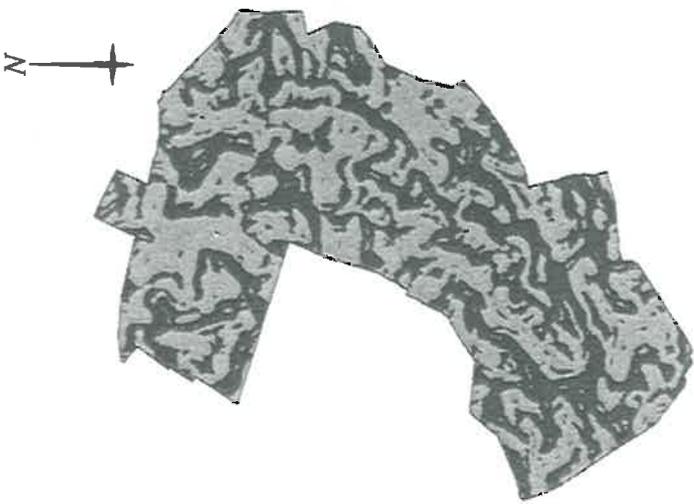
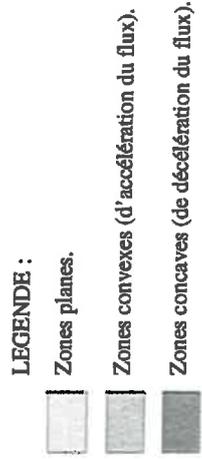
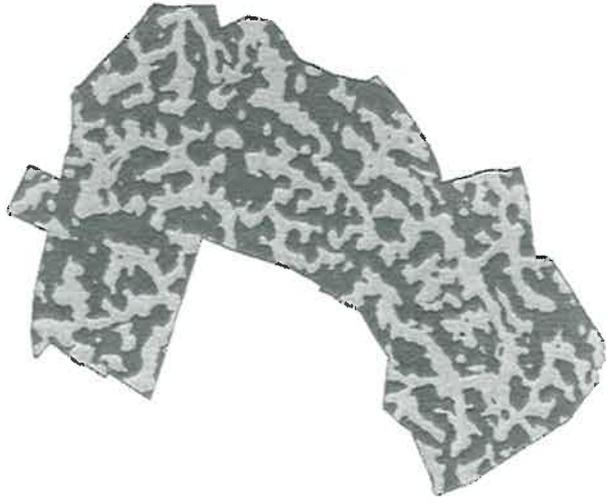


Figure 6.15c : Modèle Numérique des Convexités Transversales (MNCT) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villablain.

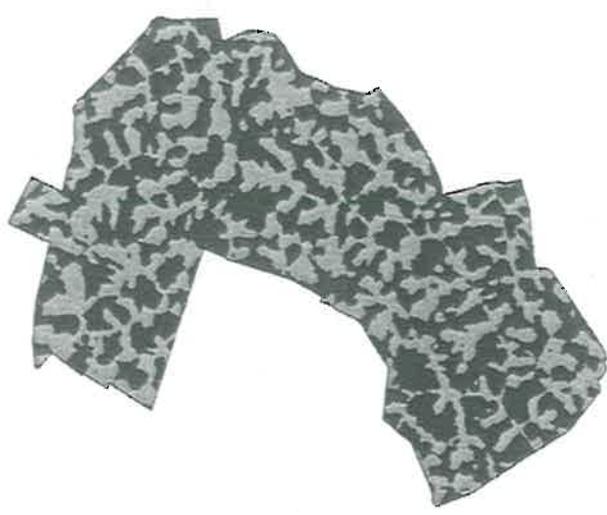
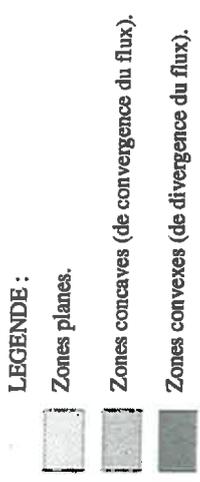


Figure 6.15e : Modèle Numérique des Convexités Horizontales (MNCH) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villablain.

Figure 6.15d : Modèle Numérique des Convexités Verticales (MNCV) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villablain.

directions du flux:

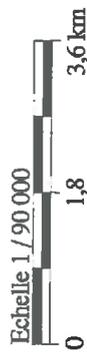
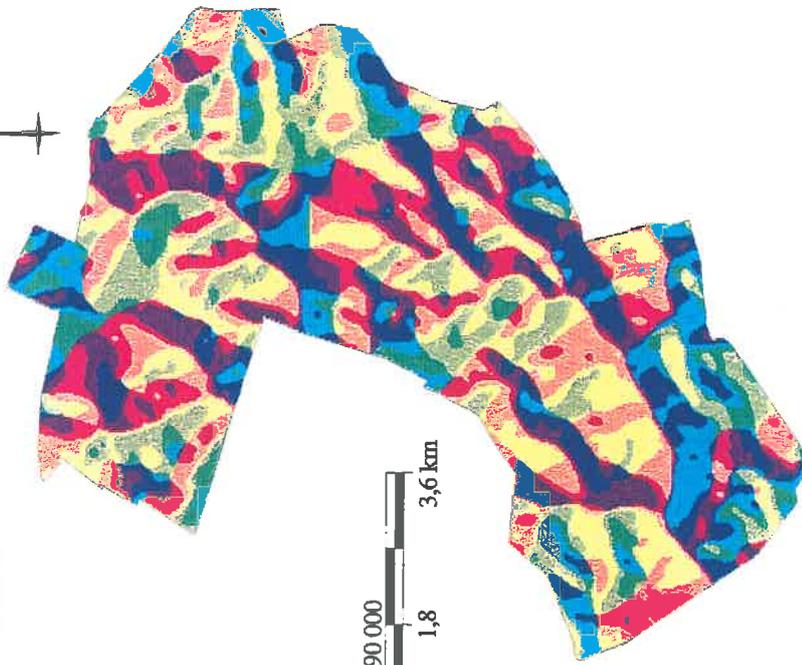
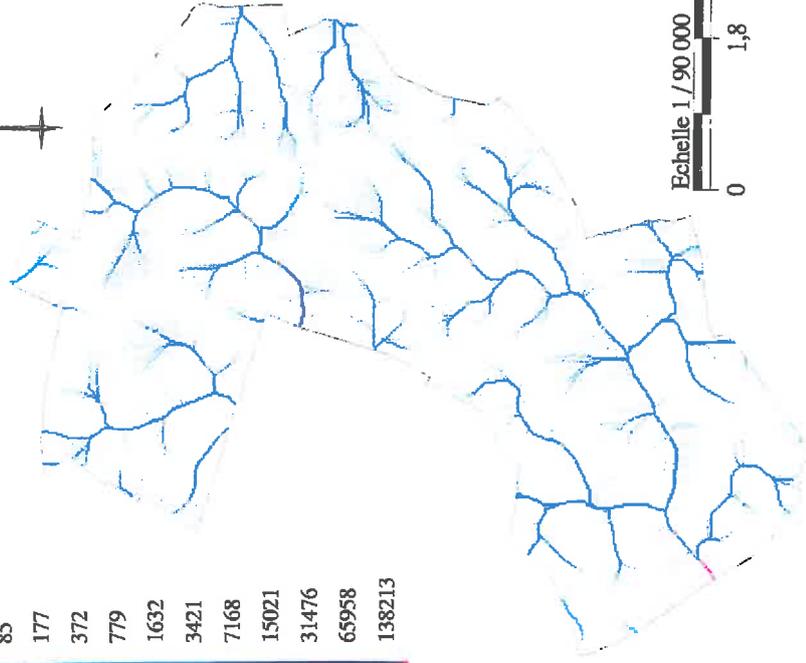


Figure 6.15f : Modèle Numérique des Directions du Flux (MNFD) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villamblain.

Nombre de mailles contributives au ruissellement:

2
4
9
19
40
85
177
372
779
1632
3421
7168
15021
31476
65958
138213



Centre National de la Recherche Agronomique



Figure 6.15g : Modèle Numérique des Accumulations du Flux (MNFA) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villamblain.

Tableau 6.6 : Statistiques sommaires sur la variable altitude estimée (MNA) et les différents attributs morphologiques dérivés du MNA sur le secteur de Villamblain.

	<i>Effectif</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>
<i>Altitude estimée Z* (m)</i>	276480	116,94	138,43	126,61	3,81
<i>Intensité de la pente (β %)</i>	276480	0,000	2,89	0,45	0,32
<i>Orientation de la pente (φ °)</i>	276480	0,003	359,99	174,23	96,38
<i>Convexité transversale (m⁻¹)</i>	276480	-0,091	0,093	0,000	0,011
<i>Convexité verticale (m⁻¹)</i>	276480	-0,063	0,079	0,000	0,008
<i>Convexité horizontale (m⁻¹)</i>	276480	-0,066	0,069	0,000	0,006

Une comparaison visuelle des cartes représentant les attributs dérivés des MNA du secteur SPOT et de l'ensemble du secteur de Villamblain montre de fortes similitudes des résultats (exemple fig. 6.6 et 6.15a). Cela est vérifié même dans le cas d'attributs dérivés fortement sensibles aux erreurs d'altitudes initiales (convexités, réseau hydrographique). Nous pouvons donc considérer à première vue que la méthode d'extraction d'un MNA à partir de courbes de niveau est satisfaisante. Une analyse plus détaillée comparant ces deux méthodes est proposée au chapitre X.

Conclusions du chapitre VI

Le Modèle Numérique d'Altitude (MNA) sur le secteur de la simulation SPOT a été estimé par krigeage aux noeuds d'une grille de 20 m x 20 m à partir d'un semis de 9898 points obtenus par levé topographique. Introduit au sein de la structure du Système d'Information Géographique (SIG) Arc/Info, ce MNA a permis l'estimation : (1) des intensités de la pente ; (2) des orientations et des convexités de la pente ; (3) des directions et des accumulations du flux. Les résultats montrent que (1) l'altitude varie peu sur le secteur, elle possède une amplitude de seulement 15 m ; (2) la pente est très faible, en effet plus de 60 % des individus possèdent une pente dont l'intensité est inférieure ou égale à 1% ; (3) l'ensemble des orientations est représenté ; (4) les valeurs des convexités sont typiques des reliefs modérés avec un équilibre entre la proportion de surfaces convexes et celles de surfaces concaves.

Ce Modèle Numérique d'Altitude et ses attributs dérivés seront couplés aux données pédologiques sur le secteur de la simulation SPOT afin de rechercher des relations entre la morphologie du terrain et des caractéristiques intrinsèques du sol, et par conséquent estimer au mieux la variable sol et comprendre la distribution spatiale des sols dans le secteur d'étude.

Sur le secteur de Villamblain, le Modèle Numérique d'Altitude a été réalisé à partir des courbes de niveaux d'un document IGN au 1/25.000. Les valeurs de ce Modèle Numérique d'Altitude et de ses attributs dérivés montrent une grande similitude avec celles du Modèle Numérique d'Altitude et de ses attributs dérivés sur le secteur de la simulation SPOT.

Le Modèle Numérique d'Altitude et ses attributs dérivés sur le secteur de Villamblain seront utilisés pour (1) étudier la sensibilité du modèle de distribution des sols à la précision du MNA ; (2) réaliser une extension du modèle de répartition des sols établi sur le secteur de la simulation SPOT au secteur de Villamblain. Ces deux points seront abordés dans le chapitre X.

Le choix d'un secteur plus grand se justifie donc d'une part, pour englober une plus grande diversité des situations morphologiques du relief et, d'autre part pour évaluer l'effet de la perte

de précision (densité plus faible des sondages pédologiques, mesures plus imprécises sur les attributs du relief) sur le modèle de distribution des sols.

Chapitre VII : Etude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse et des matériaux sous-jacents selon les attributs du relief

Introduction

Dans ce chapitre, l'objectif est de voir s'il existe une relation entre les attributs morphologiques dérivés du relief et les différentes formations décrites précédemment à savoir : (1) l'argile limoneuse carbonatée ou non ; (2) l'argile limoneuse non carbonatée ; (3) le matériau cryoturbé ; (4) le calcaire pulvérulent ; (5) les formations argilo-sableuses.

L'information (épaisseur et/ou présence/absence) sur les formations citées ci-dessus est obtenue grâce à 341 sondages pédologiques à la tarière couvrant le secteur SPOT de 1600 ha (Fig. 7.1). Ces données sont issues d'une première campagne de cartographie (Duval & Isambert, 1992) que nous avons complétée par une prospection pédologique et morphologique.

Compte tenu de la planéité de la surface de ce secteur d'étude, les différents attributs morphologiques ont été calculés grâce à un Modèle Numérique d'Altitude établi à partir d'un levé topographique (*cf. chapitre VI, paragraphe 1*). Disposant ainsi d'une estimation de l'altitude et de tous les attributs dérivés en tout point de l'espace, nous pouvons aisément rechercher les relations statistiques entre les caractéristiques pédologiques et ces attributs morphologiques du relief. L'analyse des résultats conduit à des interprétations reliant la mise en place des sols et la typologie du relief (morphogenèse). La discussion des résultats sera élargie et synthétisée au chapitre suivant.



Figure 7.1 : Localisation des 341 observations pédologiques sur le secteur de la simulation SPOT.

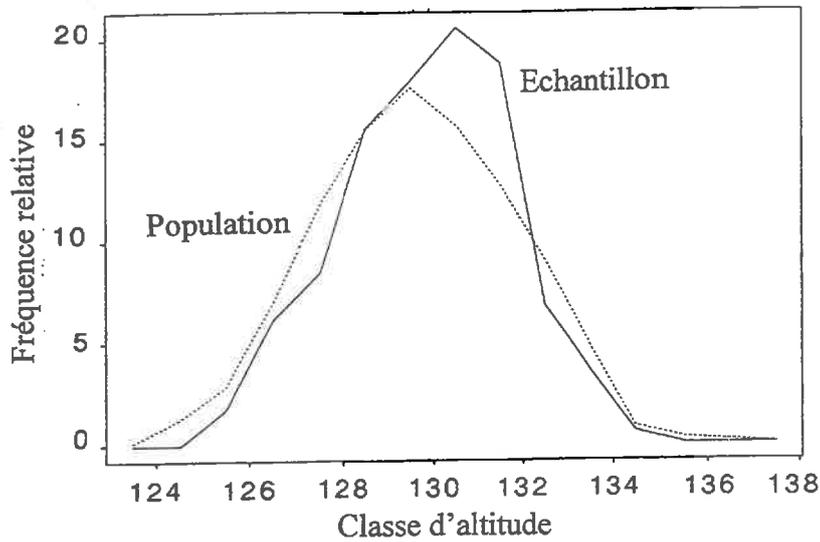


Figure 7.2a : Distributions relatives des altitudes au sein de la population et de l'échantillon.

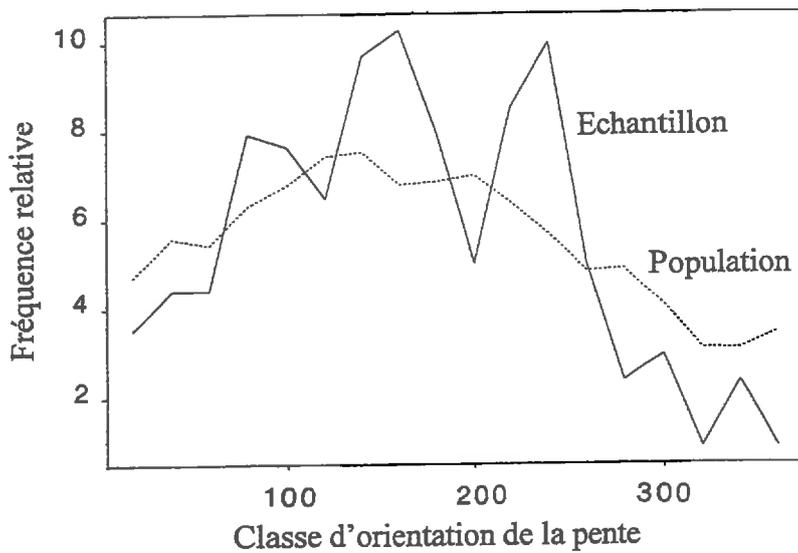


Figure 7.2b : Distributions relatives des orientations de la pente au sein de la population et de l'échantillon.

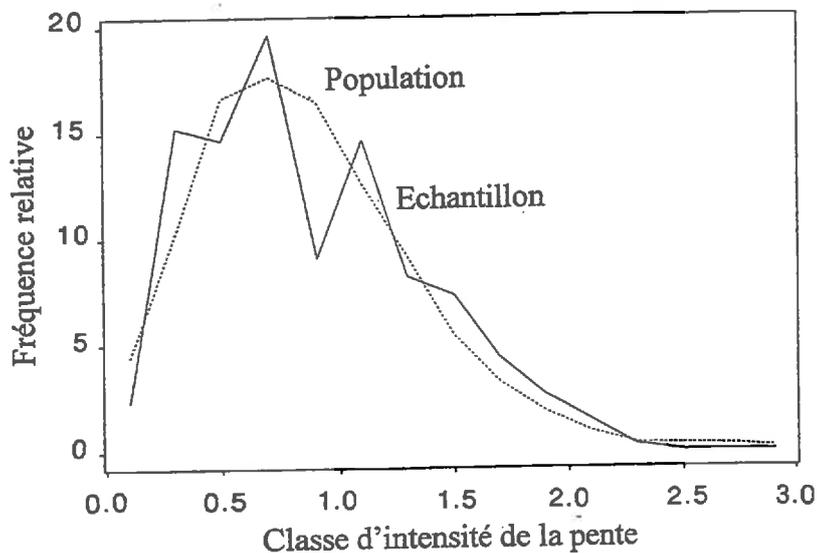


Figure 7.2c : Distributions relatives des intensités de la pente au sein de la population et de l'échantillon.

1. Caractéristiques morphologiques des observations pédologiques

Le Modèle Numérique d'Altitude et ses attributs primaires calculés sur le secteur de la simulation SPOT (cf. chapitre VI, paragraphe 1) ont permis d'informer chacun des 341 sondages des valeurs prises par les attributs morphologiques dans la maille englobant la localisation du point de sondage. Ainsi, en chaque point nous avons en plus de l'information sur les différentes formations, une information sur : (1) l'altitude (*Alt*) ; (2) l'intensité de la pente (β) ; (3) l'orientation de la pente (φ) ; (4) la convexité verticale (*Prc*) ; (5) la convexité horizontale (*Plc*) ; (6) la convexité de la surface (*Curve*) ; (7) les accumulations du flux ou flux cumulatif (*Facc*).

Le tableau 7.1 résume les statistiques sommaires de l'échantillon des 341 individus. Ces statistiques concernent les attributs morphologiques et la variable épaisseur de l'argile limoneuse (*EPAL*) à laquelle nous nous intéressons particulièrement. Il faut rappeler que *EPAL* correspond à l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux (*AL*) supérieur carbonaté ou non décrit dans le chapitre IV.

Tableau 7.1 : Statistiques sommaires sur l'échantillon des 341 individus.

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
<i>EPAL (cm)</i>	25	120	73,3	25
<i>Alt (m)</i>	125,5	134	129,9	1,8
β (%)	0,1	2,3	0,9	0,5
φ (degrés)*	2,5	356,6	148,7	66,1
<i>Curve (m⁻¹)</i>	-0,04	0,04	0,002	0,01
<i>Prc (m⁻¹)</i>	-0,03	0,04	-0,001	0,01
<i>Plc (m⁻¹)</i>	-0,03	0,02	0,001	0,01
<i>Facc</i>	0	4765	55,8	31,5

* la moyenne et l'écart-type dans le cas de cette variable sont calculés selon la méthode exposée dans le chapitre VI car il s'agit d'une variable circulaire.

Ce tableau donne une idée globale des gammes de variation des différentes variables considérées grâce notamment aux paramètres de position (la moyenne) et de dispersion (l'écart-type). Cependant, ces statistiques ne permettent pas de dire si l'ensemble des points prospectés constitue un échantillon statistiquement représentatif du secteur d'étude (population). Aussi, pour tester la représentativité de l'échantillon (341 individus) par rapport à la population (43101 individus) vis-à-vis des trois principaux attributs du relief : altitude, intensité de la pente et son orientation, nous avons réalisé un test du khi-deux. Ce dernier permet de voir si l'écart entre les fréquences de l'échantillon et les fréquences de la population est significatif pour une variable donnée.

Nous nous sommes contentés de tester la représentativité de l'échantillon par rapport à la population uniquement pour ces trois attributs du relief car : (1) l'ensemble des attributs morphologiques dérive de l'altitude ; (2) ce sont ces trois attributs qui semblent régir la plupart des processus pédologiques.

Les résultats de ce test (Tab. 7.2) montrent que les distributions des trois attributs morphologiques considérés ne diffèrent pas significativement des distributions des mêmes attributs morphologiques au sein de la population. Ce résultat peut être constaté en examinant directement les figures 7.2a à 7.2c.

Tableau 7.2 : Résultats du test du khi-deux.

Variables	Altitude (<i>Alt</i>)	Intensité de la pente (β)	Orientation de la pente (φ)
$H_0: F_{obs} = F_{théo}^1$			
χ^2_{obs}	8,7	9,9	13,9
$\chi^2_{0,95}$	23,7 (14 ddl)	23,7 (14 ddl)	27,6 (17 ddl)
Décision ²	+	+	+

1 F_{obs} = fréquences relatives de l'échantillon. $F_{théo}$ = fréquences relatives de la population.

2 le signe + indique que H_0 est acceptée.

Ainsi, nous pouvons dire que l'échantillon des 341 observations pédologiques est représentatif du secteur d'étude vis-à-vis des attributs morphologiques. Nous pouvons dire qu'il l'est aussi pour les différentes formations car ces dernières ont été toutes identifiées.

2. Etude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse en fonction des attributs morphologiques du relief

2.1 : Analyse statistique de l'argile limoneuse en fonction des attributs morphologiques du relief

2.1.1 : La pente

L'examen de la distribution spatiale de l'argile limoneuse (*AL*) en fonction de l'intensité de la pente montre que *AL* recouvre indifféremment toutes les catégories d'intensité de la pente (Tab. 7.3). Cependant, l'épaisseur moyenne de *AL* est plus importante dans la classe des faibles intensités de la pente et sa dispersion est moins forte ($CV = 15\%$) par comparaison aux autres classes de pente (Tab. 7.3).

Tableau 7.3 : Répartition de l'argile limoneuse par classe d'intensité de la pente.

	Classe d'intensité de la pente (%)		
	0 - 0,5	0,5 - 1	> 1
Nombre d'individus au sein de l'échantillon	85	123	133
Pourcentage	25	36	39
Nombre d'individus au sein de la population	9807	18507	14787
Pourcentage	23	43	34
Statistiques sommaires sur EPAL (cm)			
Minimum	80	60	25
Maximum	120	115	80
Moyenne	102	79	51
coefficient de variation : CV (%)	15	18	28

Le nombre d'observations plus élevé (133) dans la classe de pente supérieure à 1 %, par rapport aux deux autres classes de pente (Tab. 7.3) peut être expliqué par le fait que l'épaisseur de l'argile limoneuse varie plus sur ces pentes ($CV = 28\%$). Ce résultat est directement perceptible sur le terrain et a entraîné lors de la prospection cartographique une densité d'échantillonnage plus grande sur les pentes dont l'intensité est supérieure à 1 %. Ces

pententes ne sont pourtant pas les plus fréquentes puisqu'elles représentent 34 % de la surface totale du secteur.

Le tableau 7.4 confirme l'existence d'une relation linéaire négative ($r = -0,84$) entre l'épaisseur de l'argile limoneuse (*EPAL*) et l'attribut morphologique intensité de la pente (β). Ce coefficient de corrélation linéaire (r) est le plus élevé du tableau 7.4. Il est pourtant classique d'observer de très fortes valeurs de r entre les attributs morphologiques puisqu'ils sont tous dérivés du même attribut 'altitude'. Ainsi, l'intensité de la pente explique 70 % de la variabilité totale de l'épaisseur de l'argile limoneuse. Ce résultat peut être considéré comme remarquable compte tenu de la gamme très réduite des pentes toujours faibles.

Tableau 7.4 : Matrice des corrélations partielles entre l'épaisseur de l'argile limoneuse et les attributs morphologiques.

	<i>EPAL</i>	<i>Alt</i>	β	$\sin\varphi$	$\cos\varphi$	<i>Curve</i>	<i>Prc</i>	<i>Plc</i>	<i>Facc</i>
<i>EPAL</i>	1								
<i>Alt</i>	0,31	1							
β	-0,84	-0,32	1						
$\sin\varphi$	0,41	0,06	-0,47	1					
$\cos\varphi$	0,25	0,13	-0,19	0,19	1				
<i>Curve</i>	0,12	0,31	-0,05	-0,10	-0,05	1			
<i>Prc</i>	-0,06	-0,40	0,03	0,11	0,05	-0,83	1		
<i>Plc</i>	0,14	0,08	-0,06	-0,04	-0,03	0,78	-0,30	1	
<i>Facc</i>	0,13	-0,21	-0,19	0,09	-0,01	-0,28	0,20	-0,26	1

En gras coefficients de corrélation linéaire significativement différents de zéro au seuil de signification à 1 % (la valeur critique est égale à 0,13 pour 339 degrés de liberté).

Au seuil de signification à 5 %, la valeur critique est égale à 0,10 pour 339 degrés de liberté.

En ce qui concerne la distribution spatiale de l'argile limoneuse en fonction de l'orientation de la pente (φ), nous constatons que le nombre de points prospectés sur les versants Ouest et Nord-Ouest (orientations comprises entre 270 et 360 degrés et notées *O/NO*) est réduit par rapport aux observations réalisées sur les autres versants (Fig. 7.2b). Ceci est dû au fait que les versants *O/NO* ne représentent que 16 % de la surface du secteur d'étude (Tab. 7.5).

Le tableau 7.5 montre que l'argile limoneuse est plus épaisse en moyenne avec des valeurs moins dispersées ($CV = 21$ %) sur les versants orientés vers le Nord-Est (*NE*). Cette épaisseur diminue pour atteindre les valeurs moyennes les plus faibles sur les versants orientés vers le Sud-Ouest (*SO*) avec une dispersion maximale ($CV = 44$ %), puis augmente de nouveau sur les versants Nord-Ouest (*NO*) sans toutefois atteindre les valeurs moyennes rencontrées sur les autres versants (Tab. 7.5).

La relation linéaire entre l'épaisseur de l'argile limoneuse (*EPAL*) et les composantes de l'orientation de la pente (φ) est significativement différente de zéro (Tab. 7.4). Cette relation est plus forte avec la composante sinus de l'orientation ($r = 0,41$) qu'avec la composante cosinus.

Tableau 7.5 : Répartition de l'argile limoneuse par classe d'orientation de la pente.

	<i>Classe d'orientation de la pente (degrés)</i>			
	<i>0 - 90 (NE)</i>	<i>90 - 180 (SE)</i>	<i>180 - 270 (SO)</i>	<i>270 - 360 (NO)</i>
<i>Nombre d'individus au sein de l'échantillon</i>	87	125	102	27
<i>Pourcentage</i>	25	37	30	08
<i>Nombre d'individus au sein de la population</i>	10920	13861	11313	7007
<i>Pourcentage</i>	25	33	26	16
<i>Statistiques sommaires sur EPAL (cm)</i>				
<i>Minimum</i>	45	45	25	25
<i>Maximum</i>	120	120	120	120
<i>Moyenne</i>	85	77	59	68
<i>coefficient de variation CV (%)</i>	21	29	44	40

L'examen de la répartition des observations pédologiques en fonction de l'intensité de la pente et de son orientation montre que 63 % des individus sur les versants *SO* et *NO* possèdent des pentes dont l'intensité est supérieure à 1 % (Tab. 7.6). Sur les versants *SE* et *NE*, les observations réalisées sur des pentes dont l'intensité est supérieure à 1 % ne représentent respectivement que 31 et 15 % du nombre total des observations réalisées. Ceci peut être le fait du hasard. En effet, certaines catégories de pente peuvent être plus échantillonnées que d'autres. Cependant, le tableau 7.7 montre que sur le secteur d'étude les versants *SO* et *NO* possèdent plus de surface avec des pentes relativement "raides" par rapport aux versants *SE* et *NE*. Il est vrai qu'il est difficile de conclure pour les pentes comprises entre 0 et 0,5 %. En effet, pour de telles valeurs proches de l'horizontal, le calcul de l'orientation est très sensible et peut engendrer des erreurs de 180°.

Tableau 7.6 : Répartition des observations pédologiques en fonction des classes d'intensités de la pente et de son orientation.

<i>Classe d'intensité de la pente</i>	<i>0 - 0,5</i>	<i>0,5 - 1</i>	<i>> 1</i>	<i>Total</i>
<i>Classe d'orientation de la pente</i>				
<i>0 - 90 (NE)</i>	32 (37 %)	42 (48 %)	13 (15 %)	87
<i>90 - 180 (SE)</i>	32 (26 %)	54 (43 %)	39 (31 %)	125
<i>180 - 270 (SO)</i>	17 (17 %)	21 (20 %)	64 (63 %)	102
<i>270 - 360 (NO)</i>	04 (15 %)	06 (22 %)	17 (63 %)	27
<i>Total</i>	85	123	133	341

Tableau 7.7 : Répartition des individus de la population en fonction des classes d'intensités de la pente et de son orientation.

<i>Classe d'intensité de la pente</i>	<i>0 - 0,5</i>	<i>0,5 - 1</i>	<i>> 1</i>	<i>Total</i>
<i>Classe d'orientation de la pente</i>				
<i>0 - 90 (NE)</i>	2750 (25 %)	5503 (50 %)	2665 (25 %)	10918
<i>90 - 180 (SE)</i>	3337 (24 %)	6359 (46 %)	4163 (30 %)	13859
<i>180 - 270 (SO)</i>	2043 (18 %)	4343 (38 %)	4926 (44 %)	11312
<i>270 - 360 (NO)</i>	1540 (22 %)	2377 (34 %)	3095 (44 %)	7012
<i>Total</i>	9670	18582	14849	43101

L'étude de la variation de l'épaisseur moyenne de *AL* simultanément en fonction de l'intensité de la pente et de son orientation (Tab. 7.8) montre que l'intensité de la pente est plus déterminante que son orientation dans la variation de l'épaisseur moyenne de *AL*. En effet, nous constatons que, quelle que soit l'orientation de la pente (le versant), l'épaisseur moyenne de *AL* diminue avec l'intensité de la pente. Une variation de l'épaisseur de *AL* en fonction de l'orientation n'est perceptible que pour des pentes supérieures à 1 %.

2.1.2 : L'altitude

Concernant l'attribut morphologique altitude (*Alt*), nous constatons que l'épaisseur de l'argile limoneuse (*EPAL*) est en relation linéaire ($r = 0,31$) significativement différente de zéro avec l'altitude (Tab. 7.4). Cette relation signifie que *EPAL* est plus importante dans les zones les plus élevées. Cependant, nous remarquons en même temps que les attributs morphologiques altitude et intensité de la pente sont en corrélation négative (Tab. 7.4). Autrement dit, plus on se trouve sur des points hauts et plus les pentes sont de faibles intensités (zones de plateaux). Sachant que les faibles intensités de la pente correspondent à de fortes épaisseurs de l'argile limoneuse, il est logique de constater que *EPAL* et l'altitude évoluent dans le même sens. En terme de modélisation de *EPAL* en fonction des attributs morphologiques par régression multiple par exemple, l'altitude ne devrait pas apporter plus d'information (n'améliore pas l'écart-type d'estimation) que l'intensité de la pente prise seule ou bien avec une composante de l'orientation de la pente.

2.1.3 : Les convexités

Enfin, on note une faible relation linéaire entre la convexité horizontale et *EPAL* (Tab. 7.4). Cependant, nous pouvons douter d'une façon générale des relations entre les convexités de la pente et *EPAL*, car la pente du secteur d'étude est très douce et une erreur importante pourrait être effectuée lors du calcul des convexités de la pente. On note également une relation très faible entre *EPAL* et le flux cumulatif. Le coefficient de corrélation linéaire est à la limite du seuil de signification. Il ne permet donc pas de retenir le flux cumulatif comme facteur intervenant dans un éventuel processus d'érosion et d'accumulation.

Tableau 7.8 : Répartition de l'argile limoneuse en fonction des classes d'intensité de la pente et de son orientation.

<i>Classes d'intensité de la pente (β %) et de son orientation (φ°)</i>	<i>Statistiques sommaires sur EPAL (cm)</i>	<i>Effectif</i>
$\varphi : 0 - 90$ $\beta : 0 - 0,5$	Moyenne : 99 CV (%) : 15	32 (37 %)
$\varphi : 0 - 90$ $\beta : 0,5 - 1$	Moyenne : 81 CV (%) : 15	42 (48 %)
$\varphi : 0 - 90$ $\beta : > 1$	Moyenne : 64 CV (%) : 20	13 (15 %)
$\varphi : 90 - 180$ $\beta : 0 - 0,5$	Moyenne : 103 CV (%) : 15	32 (26 %)
$\varphi : 90 - 180$ $\beta : 0,5 - 1$	Moyenne : 79 CV (%) : 18	54 (43 %)
$\varphi : 90 - 180$ $\beta : > 1$	Moyenne : 55 CV (%) : 18	39 (31 %)
$\varphi : 180 - 270$ $\beta : 0 - 0,5$	Moyenne : 101 CV (%) : 17	17 (17 %)
$\varphi : 180 - 270$ $\beta : 0,5 - 1$	Moyenne : 74 CV (%) : 20	21 (21 %)
$\varphi : 180 - 270$ $\beta : > 1$	Moyenne : 43 CV (%) : 28	64 (63 %)
$\varphi : 270 - 360$ $\beta : 0 - 0,5$	Moyenne : 109 CV (%) : 15	04 (15 %)
$\varphi : 270 - 360$ $\beta : 0,5 - 1$	Moyenne : 81 CV (%) : 24	06 (22 %)
$\varphi : 270 - 360$ $\beta : > 1$	Moyenne : 54 CV (%) : 35	17 (63 %)

2.1.4 : Synthèse

En résumé, nous pouvons dire que l'argile limoneuse se trouve présente sur l'ensemble des versants avec des épaisseurs variables. Cette épaisseur est plus importante sur les pentes de faibles intensités. Ces dernières sont plus fréquentes sur les versants *NE* et *SE*.

Cette distribution de l'épaisseur de l'argile limoneuse en forte relation avec l'intensité de la pente est difficilement explicable par le jeu de processus hydriques d'érosion. En effet, *EPAL* n'est pas liée aux attributs morphologiques expliquant dans la littérature de tels processus, à savoir la convergence et l'accélération des flux (convexités de la pente) et le dépôt de sédiments (flux cumulatif). De plus dans le cas de notre étude, de tels phénomènes n'ont jamais été évoqués dans la littérature relative à la région. Les différentes prospections pédologiques sur le secteur d'étude n'ont jamais signalé la présence de signes d'érosion hydrique, ni d'épaississements particuliers du sol dans les fonds de talwegs. Cela aurait alors supposé un départ de l'argile limoneuse des versants à pente relativement forte et une accumulation dans les fonds. Seul un sous-tirage karstique pourrait éventuellement expliquer l'absence de

colluvions. Toutefois, il n'expliquerait pas l'épaississement de l'argile limoneuse selon l'orientation de la pente.

D'après Macaire (1972), la mise en place de cette argile limoneuse résulte vraisemblablement de l'action du vent, au cours de la dernière période froide würmienne. Nous pouvons ainsi imaginer qu'initialement un matériau se soit déposé indifféremment sur tous les versants en épousant la forme du relief. A l'origine, il aurait été carbonaté, puis par l'action combinée de la décarbonatation et de la redistribution par le vent, l'argile limoneuse se serait accumulée préférentiellement sur les versants orientés vers le Nord-Est et le Sud-Est qui possèdent des pentes de faible intensité par rapport aux versants Sud-Ouest et Nord-Ouest plus raides.

2.2 : Cartographie de l'épaisseur de l'argile limoneuse sur le secteur de la simulation SPOT

En tout point du secteur de la simulation SPOT, l'ensemble des attributs morphologiques est mesuré avec un pas de 20 m. Sachant qu'il existe des relations linéaires entre *EPAL* et les attributs morphologiques : intensité de la pente, orientation de la pente et altitude (Tab. 7.4), nous pouvons envisager une cartographie de l'épaisseur de l'argile limoneuse sur ce secteur.

En effet, *EPAL* peut être estimée aux endroits non échantillonnés à partir de l'expression suivante :

$$\hat{EPAL} = 16,4 - 43,1\beta + 1,1 \sin \varphi + 0,7 Alt \quad (1)$$

Ce modèle à trois variables explique autant de variabilité ($R^2 = 72 \%$ et écart-type résiduel = 13,31 cm) qu'un sous-modèle avec une seule variable explicative. En effet, le modèle

$$\hat{EPAL} = 112,8 - 44,8\beta \quad (2)$$

qui donne l'épaisseur de l'argile limoneuse en fonction de l'intensité de la pente (attribut morphologique le plus corrélé à *EPAL*), explique 71,7 % de la variabilité totale pour un écart-type résiduel de 13,34 cm.

Ainsi, pour éviter une propagation importante des erreurs éventuelles réalisées lors du calcul des trois attributs morphologiques cités ci-dessus, il est plus prudent d'utiliser l'expression (2) pour cartographier *EPAL* sur la totalité du secteur.

L'expression (2) permet l'obtention de la carte des épaisseurs de l'argile limoneuse (Fig. 7.3). Nous remarquons que la classe d'épaisseur 70 à 90 cm est la plus fréquente sur le secteur. Elle représente environ 40 % de la surface d'étude et l'épaisseur moyenne de l'argile limoneuse est de l'ordre de 74 cm.

LEGENDE

- De 0 à 30 cm
- De 30 à 50 cm
- De 50 à 70 cm
- De 70 à 90 cm
- De 90 à 120 cm

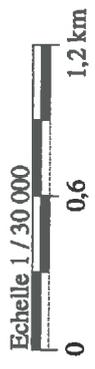
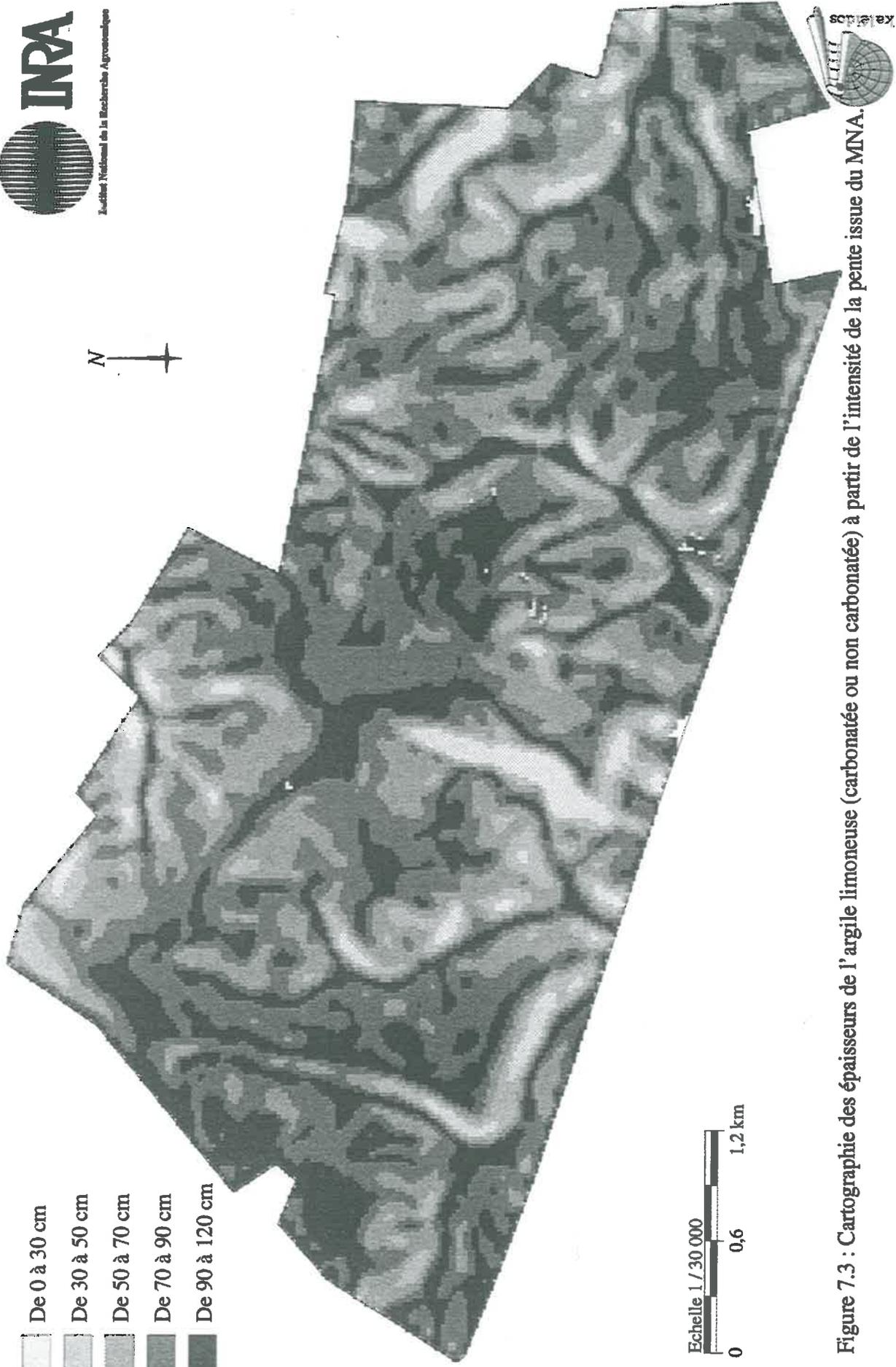


Figure 7.3 : Cartographie des épaisseurs de l'argile limoneuse (carbonatée ou non carbonatée) à partir de l'intensité de la pente issue du MNA.

3. Etude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse non carbonatée en fonction des attributs morphologiques du relief

3.1 : Fréquence de présence de l'argile limoneuse non carbonatée en fonction de l'orientation de la pente

La prospection cartographique a permis de déceler la présence d'une argile limoneuse non carbonatée (*ALNC*) en surface. Cette *ALNC*, bien qu'elle se trouve souvent au dessus d'une argile limoneuse carbonatée (*AL*), peut être rencontrée sur les autres matériaux inventoriés sur le secteur d'étude. Dans ce paragraphe, le raisonnement portera sur la fréquence de présence de l'*ALNC* et non pas sur son épaisseur. Ce choix s'explique par le fait que l'épaisseur de *ALNC* est notée égale à zéro quand elle n'est pas rencontrée dans un sondage pédologique. La présence de grand nombre de valeurs à zéro dans les données est une gêne pour les calculs statistiques. De plus, d'un point de vue conceptuel une valeur zéro de l'épaisseur d'un horizon n'a pas de sens.

Ainsi, il est remarqué que *ALNC* est plus fréquente sur les versants Nord-Est. Cette constatation est confirmée par la figure 7.4a qui montre la fréquence relative de présence de *ALNC* par classe d'orientation de la pente. En effet, nous remarquons que l'argile limoneuse non carbonatée est plus fréquente dans la gamme des orientations comprise entre 20 et 100 degrés, c'est-à-dire sur les versants orientés vers le Nord-Est avec un maximum dans la classe d'orientation de la pente comprise entre 60 et 80 degrés par rapport au Nord. Cette fréquence de présence chute progressivement sur les versants orientés vers le Sud-Est et le Sud-Ouest pour atteindre un minimum (22 %) dans la classe d'orientation 220 à 240 degrés. La fréquence relative de présence de l'argile limoneuse non carbonatée (*FPALNC*) augmente de nouveau sur les versants orientés Ouest et Nord-Ouest sans atteindre les valeurs rencontrées sur les versants Nord-Est. L'angle moyen de distribution maximale de *FPALNC* est égale à 75 degrés.

3.2 : Cartographie de la fréquence de présence de l'argile limoneuse non carbonatée sur le secteur de la simulation SPOT

Le degré de liaison entre la fréquence de présence de l'argile limoneuse non carbonatée (variable linéaire) et la classe d'orientation de la pente (variable circulaire) peut être calculé par le coefficient de corrélation proposé par Mardia (1976) et Johnson & Wehrly (1977). Ce coefficient est défini par l'expression $r^2 = (r_x^2 + r_y^2 - 2r_x r_y r_{xy}) / (1 - r_{xy}^2)$ dans laquelle :

$r_x = \text{corrélation}(y, \cos \varphi)$; $r_y = \text{corrélation}(y, \sin \varphi)$; $r_{xy} = \text{corrélation}(\cos \varphi, \sin \varphi)$, y et φ sont respectivement la variable linéaire et la variable circulaire.

La quantité nr^2 ($n = \text{nombre d'individus}$) est ainsi calculée puis comparée à la valeur critique de la table "X Circular-linear correlation" Batschelet (1981).

Dans notre cas, la statistique nr^2 est égale à 15,7 et la valeur critique pour $\alpha = 5\%$ est égale à 5,7. Nous pouvons ainsi dire que la relation entre la variable linéaire 'fréquence relative de présence de l'argile limoneuse non carbonatée' et la classe d'orientation de la pente est significativement différente de zéro.

L'existence d'une telle relation et l'allure générale de la courbe (Fig. 7.4a) laissent supposer que cette dernière peut être modélisée par un polynôme trigonométrique de forme générale :

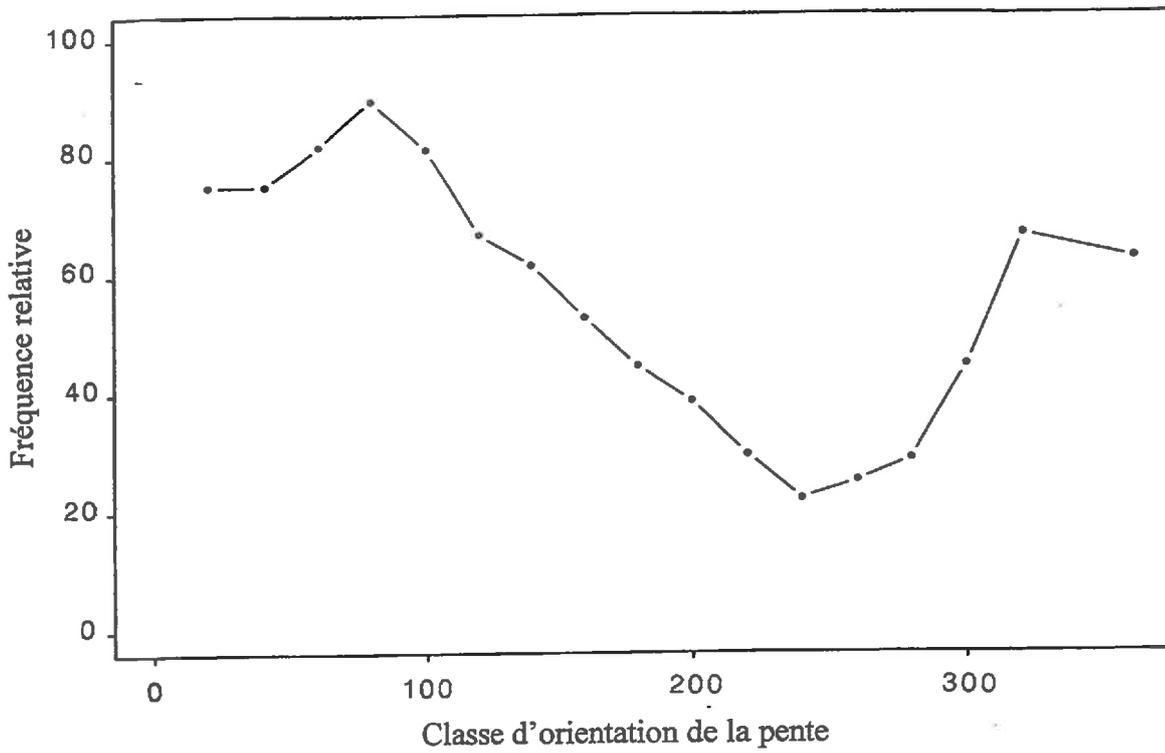


Figure 7.4a : Fréquence de présence de l'argile limoneuse non carbonatée en fonction de l'orientation de la pente.

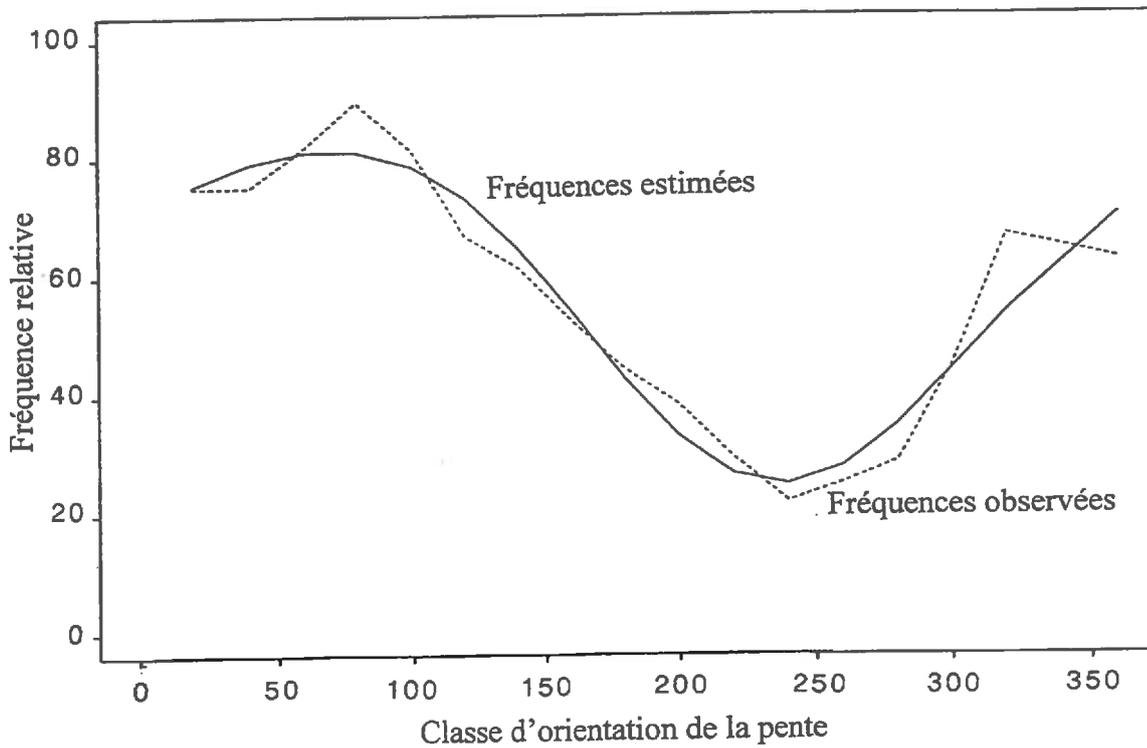


Figure 7.4b : Ajustement des fréquences relatives observées par un polynôme trigonométrique.

$$FPALNC = M + X_1 \cos(\varphi) + X_2 \cos(2\varphi) + \dots + X_n \cos(n\varphi) + Y_1 \sin(\varphi) + Y_2 \sin(2\varphi) + \dots + Y_n \sin(n\varphi).$$

Si nous nous fixons quatre harmoniques de Fourier pour notre modèle, ce dernier aura pour expression :

$$FPALNC = M + X_1 \cos(\varphi) + X_2 \cos(2\varphi) + Y_1 \sin(\varphi) + Y_2 \sin(2\varphi). \quad (3)$$

Pour déterminer (M , X_1 , X_2 , Y_1 et Y_2), nous utilisons la technique classique d'ajustement de données basée sur le principe des moindres carrés. Autrement dit, nous minimisons la somme des carrés des écarts de (3), soit :

$$S = \sum_{i=1}^n [M + X_1 \cos(\varphi) + X_2 \cos(2\varphi) + Y_1 \sin(\varphi) + Y_2 \sin(2\varphi) - FPALNC]^2 = 0. \quad (4)$$

Pour trouver le minimum de S et par conséquent (M , X_1 , X_2 , Y_1 et Y_2), nous appliquons les différentielles et nous annulons les ($K+1$) dérivées partielles à savoir :

$$\frac{\partial S}{\partial M} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial X_1} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial X_2} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial Y_1} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial Y_2} = 0.$$

Le calcul effectué, nous obtenons le modèle donnant la fréquence de présence de l'argile limoneuse non carbonatée ($FPALNC$) en fonction de l'orientation de la pente (φ) :

$$FPALNC = 56 + 13,5 \cos(\varphi) + 0,5 \cos(2\varphi) + 24,6 \sin(\varphi) - 3,3 \sin(2\varphi). \quad (5)$$

Ce modèle qui explique 94 % de la variation totale (Fig. 7.4b) pour un écart-type résiduel de 5,2 %, permet une cartographie des fréquences de présence de $ALNC$ en fonction de l'orientation de la pente (Fig. 7.4c).

La comparaison de la carte des épaisseurs de l'ensemble argilo-limoneux (AL) et de la carte des fréquences de présence de l'argile limoneuse non carbonatée ($ALNC$) montre (Fig. 7.5) qu'une fréquence de présence de $ALNC$ supérieure à 50 % peut être rencontrée avec une probabilité de :

- 0,7 quand AL possède une épaisseur supérieure à 70 cm,
- 0,5 quand AL possède une épaisseur comprise entre 50 et 70 cm,
- 0,4 quand AL possède une épaisseur inférieure à 50 cm.

Cette comparaison confirme les constatations faites sur le terrain à savoir que : (1) la fréquence de présence de $ALNC$ est souvent associée à l'épaisseur de AL ; (2) $ALNC$ peut reposer directement sur les autres matériaux notamment aux endroits où AL est peu épaisse, ce cas de figure reste peu fréquent ; (3) la fréquence de présence de $ALNC$ n'atteint jamais les 100 % quelle que soit la classe d'orientation de la pente considérée sur le domaine d'étude. Enfin, il faut signaler que la probabilité de rencontrer une $ALNC$ avec une fréquence de présence supérieure à 50 % est élevée (0,4) même quand $EPAL$ possède une épaisseur inférieure à 30 cm.

LEGENDE

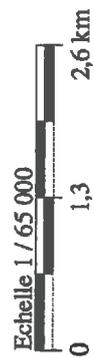
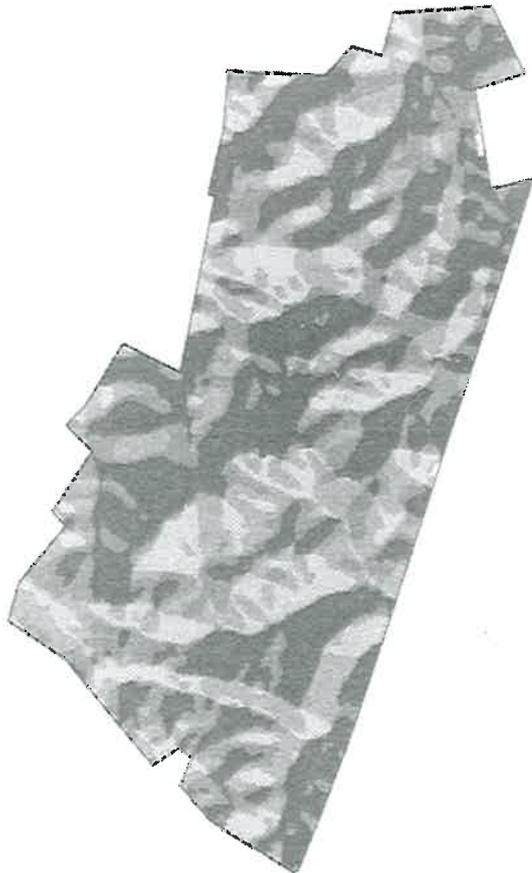


Figure 7.4c : Cartographie des fréquences de présence de l'argile limoneuse non carbonatée en fonction de l'orientation de la pente issue du MNA.

LEGENDE

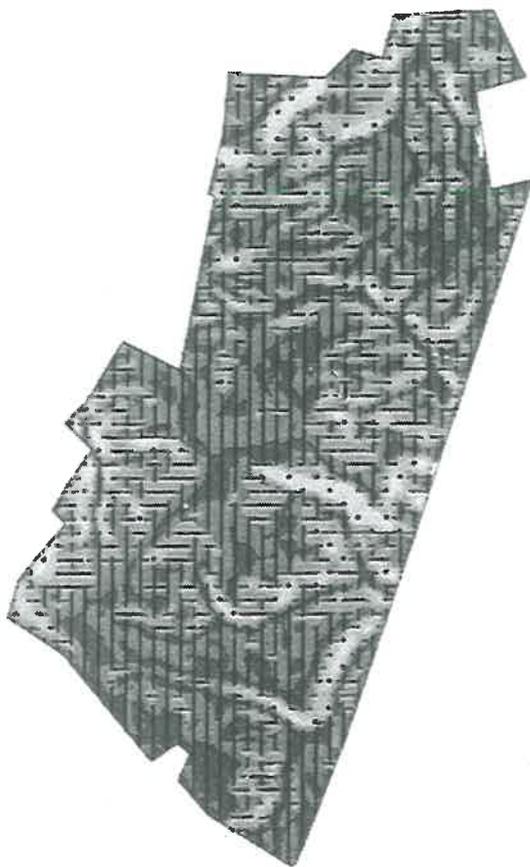
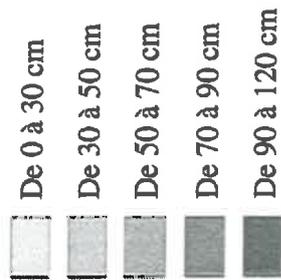


Figure 7.5 : Comparaison des épaisseurs de l'ensemble argilo-limoneux et des fréquences de présence de l'argile limoneuse non carbonatée.

4. Distribution spatiale des différents matériaux en fonction des attributs morphologiques du relief

Dans ce paragraphe, nous étudions la distribution spatiale des différents matériaux inventoriés sur le secteur d'étude en fonction des attributs morphologiques du relief.

L'examen de la distribution spatiale des matériaux cryoturbés, des calcaires pulvérulents et de la formation argilo-sableuse sous-jacents à l'argile limoneuse carbonatée ou non carbonatée en fonction de l'orientation de la pente montre que les différents matériaux sont rencontrés sur tous les versants (Tab. 7.9). Ils sont moins fréquents à absents sur les versants *NO*. Cela étant, ces versants ne représentent qu'environ 16 % de la surface du secteur d'étude (Tab. 7.5). Autrement dit, ils ont une plus forte probabilité de ne pas être prospectés au cours des campagnes de cartographie.

Les matériaux cryoturbés et les calcaires pulvérulents semblent être plus fréquents sur les versants *SE* (Tab. 7.9). Cependant, nous ne pouvons pas conclure car ces versants sont aussi les plus représentés sur le secteur d'étude (33 % de la surface totale, cf. tableau 7.5).

La formation argilo-sableuse (*FAS*) est plus fréquente sur les versants orientés vers le *NE* et elle est totalement absente sur les versants *NO* (Tab. 7.9). De plus, nous constatons que 83 % des sondages pédologiques où *FAS* a été observée sont situés en des endroits où l'altitude est supérieure à 130 m (zones les plus élevées du secteur d'étude et qui correspondent aux zones de plateaux). Toutefois, nous ne pouvons pas conclure à une distribution de cette formation en relation avec l'orientation de la pente et l'altitude car : (1) le nombre d'observations relatif à cette formation est réduit ; (2) son extension géographique est limitée dans le domaine d'étude.

Tableau 7.9 : Répartition des matériaux par classe d'orientation de la pente.

<i>Orientation de la pente</i> (°)	<i>0 - 90</i> (<i>NE</i>)	<i>90 - 180</i> (<i>SE</i>)	<i>180 - 270</i> (<i>SO</i>)	<i>270 - 360</i> (<i>NO</i>)	<i>Total</i>
<i>Matériaux</i>					
<i>MC</i>	29 (24 %)	52 (44 %)	30 (25 %)	09 (7 %)	120 (100 %)
<i>CP</i>	24 (22 %)	40 (37 %)	35 (32 %)	10 (9 %)	109 (100 %)
<i>FAS</i>	15 (66 %)	4 (17 %)	4 (17 %)	/	23 (100 %)

Pour l'intensité de la pente, nous pouvons dire que les matériaux cryoturbés et les calcaires pulvérulents sont rencontrés sur toutes les catégories de pentes. Le tableau 7.10 indique que ces deux matériaux sont plus fréquents sur les pentes dont l'intensité est supérieure à 1 %. Toutefois, il est normal de rencontrer plus souvent ces matériaux sur cette catégorie de pente car l'ensemble argilo-limoneux y est moins épais, tandis que sur les pentes de faible intensité, l'ensemble argilo-limoneux est plus épais et souvent les matériaux sous-jacents ne sont pas atteints à la tarière.

La formation argilo-sableuse est plus fréquente sur les pentes de faibles intensité (Tab. 7.10). Ceci est prévisible étant donné que nous avons noté ci-dessus que cette formation est plus

fréquente sur les versants *NE* qui se caractérisent, comme nous l'avons souligné le long de ce chapitre, par des intensités de pentes faibles.

Tableau 7.10 : Répartition des matériaux par classe d'intensité de la pente.

<i>Intensité de la pente(%)</i>	<i>0 - 0,5</i>	<i>0,5 - 1</i>	<i>> 1</i>	<i>Total</i>
<i>Matériaux</i>				
<i>MC</i>	18 (15 %)	47 (39 %)	55 (46 %)	120 (100 %)
<i>CP</i>	16 (15 %)	40 (37 %)	53 (48 %)	109 (100 %)
<i>FAS</i>	09 (39 %)	11 (48 %)	03 (13 %)	23 (100 %)

De cette étude succincte, il ressort que la distribution spatiale des différents matériaux inventoriés sur le secteur d'étude est indépendante des attributs morphologiques du relief : intensité de la pente et son orientation. Pour la formation argilo-sableuse, bien qu'il semble qu'elle occupe les zones de plateau caractérisées par une faible intensité de la pente et correspondant aux versants orientés *NE*, nous ne pouvons pas conclure à une répartition spatiale en relation avec les attributs morphologiques du relief car, cette formation occupe des surfaces réduites sur le secteur d'étude.

Conclusions du chapitre VII

L'étude de la distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux (*AL*) selon le facteur pédogénétique "relief" montre que l'épaisseur de cet ensemble est fortement liée à l'intensité de la pente. Ainsi, *AL* est plus épais aux endroits de faible intensité de la pente. Ces zones de faible intensité de la pente correspondent souvent aux versants orientés Nord-Est à Sud-Est.

Par contre, l'ensemble argilo-limoneux n'est pas en relation avec les attributs "convexités de la pente" et "flux cumulatif" qui sont des indicateurs de processus d'érosion hydrique. D'un point de vue pédogénétique, il serait vraisemblable qu'un matériau se soit mis en place principalement par l'action du vent en épousant la forme du relief. Par la suite, sous l'action combinée de processus de décarbonatation et de redistribution par le vent, l'ensemble argilo-limoneux se serait accumulé sur les versants les moins "raides", c'est-à-dire ceux exposés vers le Nord-Est. Cette hypothèse sera discutée dans le chapitre suivant en analysant l'orientation des vents eux-mêmes.

L'argile limoneuse non carbonatée (*ALNC*) est plus liée à l'attribut morphologique "orientation de la pente". L'angle moyen de distribution maximale de *ALNC* est Nord-Est. Cette distribution est tout à fait logique dans le sens où *ALNC* est souvent associée à l'ensemble argilo-limoneux qui est plus fréquent et plus épais sur les versants Nord-Est.

Les matériaux cryoturbés et les calcaires pulvérulents se distribuent indépendamment des attributs du facteur pédogénétique "relief". Enfin, la formation argilo-sableuse (*FAS*) semble se localiser dans les zones de plateaux qui occupent les endroits les plus élevés du secteur d'étude. Cela dit, le nombre réduit de points où *FAS* a été observée et son extension géographique limitée dans le domaine d'étude ne permettent pas de conclure réellement.

Chapitre VIII : Autres facteurs pédogénétiques et synthèse relative aux résultats de la deuxième partie

Introduction

Dans ce chapitre l'objectif est de discuter d'autres facteurs pédogénétiques qui auraient affecté la distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux (*AL*) sur le secteur d'étude. Il s'agit principalement d'hypothèses relatives aux facteurs pédogénétiques "climat" et "action anthropique". Pour le facteur pédogénétique "climat", nous nous intéressons particulièrement à : (1) comparer la direction moyenne des vents dominants actuels et la répartition spatiale de *AL* ; (2) étudier la distribution granulométrique le long d'un transect ; (3) étudier la relation entre l'énergie solaire reçue selon l'orientation des versants et la distribution spatiale de *AL*. Pour le facteur "anthropique", nous limitons notre étude à l'examen des chemins et des bords de parcelles à l'origine d'une variation de l'épaisseur de *AL*.

Enfin, dans un deuxième paragraphe, nous réalisons une synthèse relative aux résultats de l'ensemble des chapitres de la deuxième partie de ce travail, c'est-à-dire ceux qui abordent la recherche des lois de distribution spatiale des sols selon les principaux facteurs pédogénétiques.

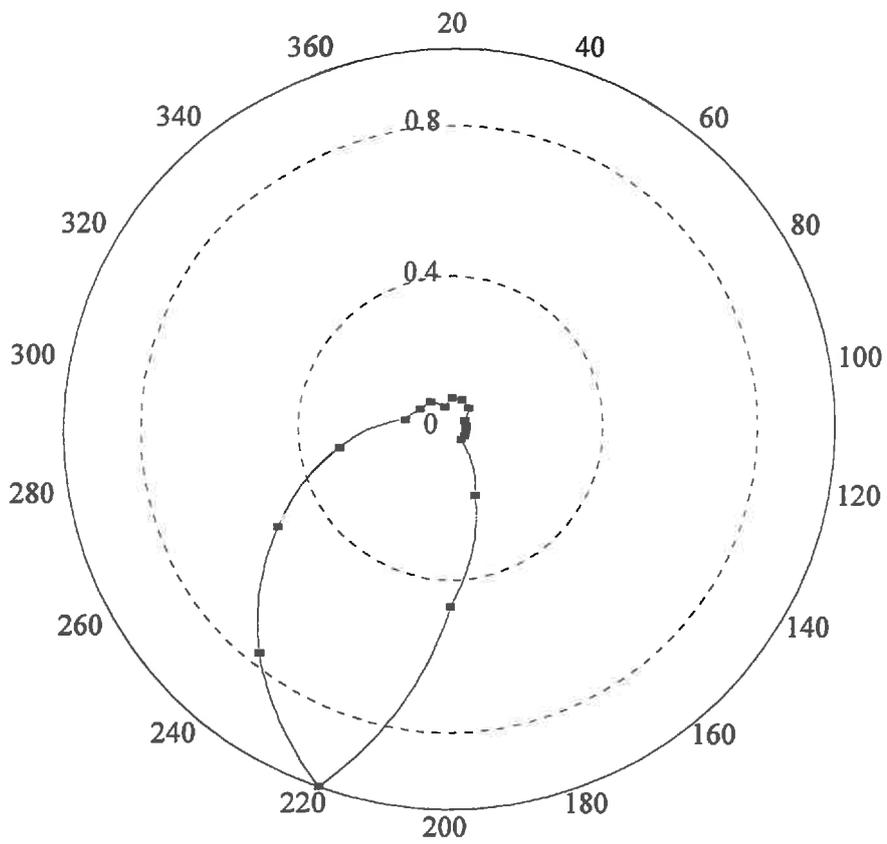


Figure 8.1 : Fréquences moyennes des directions du vent fort (%).

1. Relation entre la distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux et les facteurs pédogénétiques "climat" et "action anthropique"

1.1 : Direction des vents dominants actuels dans la zone d'étude

L'analyse des fréquences moyennes des vents forts pendant l'année (Fig. 8.1) montre que les vents forts se répartissent entre les orientations comprises entre 200 et 280°, c'est-à-dire entre le Sud-Ouest et l'Ouest. L'angle moyen de la direction des vents est calculé suivant la méthode exposée dans le chapitre VI et pondéré par les valeurs des fréquences. La valeur obtenue est égale à 243 degrés par rapport au Nord. Cet angle est à 12 degrés près diamétralement opposé à la direction maximale (75°) de distribution de l'argile limoneuse non carbonatée "ALNC" (cf. chapitre VII, paragraphe 3.1).

Le paramètre climatique "vent" est selon plusieurs auteurs à l'origine du dépôt initial de la formation limoneuse. Les directions quasi opposées entre "orientation des vents actuels" et "fréquence de ALNC" tendraient à confirmer l'hypothèse d'une redistribution des matériaux par le vent.

La présence d'épaisseurs plus importantes sur les versants se trouvant sous le vent, s'expliquerait en partie par le fait que la direction Sud-Ouest des vents aurait favorisé le départ de l'argile limoneuse des versants orientés vers le Sud-Ouest à pente relativement forte et par conséquent son accumulation sur les versants opposés (Nord-Est) caractérisés par des pentes douces.

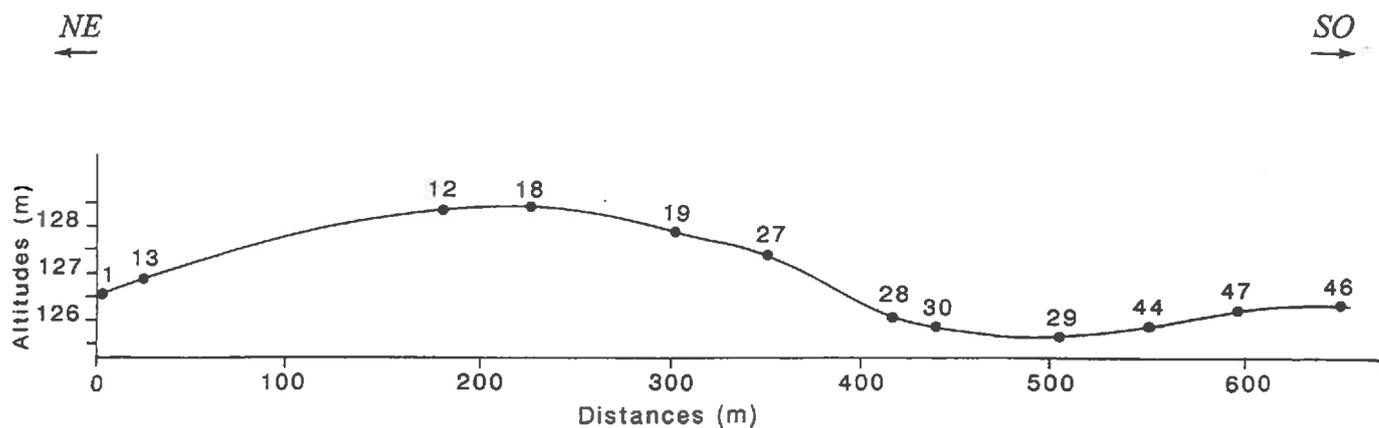
L'utilisation de rosace pour des vents "actuels" certes ne permet pas de conclure sur l'âge de ces distributions. Nous observons actuellement des nuages de poussières à certaines périodes favorables comme la fin de l'été ou en début d'automne. Ce phénomène de transport éolien serait en effet plus favorable en période sèche et au moment où les sols sont nus. Cela dit, l'étude du facteur pédogénétique "climat" est difficile à mener en l'absence de mesures sur les quantités de matières déplacées.

1.2 : Distribution granulométrique le long d'un transect

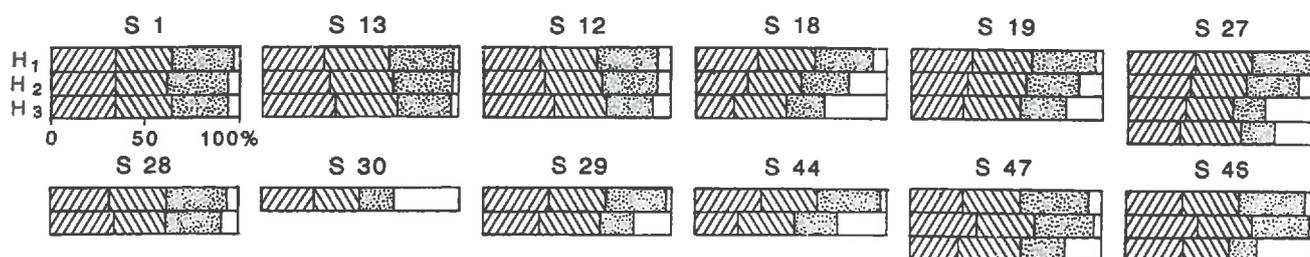
Pour étudier la distribution granulométrique, douze sondages pédologiques (Fig. 8.2a) ont été réalisés le long d'un transect recoupant la topographie (NE / SO). La granulométrie avant et après décarbonatation des douze sondages pédologiques a été effectuée pour les cinq fractions (argile, limon fin, limon grossier, sable fin et sable grossier).

L'idée est d'examiner les variations de la teneur en argile, en limon fin et en limon grossier au sein de chaque sondage le long du transect. L'hypothèse sous-jacente, en relation avec une redistribution éventuelle de la couverture limoneuse par le vent, est de trouver un enrichissement particulièrement en limon grossier (a priori la fraction la plus affectée par un transport éolien en absence de sables) au niveau des horizons de surface des sondages sur les versants orientés NE. Par conséquent, un appauvrissement en cette fraction au niveau des sondages qui se trouvent sur le versant SO.

La figure 8.2b montre les variations des teneurs en limon grossier avant et après décarbonatation des horizons de surface. Nous remarquons que les sondages pédologiques sur le versant NE (1, 13, 12, 47 et 46) possèdent des teneurs en limon grossier un peu plus élevées que les sondages sur le versant SO. Cette différence reste peu significative. En effet, pour onze sondages sur douze la teneur en limon grossier varie entre 32 et 36 % du total de la terre fine.



Avant décarbonatation



Après décarbonatation

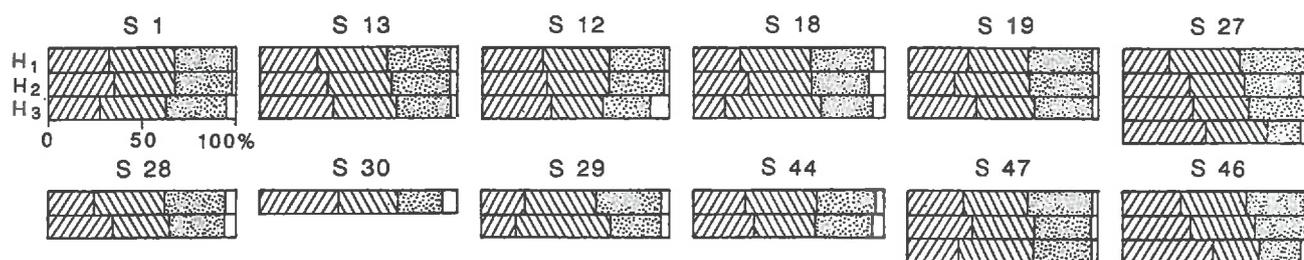


Figure 8.2a : Distribution granulométrique avant et après décarbonatation le long d'un transect orienté Nord-Est / Sud-Ouest.

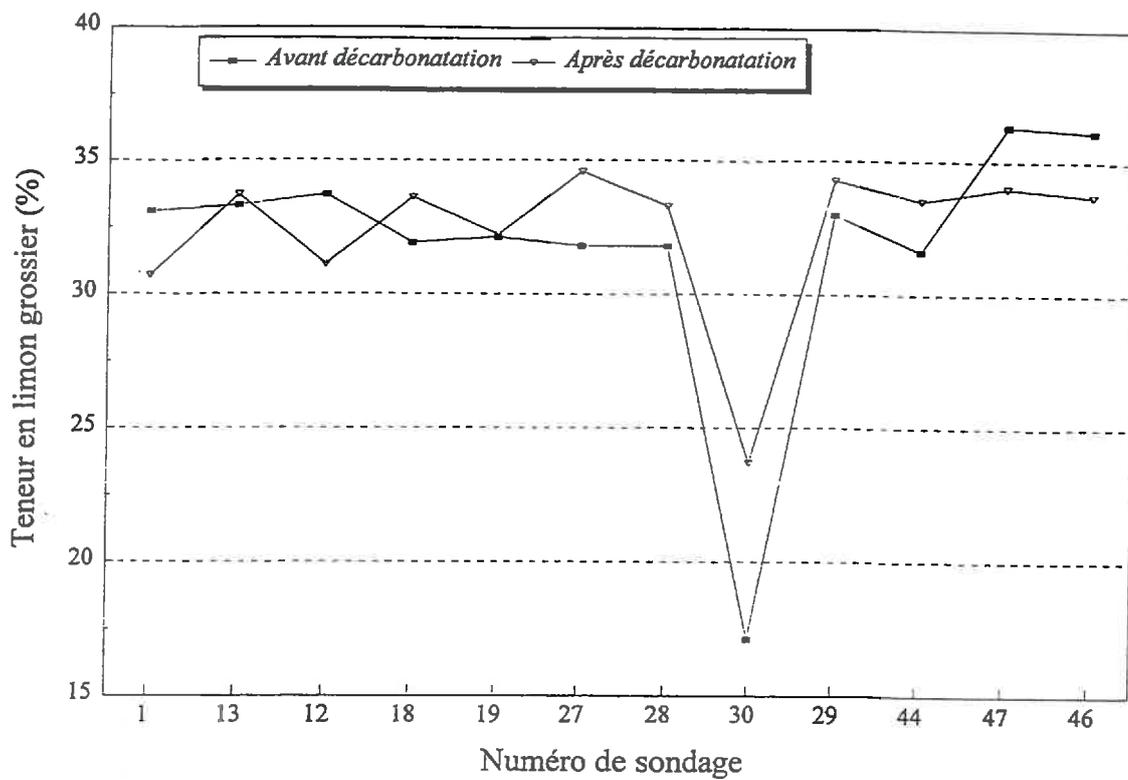


Figure 8.2b : Variation de la teneur en limon grossier avant et après décarbonation au sein des horizons de surface.

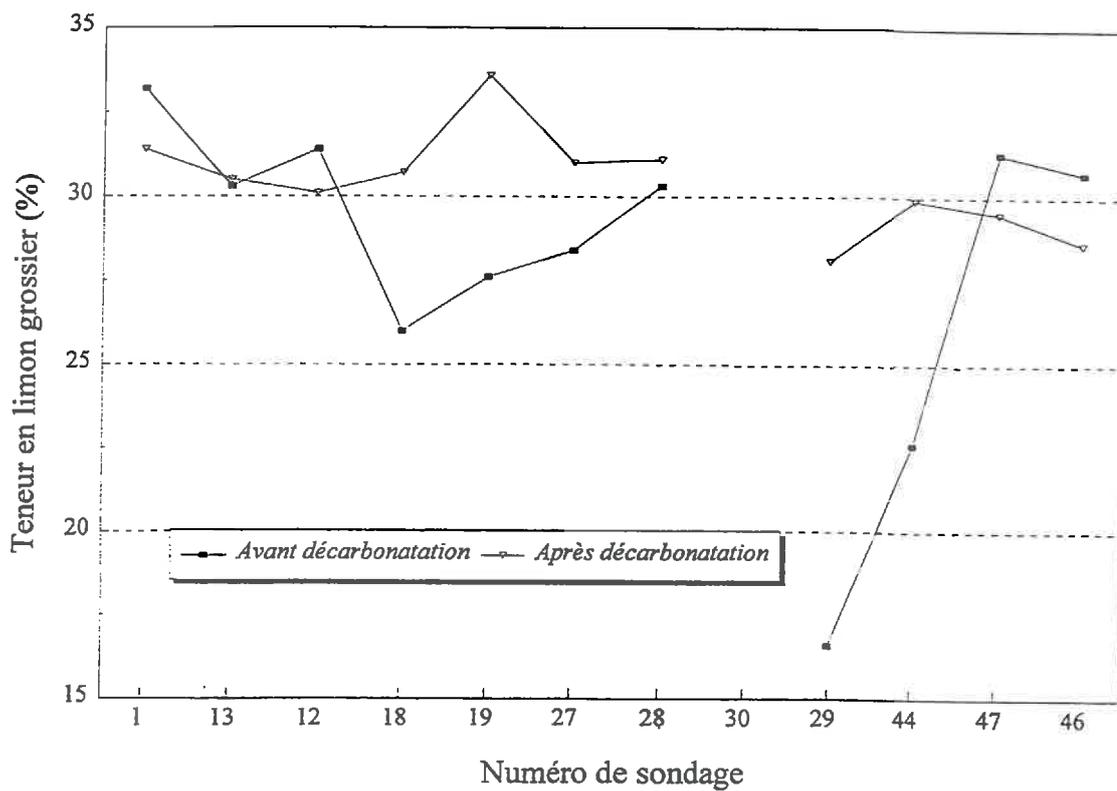
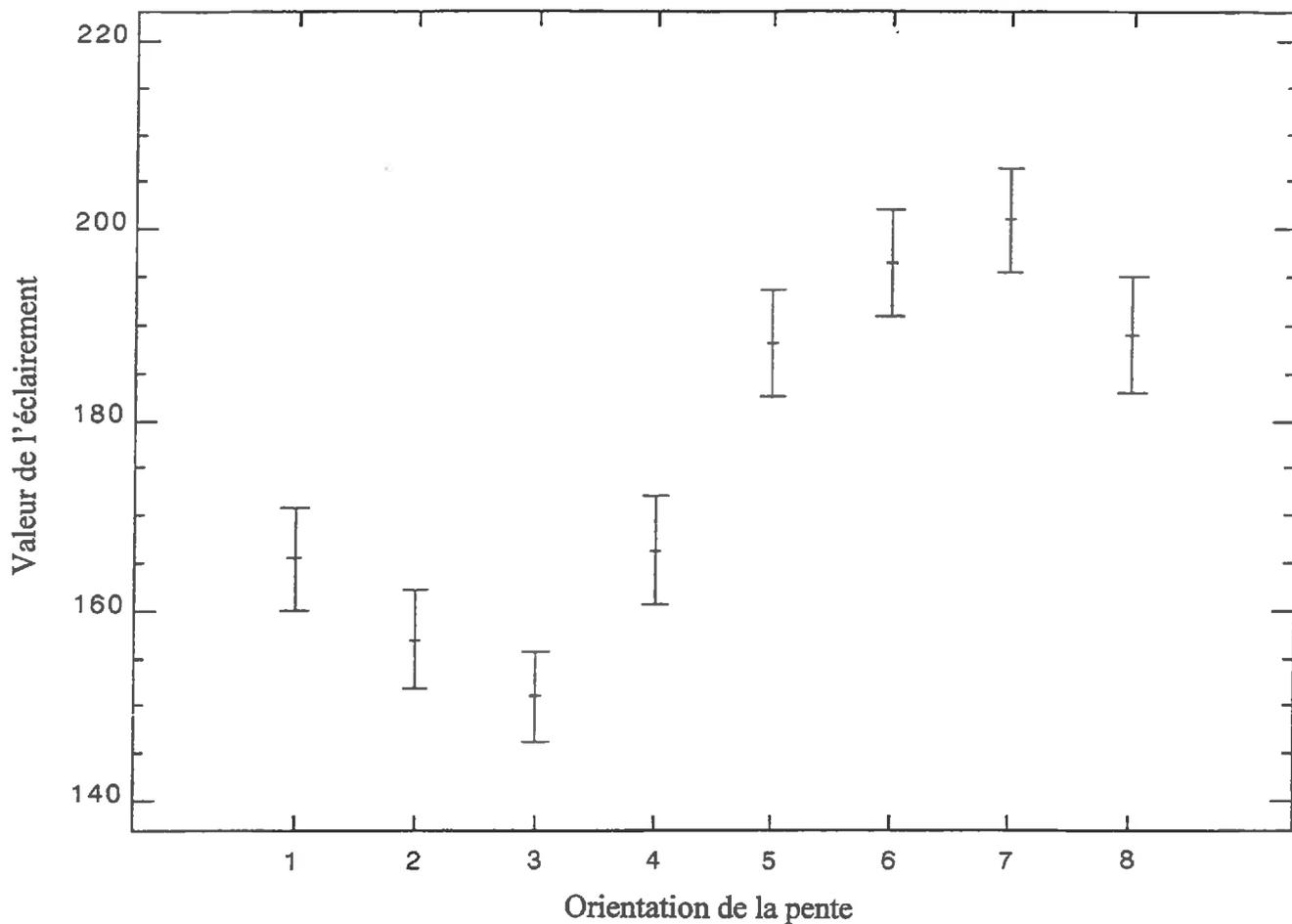


Figure 8.2c : Variation de la teneur en limon grossier avant et après décarbonation au sein des horizons de profondeur.



Légende

- 1 : *Orientation Nord / Nord-Est*
- 2 : *Orientation Nord-Est / Est*
- 3 : *Orientation Est / Sud-Est*
- 4 : *Orientation Sud-Est / Sud*
- 5 : *Orientation Sud / Sud-Ouest*
- 6 : *Orientation Sud-Ouest / Ouest*
- 7 : *Orientation Ouest / Nord-Ouest*
- 8 : *Orientation Nord-Ouest / Nord*

Figure 8.3 : Comparaison multiple (test de Tukey) des valeurs moyennes d'éclairé en fonction de l'orientation de la pente.

De plus, après décarbonatation la distribution annoncée ci-dessus n'est plus évidente (Fig. 8.2b).

Les horizons de surface sont remaniés par le travail du sol, et une différenciation granulométrique n'est pas facile à mettre en évidence. Nous avons donc considéré les horizons de profondeur au sein desquels nous avons examiné particulièrement la variation de la fraction limon grossier (Fig. 8.2c). Les résultats montrent qu'avant décarbonatation, nous constatons le même phénomène à savoir que la fraction limon grossier est plus importante au niveau des sondages sur le versant exposé vers le *NE*. Cependant, comme pour les horizons de surface, le phénomène n'est plus évident après décarbonatation.

Cette étude tendrait à confirmer l'hypothèse d'une redistribution par le vent. Toutefois, les différences granulométriques entre versants restent extrêmement faibles. Par ailleurs, l'étude est géographiquement limitée et mériterait un échantillonnage plus important.

1.3 : Estimation de l'énergie solaire selon l'orientation des versants

La dissymétrie des versants dans le Bassin Parisien est un phénomène largement répandu. Le facteur évoqué est celui de cycles gel-dégel pendant les périodes périglaciaires. Les versants exposés au Nord auraient moins subi ces cycles à l'opposé des versants Sud soumis à un ensoleillement diurne plus important qu'au Nord.

Malgré l'intensité très faible des pentes du secteur étudié en Petite Beauce, nous avons voulu tester cette hypothèse en estimant l'énergie solaire reçue selon l'orientation des versants. Cette énergie solaire est estimée au travers de la fonction "Hillshade" du module Grid du SIG Arc/Info. Pour cela, nous fixons l'azimut de la source de lumière et l'angle de la source d'éclairement au dessus de l'horizon. Dans le cas que nous présentons ici, l'azimut est fixé à 270 degrés par rapport au Nord dans le sens des aiguilles d'une montre et l'angle d'éclairement à 45 degrés. Ce calcul nécessite évidemment la connaissance de l'altitude en tout point du secteur d'étude (MNA). Le résultat de cette application donne des valeurs variant de 0 à 255, avec 0 représentant les zones qui reçoivent le moins d'énergie et 255 les zones les plus lumineuses.

Le croisement des valeurs de l'énergie solaire et de l'orientation de la pente permet d'informer chaque pixel de la zone d'étude des valeurs de l'éclairement et de l'orientation de la pente. Le tableau 8.1 résume les statistiques sommaires de cette opération. Nous remarquons que les versants dont l'orientation est comprise entre 45 et 135 degrés (*NE / SE*) sont les moins éclairés en moyenne tandis que les versants *SO / NO* reçoivent le maximum d'éclairement en moyenne.

La comparaison multiple des moyennes (Fig. 8.3) montre particulièrement que les valeurs moyennes de l'éclairement sur les versants dont l'orientation est comprise entre 45 et 135 degrés (*NE / SE*) sont significativement différentes de celles des versants orientés entre 225 et 315 degrés (*SO / NO*). Nous pouvons ainsi imaginer que les versants entre le *NE* et le *SE* restent plus longtemps sous l'effet du gel par rapport aux versants entre le *SO* et le *NO*. En d'autres termes, l'ensemble argilo-limoneux supérieur (*AL*) serait potentiellement plus protégé (entre autres de l'effet du vent) sur les versants *NE* et *SE* contrairement aux versants *SO* et *NO*.

Tableau 8.1 : Statistiques sommaires du croisement de l'orientation de la pente et de l'ombrage.

<i>Ombrage</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>
<i>Versant</i>				
<i>0 - 45 (N - NE)</i>	132	198	165	18
<i>45 - 90 (NE - E)</i>	120	192	157	21
<i>90 - 135 (E - SE)</i>	105	195	151	24
<i>135 - 180 (SE - S)</i>	134	196	166	18
<i>180 - 225 (S - SO)</i>	153	230	188	19
<i>225 - 270 (SO - O)</i>	166	230	196	18
<i>270 - 315 (O - NO)</i>	166	235	201	19
<i>315 - 360(NO - N)</i>	161	218	189	16

Ce résultat conforte celui obtenu auparavant à savoir que *AL* est plus épais sur les versants *NE* par rapport aux versants *SO*. Cela dit, le résultat est à prendre avec beaucoup de précaution car le paramètre climatique considéré reste très grossier. Une étude plus approfondie impliquant un bilan d'énergie sur une année complète serait nécessaire pour pouvoir conclure réellement.

1.4 : Effet des chemins et des bords de parcelles sur l'épaisseur de AL

Lors de la prospection pédologique, nous avons constaté que les chemins (anciens et actuels) et les bords de parcelles sont toujours surélevés du fait d'un épaissement de l'ensemble argilo-limoneux supérieur (*AL*) en ces endroits. Cet épaissement perturbe non seulement les valeurs de l'épaisseur de *AL* mais il crée aussi un relief artificiel parfois plus accentué que le relief du secteur. Cette accumulation est due aux travaux agricoles, en particulier le labour. En effet, la texture argileuse confère des propriétés adhésives aux sols. Les agriculteurs sont donc amenés à "nettoyer" leurs engins en bout de parcelle déposant ainsi à chaque opération quelques dm³ de terre. Cette pratique était surtout vérifiée autrefois compte tenu d'outils et de moyen de traction moins performants qu'aujourd'hui. Des siècles de pratiques agricoles ont ainsi abouti à la formation de bourrelets le long des bordures de parcelles. Plus la parcelle est ancienne ou plutôt, plus le chemin bordant une parcelle est ancien, plus l'épaissement est important.

La surface de ces chemins et de ces bords de parcelles a été estimée essentiellement en trois grandes étapes : (1) création de vecteurs à partir des points du levé topographique réalisés sur les chemins et les bords de parcelles sur le secteur de 1600 ha ; (2) création d'un "buffer : zone tampon" de 6 m de diamètre autour de chaque vecteur créé ; (3) estimation proprement dite de la surface de l'ensemble des "buffers" créés. Cette surface ne représente qu'environ 3 % (50 ha) de la surface totale (1600 ha). Pour une épaisseur d'environ 70 cm de ces bourrelets, cela ne représente qu'une diminution moyenne de 2 cm de la surface du sol au sein des parcelles ou en terme de volume 200 m³ / ha. Si cette masse déplacée peut apparaître considérable, cela ne représente pas une érosion inquiétante du sol, d'autant plus que le matériau est toujours disponible en bordure des parcelles. Toutefois ce phénomène doit être pris en considération lors de l'acquisition des données ou de l'interprétation des photographies aériennes en vue de réaliser une cartographie détaillée des sols.

2. Synthèse relative aux résultats des chapitres de la deuxième partie

Dans la deuxième partie de notre travail, présentée en cinq chapitres, nous avons procédé successivement à :

1. l'identification et la caractérisation des principaux matériaux et horizons pédologiques sur le secteur d'étude,
2. l'étude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse selon le matériau parental,
3. la définition et la caractérisation des principaux attributs du relief,
4. l'étude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse et des matériaux qui lui sont sous-jacents selon les attributs du relief,
5. poser des hypothèses relatives à d'autres facteurs pédogénétiques et qui auraient vraisemblablement participé à la distribution actuelle des sols dans le secteur d'étude.

Identification et caractérisation des principaux matériaux et horizons pédologiques sur le secteur d'étude

A partir de 172 horizons, une typologie en cinq grands ensembles (*AL*, *MC*, *CP*, *FAS* et *K*) a été établie. Les différentes analyses réalisées au sein de chaque ensemble permettent de dire que l'ensemble argilo-limoneux supérieur est issu de la décarbonatation des calcaires sous-jacents. Ces derniers auraient connu des remaniements durant la période périglaciaire.

Etude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse selon le matériau parental

Cette étude a permis de constater que l'ensemble argilo-limoneux supérieur n'est pas strictement autochtone. En effet, son épaisseur n'est pas liée au type de matériau immédiatement sous-jacent. Cela dit, l'ensemble argilo-limoneux pourrait être remanié. Cette étude a confirmé aussi que le matériau calcaire est hétérogène.

Définition et caractérisation des principaux attributs du relief

La modélisation du relief de la zone d'étude a permis d'acquérir des données numériques en quasi continu sur la topographie de la zone d'étude. Cette modélisation réalisée à partir de deux sources différentes de données d'altimétrie a permis d'une part, de tester deux méthodes d'acquisition d'un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) et, d'autre part elle permettra dans le chapitre X d'évaluer l'effet de la perte de précision du MNA sur la prédiction de la variable sol.

Etude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse et des matériaux qui lui sont sous-jacents selon les attributs du relief

De l'étude de la variation de l'épaisseur de l'argile limoneuse (*EPAL*) en fonction des attributs du relief, il ressort que *AL* est plus épaisse sur les versants orientés Nord-Est caractérisés par des pentes de faible intensité. L'argile limoneuse non carbonatée (*ALNC*) possède un angle moyen de distribution maximale à 75 degrés par rapport au Nord. Comme cette dernière est souvent associée à *AL*, ses plus fortes probabilités de présence avec des fréquences élevées sont dans les endroits où *AL* est épaisse. La formation argilo-sableuse (*FAS*) occupe les zones les plus élevées du secteur d'étude à faible intensité de la pente, cependant son extension géographique est trop limitée pour pouvoir conclure à une distribution en relation avec les attributs du relief. Quant aux autres matériaux (*MC* et *CP*), ils se distribuent indépendamment des attributs du relief.

Autres facteurs à l'origine de la distribution actuelle des sols dans le secteur d'étude

Conscient du fait que la distribution spatiale des sols dans le secteur d'étude peut être sujette à plusieurs hypothèses, nous avons évoqué à la fin de la deuxième partie de ce travail d'autres facteurs, tels que le climat et l'action anthropique. Ces derniers sont susceptibles d'avoir joué un rôle non négligeable dans la distribution actuelle des sols dans le secteur d'étude. Parmi les résultats les plus intéressants à notre sens, il faut signaler la coïncidence à quelques degrés près de l'angle moyen de la direction du vent actuel et l'angle moyen de distribution maximale de l'argile limoneuse.

Synthèse

Nous pouvons ainsi imaginer plusieurs phases successives selon un ou plusieurs cycles climatiques. (1) Tout d'abord, lors d'une phase froide et sèche il y aurait eu la mise en place de matériaux limoneux et calcaires par cryodessiccation. (2) Ensuite sous l'hypothèse de vents périglaciaires ayant la même direction qu'actuellement, ce matériau limoneux se serait distribué en fonction du relief du toit calcaire. Les versants exposés aux vents dominants du Sud-Ouest auraient été décapés pendant que les versants sous le vent auraient été protégés et auraient au contraire servis de lieux de dépôt des sédiments éoliens. Ce matériau éolien aurait ainsi recouvert toutes les formations sous-jacentes, même les formations burdigaliennes piégées dans du karst. (3) Enfin, une phase plus humide avec des alternances de gel et de dégel a pu d'une part, brasser ce matériau par cryoturbation et, d'autre part entraîner sa décarbonatation. La présence d'argile limoneuse carbonatée en profondeur indiquerait que la phase de décarbonatation n'est pas achevée. La présence d'encroûtements calcaires à la limite de l'argile limoneuse et du calcaire sous-jacent peut être expliquée par le phénomène de décarbonatation de l'argile limoneuse. Ce phénomène serait limité par le brassage biologique.

Le vent n'est peut être pas le seul facteur en cause, l'action différentielle du gel selon l'exposition des versants au soleil ou l'installation d'une végétation capable de piéger ou non les particules éoliennes sont autant d'hypothèses qui ont pu accroître la mise en place de l'argile limoneuse selon l'orientation et l'intensité des pentes. Par contre, tous les arguments géomorphologiques indiquent une absence d'érosion hydrique. Le vent reste donc le facteur déterministe le plus probable. Toutefois, il est difficile de vérifier l'âge de ces processus géomorphologiques et pédologiques. En particulier, il serait nécessaire de vérifier si l'action éolienne reste possible dans le contexte actuel d'une agriculture intensive.

TROISIEME PARTIE

MODELISATION SPATIALE ET GENERALISATION

Troisième partie : Modélisation spatiale et généralisation

Chapitre IX : Optimisation de l'estimation de la variable sol : épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux

Introduction

Dans le chapitre VII, nous avons montré l'existence de relations entre l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux supérieur (*EPAL*) et des attributs du relief issus du Modèle Numérique de Terrain. Etant donné que nous disposons d'une information exhaustive sur le relief, la cartographie de *EPAL* est possible sur tout le domaine à partir par exemple d'un modèle de régression. Le résultat de la cartographie à partir d'un tel modèle a montré (*cf. chapitre VII*) qu'il peut rester une variabilité résiduelle assez importante. De ce fait, nous avons envisagé dans ce chapitre d'utiliser trois catégories de méthodes d'estimation pour cartographier *EPAL* sur le secteur d'étude. Ces catégories peuvent être distinguées ainsi :

- les méthodes non spatiales telles que la régression linéaire simple ou multiple,
- les méthodes spatiales particulièrement celles basées sur la théorie des variables régionalisées telles que le krigeage, le cokrigeage, et la méthode de la dérive externe,
- les méthodes qui combinent les approches spatiales (*e.g.* le krigeage) et les approches non spatiales (*e.g.* la régression). Ces méthodes couplées possèdent un potentiel considérable pour minimiser la variance d'estimation (Odeh *et al.*, 1994).

L'objectif de ce chapitre est donc de comparer plusieurs méthodes d'estimation (régression linéaire simple et multiple, cokrigeage, krigeage ordinaire, krigeage ordinaire avec dérive externe, krigeage universel, krigeage universel avec dérive externe et deux modèles régression-krigeage) de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux (*EPAL*) à partir d'un échantillon de 150 individus (échantillon d'estimation) sur une surface de 380 ha. La performance de chacune des méthodes est testée sur la base d'un échantillon de 75 individus (échantillon de validation) à travers : (1) l'erreur moyenne (*ME*) ; (2) la racine carré de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) ; (3) le rang moyen de chaque méthode d'estimation (R_j) et les écarts-types des rangs (*SD*).

1. Théorie des méthodes utilisées

Dans ce paragraphe, nous présentons les méthodes utilisées pour estimer la variable *EPAL*, soit directement à partir des données mesurées d'épaisseur, soit en utilisant les relations *EPAL* et attributs morphologiques dérivés à partir du MNT. Il faut signaler que la plupart des méthodes utilisées ici sont connues et largement utilisées en science du sol à l'exception de la méthode de la dérive externe et des méthodes couplées. Cela dit, nous allons accorder un niveau de présentation relativement identique à l'ensemble des méthodes utilisées.

1.1 : Régression linéaire multiple

Soit z la variable à estimer, cette variable est connue en i points $i=1, 2, \dots, n$ d'un domaine spatial (D) et X est la matrice $p \times n$ des p variables indépendantes (variables explicatives). Le modèle de régression linéaire multiple reliant z à X s'écrit sous la forme suivante :

$$z = \alpha + X\beta + \varepsilon, \quad (1)$$

α et β sont des constantes et ε est le terme des résidus qui devraient être de moyenne nulle et de variance constante. Les coefficients de régression partielle ne sont pas connus a priori, mais ils peuvent être estimés par la méthode des moindres carrés. Ainsi le modèle (1) peut être utilisé pour estimer z aux endroits où seules les variables explicatives sont connues.

1.2 : Géostatistiques stationnaires

Les techniques de géostatistique sont une application de la Théorie des Fonctions Aléatoires à des données spatiales et/ou temporelles. La géostatistique procède en deux étapes : (1) l'analyse variographique au travers du variogramme, qui est une description de la variabilité moyenne d'un phénomène en fonction de l'échelle spatiale et/ou temporelle ; (2) le ou les krigeages qui sont des méthodes de régression pour estimer les valeurs d'un phénomène en tout endroit d'une région (du nom de l'ingénieur des mines D.G. KRIGE).

Le développement des sous paragraphes ci-dessous est réalisé sur la base de l'ouvrage '*Multivariate Geostatistics*' (Wackernagel, 1995). Les traitements géostatistiques sont réalisés grâce au logiciel "*Isatis*" développé par l'Ecole des Mines de Paris et commercialisé par Géovariances.

1.2.1 : Modèle linéaire de régionalisation

a. Variogramme expérimental

Pour mesurer la variabilité à différentes échelles d'une variable régionalisée $z(\mathbf{x})$, on réalise une mesure de dissemblance entre deux données z_1 et z_2 situées en deux points \mathbf{x}_1 et \mathbf{x}_2 d'un domaine spatial (D). Cette dissemblance entre deux valeurs, désignée par γ^* , vaudra

$$\gamma^* = \frac{(z_2 - z_1)^2}{2}, \quad (2)$$

c'est-à-dire la moitié du carré de la différence entre les deux valeurs.

On fait dépendre la dissemblance γ^* de la distance et de l'orientation d'une paire de points, décrits par le vecteur $\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1$, indifféremment de la position de la paire dans le domaine étudié

$$\gamma^*(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} [z(\mathbf{x}_1 + \mathbf{h}) - z(\mathbf{x}_1)]^2. \quad (3)$$

En formant la moyenne des dissemblances γ^* entre les valeurs pour les n_h paires de points reliées par un vecteur \mathbf{h} donné pour une maille donnée (avec, le cas échéant, une certaine tolérance sur la longueur et l'angle du vecteur), on obtient la notion de variogramme expérimental

$$\gamma^*(\mathbf{h}) = \frac{1}{2n_h} \sum_{\alpha=1}^{n_h} [z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - z(\mathbf{x})]^2. \quad (4)$$

Habituellement, on observe que la dissemblance des valeurs augmente en moyenne en fonction de l'éloignement spatial des points de mesure et atteint fréquemment un palier de variation aux grandes distances. Lorsque la pente du variogramme change abruptement, on peut penser à des paliers intermédiaires.

Le comportement aux faibles distances, près de l'origine du variogramme, est d'une importance capitale, car il est indicateur du degré de continuité de la variable régionalisée, à savoir : différentiable, continue mais non différentiable, ou carrément discontinue. Dans ce dernier cas on aura affaire à une variable régionalisée donnant lieu à un effet de pépité, symptôme des valeurs changeant abruptement à très petite distance par rapport à la maille (comme les teneurs de l'or lorsqu'il y a des pépites).

Lorsque la dissemblance moyenne des valeurs est constante pour toutes les distances $|\mathbf{h}|$, il y a une absence complète de structuration spatiale des valeurs. A l'inverse, une pente non nulle du variogramme près de l'origine indique une structuration des données. Un changement soudain de la pente du variogramme indique le passage à une structuration des valeurs de nature différente.

Ces transitions seront d'abord modélisées par des variogrammes gigognes, puis les différents types de structuration spatiale des valeurs pourront être visualisées séparément sous forme de cartes en effectuant le krigeage de composantes spatiales.

b. Variable régionalisée et fonction aléatoire

La variable régionalisée $z(\mathbf{x})$ est considérée comme une réalisation d'une fonction aléatoire $Z(\mathbf{x})$ (la famille infinie des variables aléatoires implantées en tout point \mathbf{x} d'un domaine spatial D). Les données $z(\mathbf{x}_\alpha)$ sont des informations fragmentaires que l'on possède sur une réalisation particulière $z(\mathbf{x})$ de $Z(\mathbf{x})$.

Cette approche est radicalement différente de celle de la statistique, où les échantillons z_α sont des réalisations d'une variable aléatoire Z .

c. Variogramme théorique

Le variogramme théorique $\gamma(\mathbf{h})$ est défini par l'hypothèse intrinsèque. L'hypothèse intrinsèque est formée de deux conditions sur les accroissements $Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})$ de la fonction aléatoire :

- la moyenne des accroissements est invariante pour toute translation du vecteur \mathbf{h} dans le domaine. Plus spécifiquement, la moyenne des accroissements est supposée nulle, quelle que soit la position de \mathbf{h} dans le domaine,
 - la variance des accroissements admet une valeur finie en fonction de \mathbf{h} et indépendante de la position \mathbf{h} dans le domaine,
- c'est-à-dire,

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})] &= 0 && \text{pour tout } \mathbf{x}, \mathbf{x} + \mathbf{h} \in D \\ \text{var}[Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})] &= 2\gamma(\mathbf{h}) && \text{pour tout } \mathbf{x}, \mathbf{x} + \mathbf{h} \in D, \end{aligned} \quad (5)$$

ce qui donne le variogramme théorique

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} \mathbf{E}\left\{ [Z(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z(\mathbf{x})]^2 \right\} \text{ pour tout } \mathbf{x}, \mathbf{x} + \mathbf{h} \in D. \quad (6)$$

L'existence de l'espérance des accroissements d'une fonction aléatoire intrinsèque n'implique pas celle de l'espérance de la fonction aléatoire. Une fonction aléatoire intrinsèque peut avoir une variance infinie, tout en ayant une variance des accroissements finie pour tout vecteur \mathbf{h} .

1.2.2 : Krigeage

Le krigeage est une méthode d'estimation. Ce n'est pas la méthode la plus rapide pour interpoler sur une grille régulière dans le but de générer une carte. Ses avantages sont les suivants :

- le krigeage intègre la connaissance émanant de l'analyse préalable de la structure spatiale : le variogramme,
- le krigeage est un interpolateur exact : si un point d'échantillonnage coïncide avec un noeud de grille, la solution du krigeage est égale à la valeur de l'échantillon,
- le krigeage livre une interpolation sur l'erreur d'estimation : la variance de krigeage.

Lors du krigeage, si toutes les valeurs sont utilisées pour kriger en un point donné, on parle de voisinage unique. Si seul un sous-ensemble constitué des données les plus proches est utilisé, on parle de voisinage glissant. Pour choisir le voisinage, la portée du variogramme n'est pas le meilleur critère. Il est bon d'examiner le comportement des poids de krigeage.

a. Krigeage de la moyenne

Dans le cadre d'un modèle de fonction aléatoire localement stationnaire, on est intéressé par une estimation de la moyenne locale m^* . L'estimateur est basé sur une combinaison linéaire de variables aléatoires z_α implantées en n points de données \mathbf{x}_α à proximité d'un point arbitraire \mathbf{x}_0 .

Soit x_α , le nombre de points échantillonnés dans un domaine D . Les données sont autocorrélées, et on désire calculer la valeur moyenne. On peut penser à la moyenne arithmétique

$$m^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(x_\alpha), \quad (7)$$

mais, vu l'autocorrélation des données, on devrait plutôt affecter des poids w_α différents aux échantillons $z(x_\alpha)$

$$m^* = \sum_{i=1}^n w_\alpha z(x_\alpha), \quad (8)$$

les pondérateurs w_α sont choisis sur la base du variogramme. Ils devront assurer que l'estimation soit sans biais et que la variance d'estimation soit minimale. Sous ces conditions, l'estimateur z^* est dit optimal. On suppose la stationnarité de la moyenne

$$\mathbf{E}[Z(\mathbf{x})] = m \quad \forall \mathbf{x}, \mathbf{x} \in D. \quad (9)$$

L'erreur d'estimation ($m^* - m$) doit être nulle, en moyenne

$$\mathbf{E}[m^* - m]. \quad (10)$$

Cet objectif est atteint avec des poids de somme unité $\sum_{\alpha=1}^n w_\alpha = 1$ car

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[m^* - m] &= \mathbf{E}\left[\sum_{\alpha=1}^n w_\alpha Z(x_\alpha) - m\right] \\ &= \underbrace{\mathbf{E}[Z(x_\alpha)]}_m \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha - m \\ &= m \underbrace{\sum_{\alpha=1}^n w_\alpha}_1 - m \\ &= 0. \end{aligned}$$

On suppose en outre que $Z(\mathbf{x})$ est stationnaire d'ordre 2 et possède une fonction de covariance $C(\mathbf{h})$ qui décrit la corrélation entre un couple de points quelconque séparé par une distance \mathbf{h}

$$C(\mathbf{h}) = C(\mathbf{0}) - \gamma(\mathbf{h}) = \mathbf{E}\{[Z(\mathbf{x}) \cdot Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})]\} - m^2. \quad (11)$$

La variance de l'erreur d'estimation vaut sous la contrainte $\sum_{\alpha=1}^n w_\alpha = 1$

$$\begin{aligned}
\sigma_{\mathbf{E}}^2 &= \text{var}(m^* - m) = \mathbf{E}\left[(m^* - m)^2\right] \\
&= \mathbf{E}\left[m^{*2} - 2m^*m + m^2\right] \\
&= \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n w_{\alpha} w_{\beta} \mathbf{E}\left[Z(\mathbf{x}_{\alpha})Z(\mathbf{x}_{\beta})\right] - 2m \underbrace{\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha}}_1 \underbrace{\mathbf{E}\left[Z(\mathbf{x}_{\alpha})\right]}_m + m^2 \\
&= \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n w_{\alpha} w_{\beta} \mathbf{E}\left[Z(\mathbf{x}_{\alpha})Z(\mathbf{x}_{\beta})\right] - m^2 \\
&= \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n w_{\alpha} w_{\beta} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}).
\end{aligned}$$

Dans le but d'optimiser la variance d'estimation, la fonction objectif ϕ est construite en introduisant la contrainte sur les pondérateurs avec un paramètre de Lagrange μ_m . La fonction objectif ϕ a pour expression

$$\begin{aligned}
\phi(w_{\alpha}, \mu) &= \text{var}(m^* - m) - 2\mu \left(\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} - 1\right) \\
&= \sigma_{\mathbf{E}}^2 - 2\mu \left(\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} - 1\right),
\end{aligned} \tag{12}$$

où μ est un multiplicateur de Lagrange. En annulant les dérivées partielles selon w_{α}

$$\frac{\partial \phi}{\partial w_{\alpha}} = 0 \Rightarrow 2 \sum_{\beta=1}^n w_{\beta} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - 2\mu = 0,$$

et selon μ

$$\frac{\partial \phi}{\partial \mu} = 0 \Rightarrow 2 \left(\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} - 1\right) = 0.$$

La méthode de Lagrange livre les équations des pondérateurs optimaux w_{α}^{km} pour le krigeage de la moyenne

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n w_{\beta}^{km} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - \mu_{km} = 0 \text{ pour } \alpha = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{\beta=1}^n w_{\beta}^{km} = 1. \end{cases} \tag{13}$$

La variance de krigeage σ_{km}^2 , c'est-à-dire la variance d'estimation à l'optimum, est égale à :

$$\sigma_{km}^2 = \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} \underbrace{\sum_{\beta=1}^n w_{\beta} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta})}_{\mu_{km}} = \mu_{km}. \tag{14}$$

b. Krigeage en un point : le krigeage ordinaire

Le krigeage ordinaire est l'estimation d'une valeur inconnue en un point arbitraire. Il consiste en une opération qui est répétée en chaque noeud \mathbf{x}_0 d'une grille régulière recouvrant le domaine étudié.

Soit \mathbf{x}_α , le nombre de points échantillonnés dans un domaine D . On désire estimer une valeur z^* en un point \mathbf{x}_0 . La nouvelle valeur z^* est estimée par une moyenne pondérée de données $z(\mathbf{x}_\alpha)$

$$z^*(\mathbf{x}_0) = \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha z(\mathbf{x}_\alpha). \quad (15)$$

Les n pondérateurs w_α sont calculés de façon à assurer que l'estimation $z^*(\mathbf{x}_0)$ soit sans biais et que la variance de l'erreur d'estimation soit minimale.

Pour obtenir une erreur d'estimation nulle en moyenne $\mathbf{E}[Z^* - Z] = 0$, on impose la condition $\sum_{\alpha=1}^n w_\alpha = 1$. Cette condition exprime le fait que dans le cas extrême où les données sont égales à une constante dans un voisinage donné, la valeur estimée reproduira cette constante.

Sachant que $\mathbf{E}[Z(\mathbf{x})] = m$ (stationnarité d'ordre 2 de la fonction aléatoire $Z(\mathbf{x})$).

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[Z^*(\mathbf{x}_0)] &= \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha \underbrace{\mathbf{E}[Z(\mathbf{x}_\alpha)]}_m \\ &= m \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha \\ &= m = \mathbf{E}[Z(\mathbf{x}_\alpha)] \end{aligned}$$

ceci entraîne que $\mathbf{E}[Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)] = 0$.

La variance de l'erreur d'estimation $\sigma_E^2 = \text{var}[Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)]$ peut être développée en utilisant la covariance C ,

$$\begin{aligned} \sigma_E^2 &= \text{var}[Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)] \\ &= \mathbf{E}\left\{[Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)]^2\right\} \\ &= \mathbf{E}[Z^{*2}(\mathbf{x}_0) - 2Z^*(\mathbf{x}_0)Z(\mathbf{x}_0) + Z^2(\mathbf{x}_0)] \\ &= \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n w_\alpha w_\beta C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta) - 2 \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0) + C(\mathbf{0}). \end{aligned}$$

Cette quantité doit être minimisée sous la contrainte $\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} = 1$. Pour cela, on introduit le paramètre de Lagrange μ au travers de la construction de la fonction objectif ϕ

$$\begin{aligned}\phi &= \sigma_{\mathbf{E}}^2 - 2\mu \left(\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} - 1 \right) \\ &= \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n w_{\alpha} w_{\beta} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) + C(\mathbf{0}) - 2\mu \left(\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} - 1 \right).\end{aligned}$$

En annulant les dérivées partielles selon w_{α} et selon μ , on obtient

$$\begin{aligned}\frac{\partial \phi}{\partial w_{\alpha}} = 0 &\Rightarrow 2 \sum_{\beta=1}^n w_{\beta} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - 2C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) - 2\mu = 0 \\ &\Rightarrow \sum_{\beta=1}^n w_{\beta} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - \mu = C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0).\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \phi}{\partial \mu} = 0 &\Rightarrow 2 \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} - 2 = 0 \\ &\Rightarrow \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} = 1.\end{aligned}$$

Finalement le système de krigeage ordinaire s'écrit

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n w_{\beta}^{ok} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - \mu_{ok} = C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) \quad \forall \alpha, \alpha \in D \\ \sum_{\beta=1}^n w_{\beta}^{ok} = 1. \end{cases} \quad (16)$$

La variance du krigeage ordinaire ou variance de l'erreur d'estimation est égale à

$$\begin{aligned}\sigma_{ok}^2 &= \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n w_{\alpha} w_{\beta} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) + C(\mathbf{0}) \\ &= \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} (C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) + \mu_{ok}) - 2 \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) + C(\mathbf{0}) \\ &= \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) + \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} \mu_{ok} - 2 \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) + C(\mathbf{0}) \\ &= C(\mathbf{0}) + \mu_{ok} - \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0).\end{aligned} \quad (17)$$

c. Validation croisée

La validation croisée est un outil simple pour vérifier différentes hypothèses telles que : (1) le type de variogramme théorique ajusté au variogramme expérimental et ses paramètres ; (2) le voisinage choisi pour le krigeage.

Dans la procédure de validation croisée, une valeur $z(\mathbf{x}_\alpha)$ est retirée du jeu de données et sa valeur $z^*(\mathbf{x}_{[\alpha]})$ est estimée au point \mathbf{x}_α par krigeage ordinaire à partir des $(n-1)$ autres valeurs. La notation $[\alpha]$ signifie que la donnée existant en \mathbf{x}_α n'a pas été utilisée pour estimer $z^*(\mathbf{x}_{[\alpha]})$.

La différence entre la valeur mesurée et la valeur estimée $z(\mathbf{x}_\alpha) - z^*(\mathbf{x}_{[\alpha]})$ donne une indication sur le fait de savoir si une donnée est compatible avec les autres données dans le voisinage. Si les erreurs de validation croisée moyennes sont proches de zéro

$$\frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n [z(\mathbf{x}_\alpha) - z(\mathbf{x}_{[\alpha]})] \cong 0, \quad (18)$$

il n'y a pas de biais systématique. Une erreur moyenne négative (ou positive) représente une sur- (sous-) estimation systématique. L'écart-type du krigeage σ_k représente l'erreur estimée par le modèle quand le krigeage est réalisé en \mathbf{x}_α (la valeur en \mathbf{x}_α est supposée inconnue). En divisant l'erreur de validation croisée par $\sigma_k \left(\frac{z(\mathbf{x}_\alpha) - z^*(\mathbf{x}_{[\alpha]})}{\sigma_k} \right)$, on peut comparer l'erreur effective avec l'erreur théorique. Si la moyenne des carrés des erreurs standardisées de validation croisée est proche de l'unité

$$\frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n \frac{[z(\mathbf{x}_\alpha) - z(\mathbf{x}_{[\alpha]})]^2}{\sigma_k^2} \cong 1, \quad (19)$$

l'erreur d'estimation effective est égale en moyenne à l'erreur prévue par le modèle. Cette quantité donne une idée sur l'adéquation du modèle et de ses paramètres.

1.3 : Géostatistiques non stationnaires

1.3.1 : krigeage universel

Le krigeage universel est une élaboration du krigeage ordinaire qui tient compte des tendances locales dans la variable quand on cherche à minimiser la variance de l'erreur d'estimation.

Soit une fonction aléatoire $Z(\mathbf{x})$ non stationnaire composée d'une partie déterministe $m(\mathbf{x})$, la dérive, et d'une fonction aléatoire $Y(\mathbf{x})$ qui constitue le résidu une fois la partie déterministe retranchée

$$Z(\mathbf{x}) = m(\mathbf{x}) + Y(\mathbf{x}). \quad (20)$$

On suppose que $Y(\mathbf{x})$, est stationnaire d'ordre 2 avec une espérance nulle $E[Y(\mathbf{x})] = 0 \forall \mathbf{x}$, ainsi

$$E[Z(\mathbf{x})] = m(\mathbf{x}), \quad (21)$$

$m(\mathbf{x})$ dépend de \mathbf{x} .

La dérive $m(\mathbf{x})$ dépend des fonctions déterministes $f_l, l=1, 2, \dots, L$ qui sont linéairement indépendantes.

$$m(\mathbf{x}) = \sum_{l=0}^L a_l f_l(\mathbf{x}), \quad (22)$$

les coefficients a_l sont inconnus mais différents de zéro.

Pour le krigeage, une combinaison linéaire est utilisée

$$z^*(\mathbf{x}_0) = \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha z(\mathbf{x}_\alpha). \quad (23)$$

La condition de non biais, $E[Z(\mathbf{x}_0) - Z^*(\mathbf{x}_0)] = 0$, conduit à

$$m(\mathbf{x}_0) - \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha m(\mathbf{x}_\alpha) = 0, \quad (24)$$

et

$$\sum_{l=0}^L a_l \left\{ f_l(\mathbf{x}_0) - \sum_{\alpha=1}^n w_\alpha f_l(\mathbf{x}_\alpha) \right\} = 0. \quad (25)$$

comme les coefficients a_l sont différents de zéro

$$\sum_{\alpha=1}^n w_\alpha f_l(\mathbf{x}_\alpha) = f_l(\mathbf{x}_0) \text{ pour } l = 1, 2, \dots, L. \quad (26)$$

Le développement de l'expression de la variance d'estimation, en minimisant la fonction objectif ϕ dans laquelle est introduit deux contraintes (les paramètres μ_l de Lagrange) donne le système de krigeage universel

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^n w_\beta C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_\beta) - \sum_{l=0}^L \mu_l f_l(\mathbf{x}_\alpha) = C(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0) \text{ pour } \alpha = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{\beta=1}^n w_\beta f_l(\mathbf{x}_\beta) = f_l(\mathbf{x}_0) \text{ pour } l = 1, 2, \dots, L. \end{cases} \quad (27)$$

1.3.2 : Méthode de la dérive externe

Il arrive que deux variables mesurées par des procédés différents traduisent le même phénomène et que la première variable soit précise, mais connue en peu de points seulement, tandis que la seconde variable soit connue à peu près partout dans le domaine spatial, mais avec une précision plus approximative, donnant uniquement l'allure générale de la morphologie du phénomène régionalisé.

L'exemple classique provient de l'exploration pétrolière, où l'on cherche à cartographier un niveau géologique qui est en général continu (mis à part des failles), le pétrole se trouvant dans des formations sédimentaires. On dispose de deux sources d'information :

- des mesures précises de la profondeur d'une couche faites sur des forages pétroliers. Ces mesures sont cependant peu nombreuses à cause du coût très élevé des forages. Elles sont modélisées par une fonction aléatoire $Z(\mathbf{x})$,
- des mesures imprécises, mais très abondantes spatialement, de la profondeur de la couche déduite des temps sismiques. Cette deuxième variable est représentée par la variable régionalisée $s(\mathbf{x})$.

Il s'agit ici d'utiliser deux variables de natures différentes. L'hétérogénéité des variables, et le petit nombre de données sur la variable d'intérêt, interdisent de faire un cokrigeage dans de bonnes conditions. Aussi doit-on se contenter d'utiliser la seconde variable comme un guide, qui dessine les grandes lignes (rôle de dérive) de la variable d'intérêt. En Science du Sol, cette technique est appelée à se développer avec la multiplication des données provenant de différentes sources (Télé-détection, Modèles Numériques de Terrains, mesures géophysiques, etc.), qui viennent en complément des données au sol (pédologie, agronomie, etc.).

Cette méthode qui est un cas particulier du krigeage universel, a été utilisée par Delhomme, 1978 ; Galli & Meunier, 1987 pour cartographier la surface d'un gisement pétrolier. Ahmed & De Marsily (1987) ont appliqué cette méthode en hydrogéologie pour cartographier le log de la transmissivité ($z(\mathbf{x})$) en utilisant le log de la capacité spécifique ($s(\mathbf{x})$) comme dérive externe. Dans le même domaine, Chilès (1991) a appliqué cette méthode dans la cartographie de mesures piézométriques d'une année donnée par combinaison de peu de données réalisées durant cette année ($z(\mathbf{x})$) avec de nombreuses mesures piézométriques ($s(\mathbf{x})$) réalisées durant de précédentes années. La possibilité de l'utilisation de plusieurs dérives externes a été testée par Renard & Nai-Hsien (1988). Hudson & Wackernagel (1994) ont utilisé l'altitude calculée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain comme dérive externe dans la cartographie des températures moyennes du mois de Janvier en Ecosse.

Dans de tels cas, puisque $Z(\mathbf{x})$ la variable peu échantillonnée, et $s(\mathbf{x})$ la variable exhaustive sont deux expressions d'un même phénomène, on suppose que $Z(\mathbf{x})$ est en moyenne proportionnelle à $s(\mathbf{x})$ à une constante a_0 près

$$E[Z(\mathbf{x})] = a_0 + b_1 s(\mathbf{x}) . \quad (28)$$

a. Krigeage ordinaire avec dérive externe

On examine le cas d'une fonction aléatoire $Z(\mathbf{x})$ dont on voudrait améliorer l'estimation en introduisant la fonction de forme $s(\mathbf{x})$. L'estimateur est la combinaison linéaire

$$Z^*(\mathbf{x}_0) = \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} Z(\mathbf{x}_{\alpha}), \quad (29)$$

avec des pondérateurs w_{α} de somme unité (condition de non biais) ainsi

$$\mathbf{E}[Z^*(\mathbf{x}_0)] = \mathbf{E}[Z(\mathbf{x}_0)]. \quad (30)$$

Cette égalité peut être développée en

$$\begin{aligned} \mathbf{E}[Z^*(\mathbf{x}_0)] &= \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} \mathbf{E}[Z(\mathbf{x}_{\alpha})] \\ &= a_0 + b_1 \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} s(\mathbf{x}_{\alpha}) \\ &= a_0 + b_1 s(\mathbf{x}_0). \end{aligned} \quad (31)$$

Cette dernière équation implique que la valeur estimée avec des pondérateurs de somme unité soit en moyenne cohérente avec une interpolation exacte de $s(\mathbf{x})$.

$$s(\mathbf{x}_0) = \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} s(\mathbf{x}_{\alpha}). \quad (32)$$

La fonction objectif à minimiser dans ce cas est composée de la variance de l'erreur de l'estimation $\sigma_{\mathbf{E}}^2$ et de deux contraintes

$$\phi = \sigma_{\mathbf{E}}^2 - \mu_1 \left\{ \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} - 1 \right\} - \mu_2 \left\{ \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} s(\mathbf{x}_{\alpha}) - s(\mathbf{x}_0) \right\}, \quad (33)$$

où μ_1 et μ_2 sont des paramètres de Lagrange et $\sigma_{\mathbf{E}}^2$ est la variance de l'erreur d'estimation qui vaut

$$\sigma_{\mathbf{E}}^2 = \text{var}[Z^*(\mathbf{x}_0) - Z(\mathbf{x}_0)] = \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n w_{\alpha} w_{\beta} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - 2 \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) + C(\mathbf{0}), \quad (34)$$

avec C la fonction de covariance.

Pour résoudre le problème d'optimisation, les dérivées partielles de la fonction objectif $\phi(w_{\alpha}, \mu_1, \mu_2)$ sont annulées

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial w_{\alpha}} = 0 \Rightarrow \sum_{\beta=1}^n w_{\beta} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - \mu_1 - \mu_2 s(\mathbf{x}_{\alpha}) = C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) \text{ pour } \alpha = 1, 2, \dots, n \\ \frac{\partial \phi}{\partial \mu_1} = 0 \Rightarrow \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} = 1 \\ \frac{\partial \phi}{\partial \mu_2} = 0 \Rightarrow \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} s(\mathbf{x}_{\alpha}) = s(\mathbf{x}_0). \end{cases} \quad (35)$$

Le résultat est que le système d'équations du krigeage ordinaire devient un système d'équations de krigeage universel

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\beta=1}^n w_{\beta} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - \mu_1 - \mu_2 s(\mathbf{x}_{\alpha}) = C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) \text{ pour } \alpha = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{\beta=1}^n w_{\beta} = 1 \\ \sum_{\beta=1}^n w_{\beta} s(\mathbf{x}_{\beta}) = s(\mathbf{x}_0) \\ \sigma_{\mathbf{E}}^2 = C(0) - \sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) + \mu_1 + \mu_2 s(\mathbf{x}_0). \end{array} \right. \quad (36)$$

b. krigeage universel avec dérive externe

La méthode de la dérive externe consiste à intégrer dans le système de krigeage des conditions d'universalité supplémentaires, relatives à une ou plusieurs variables externes $s_i(\mathbf{x})$, $i = 1, \dots, M$ mesurées de manière exhaustive dans le domaine spatial. Les $s_i(\mathbf{x})$ doivent être connues en tous points \mathbf{x}_{α} des échantillons de $Z(\mathbf{x}_{\alpha})$, ainsi qu'aux noeuds de la grille d'estimation.

Les conditions $\sum_{\alpha=1}^n w_{\alpha} s_i(\mathbf{x}_{\alpha}) = s_i(\mathbf{x}_0)$ $i = 1, \dots, M$ sont rajoutées au système de krigeage indépendamment du choix de la classe de covariance $K(\mathbf{h})$, d'où la dénomination de dérivées "externes". La classe de covariances généralisées est fonction de l'ensemble des fonctions de base $f_l(\mathbf{x})$ qui sont qualifiées dans ce contexte de dérive "interne".

Le système de krigeage avec dérive interne et dérivées externes multiples s'écrit finalement

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\beta=1}^n w_{\beta} C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_{\beta}) - \sum_{l=0}^L \mu_l f_l(\mathbf{x}_{\alpha}) - \sum_{i=1}^M \mu_i s_i(\mathbf{x}_{\alpha}) = C(\mathbf{x}_{\alpha} - \mathbf{x}_0) \text{ pour } \alpha = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{\beta=1}^n w_{\beta} f_l(\mathbf{x}_{\beta}) = f_l(\mathbf{x}_0) \text{ pour } l = 1, 2, \dots, L \\ \sum_{\beta=1}^n w_{\beta} s_i(\mathbf{x}_{\beta}) = s_i(\mathbf{x}_0) \text{ pour } i = 1, 2, \dots, M. \end{array} \right. \quad (37)$$

1.4 : Géostatistiques multivariées

1.4.1 : Fonction de covariance croisée

Les fonctions de covariance $C_{ij}(\mathbf{h})$ d'un ensemble de N fonctions aléatoires $Z_i(\mathbf{x})$ sont définies par l'hypothèse de stationnarité d'ordre deux conjointe

$$\begin{cases} \mathbf{E}[Z_i(\mathbf{x})] = m_i & \text{pour tout } \mathbf{x} \in D, i = 1, 2, \dots, N \\ \mathbf{E}[(Z_i(\mathbf{x}) - m_i) \cdot (Z_j(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - m_j)] = C_{ij}(\mathbf{h}) & \text{pour tout } \mathbf{x} \in D, i, j = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (38)$$

La moyenne de chaque variable $Z_i(\mathbf{x})$ en tout point du domaine est égale à une constante m_i . La covariance d'une paire de variables ne dépend que du vecteur \mathbf{h} reliant une paire de points et elle est invariante par translation.

1.4.2 : Variogramme croisé

Le variogramme croisé $\gamma_{ij}(\mathbf{h})$ dans le cadre d'une hypothèse de stationnarité intrinsèque conjointe de N fonctions aléatoires

$$\begin{cases} \mathbf{E}[Z_i(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z_i(\mathbf{x})] = 0 & \forall \mathbf{x} \in D, i = 1, \dots, N \\ \mathbf{C}[(Z_i(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z_i(\mathbf{x})), (Z_j(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z_j(\mathbf{x}))] = 2\gamma_{ij}(\mathbf{h}) & \forall \mathbf{x} \in D, i, j = 1, \dots, N, \end{cases} \quad (39)$$

est défini par

$$\gamma_{ij}(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} \mathbf{E}[Z_i(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z_i(\mathbf{x}) \cdot (Z_j(\mathbf{x} + \mathbf{h}) - Z_j(\mathbf{x}))]. \quad (40)$$

Le variogramme croisé est une fonction paire ($\gamma_{ij}(\mathbf{h}) = \gamma_{ij}(-\mathbf{h})$). Sa relation avec la covariance croisée dans un contexte de stationnarité d'ordre deux est

$$\gamma_{ij}(\mathbf{h}) = C_{ij}(\mathbf{0}) - \frac{1}{2}(C_{ij}(-\mathbf{h}) + C_{ij}(\mathbf{h})).$$

1.4.3 : Cokrigage

Le cokrigage est une extension du krigeage quand on dispose d'un variogramme multivariable ou bien d'un modèle de covariance et de plusieurs variables. Dans le cokrigage, la variable d'intérêt est cokrigée en un point spécifique \mathbf{x}_0 à partir des données de cette variable elle-même et à partir des variables auxiliaires se trouvant dans le voisinage considéré pour l'estimation au point \mathbf{x}_0 .

Si en tous les points d'échantillonnage, l'ensemble des variables considérées est mesuré et si elles sont en très forte corrélation, le cokrigage est équivalent au krigeage.

a. Isotropie et hétérotopie

Les mesures disponibles sur deux variables $Z_1(\mathbf{x})$ et $Z_2(\mathbf{x})$ dans un domaine donné peuvent être situées, soit aux mêmes points de mesure, soit en des points différents. On distingue les cas suivants :

- isotopie : en tous les points d'échantillonnage on dispose d'informations sur la paire de variables,

- hétérotopie complète : les deux variables ont été mesurées sur deux ensembles de points disjoints,
- hétérotopie partielle : une partie des points de mesure ne sont pas communs aux deux variables. Un cas particulier d'hétérotopie partielle est celui où l'ensemble des points de mesure d'une variable est inclus dans l'ensemble des points de mesure de l'autre variable.

b. Cokrigage ordinaire

L'estimateur dans le cokrigage ordinaire est une combinaison linéaire de pondérateurs w_α^i avec les données des différentes variables auxiliaires situées en des points d'un voisinage d'un point \mathbf{x}_0 . Il a pour expression

$$z_{i_0}^*(\mathbf{x}_0) = \sum_{i=1}^N \sum_{\alpha=1}^{n_i} w_\alpha^i z_i(\mathbf{x}_\alpha), \quad (41)$$

où w_α^i sont des pondérateurs associés aux points d'échantillonnage et l'indice i_0 désigne une variable particulière de l'ensemble de N variables. Le nombre d'échantillons n_i dépend de l'indice i des variables afin d'inclure dans la notation le cas de l'hétérotopie, partielle ou totale.

Dans le cas d'une hypothèse de stationnarité intrinsèque conjointe, on désire estimer une variable particulière d'un ensemble de N variables, en se basant sur une erreur d'estimation nulle en moyenne. Cette condition est remplie en choisissant des pondérateurs de somme unité pour la variable d'intérêt, et de somme nulle pour les variables auxiliaires

$$\sum_{\alpha=1}^{n_i} w_\alpha^i = \delta_{ii_0} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = i_0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}.$$

La variance de l'erreur d'estimation (variance de cokrigage) a pour expression

$$\sigma_{ck}^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{\alpha=1}^{n_i} w_\alpha^i \gamma_{ii_0}(\mathbf{x}_\alpha - \mathbf{x}_0) + \mu_{i_0} - \gamma_{i_0 i_0}(\mathbf{0}). \quad (42)$$

c. Cokrigage simple

Le cokrigage ordinaire n'a pas de sens lorsqu'aucune information n'est disponible sur la variable d'intérêt dans le voisinage où l'on désire le pratiquer. Par contre, le cokrigage simple s'appuie sur une connaissance des moyennes des variables, ce qui permet de calibrer l'estimation d'une variable sans posséder aucune donnée sur cette variable dans le voisinage de cokrigage.

L'estimateur du cokrigage simple est constitué de la moyenne de la variable d'intérêt et d'une combinaison linéaire de pondérateurs w_α^i avec les résidus de toutes les variables par rapport à leur moyenne.

$$z_{i_0}^*(\mathbf{x}_0) = m_{i_0} + \sum_{i=1}^N \sum_{\alpha=1}^{n_i} w_\alpha^i (z_i(\mathbf{x}_\alpha) - m_i). \quad (43)$$

1.5 : Modèles régression - krigage

Deux modèles utilisant la régression linéaire multiple (RLM) et le krigage ordinaire (KO) ont été envisagés. Le premier modèle, qu'on va appeler par la suite (Mod.1) consiste à estimer z (variable d'intérêt) à partir des attributs morphologiques par RLM. On obtient z_r , c'est-à-dire les valeurs de la variable z estimées par RLM. Les résidus (ε) de cette régression correspondent à :

$$\varepsilon = z - z_r. \quad (44)$$

En supposant que ε et z_r ne sont pas corrélés, les deux variables sont alors estimées séparément aux noeuds d'une grille d'interpolation par krigage ordinaire. On obtient ainsi z_r^* et ε^* dont la somme donne la valeur $z_{Mod.1}^*$ estimée

$$z_{mod.1}^* = z_{r1}^* + \varepsilon^*. \quad (45)$$

La variance de l'erreur d'estimation est la somme des variances de krigage de z_r et de ε

$$\text{var}[z_{mod.1}^* - z] = \text{var}[z_{r1}^* - z_r] + \text{var}[\varepsilon^* - \varepsilon]. \quad (46)$$

Le deuxième modèle (Mod.2) consiste aussi en deux principales étapes : (1) l'estimation des résidus de la RLM aux noeuds d'une grille d'interpolation par krigage ordinaire, on obtient ainsi ε^* ; (2) l'utilisation du modèle issu de la RLM pour estimer z aux noeuds d'une grille où l'on possède uniquement l'information sur les attributs morphologiques, on obtient z_{r2}^* . Les deux étapes étant réalisées, on déduit :

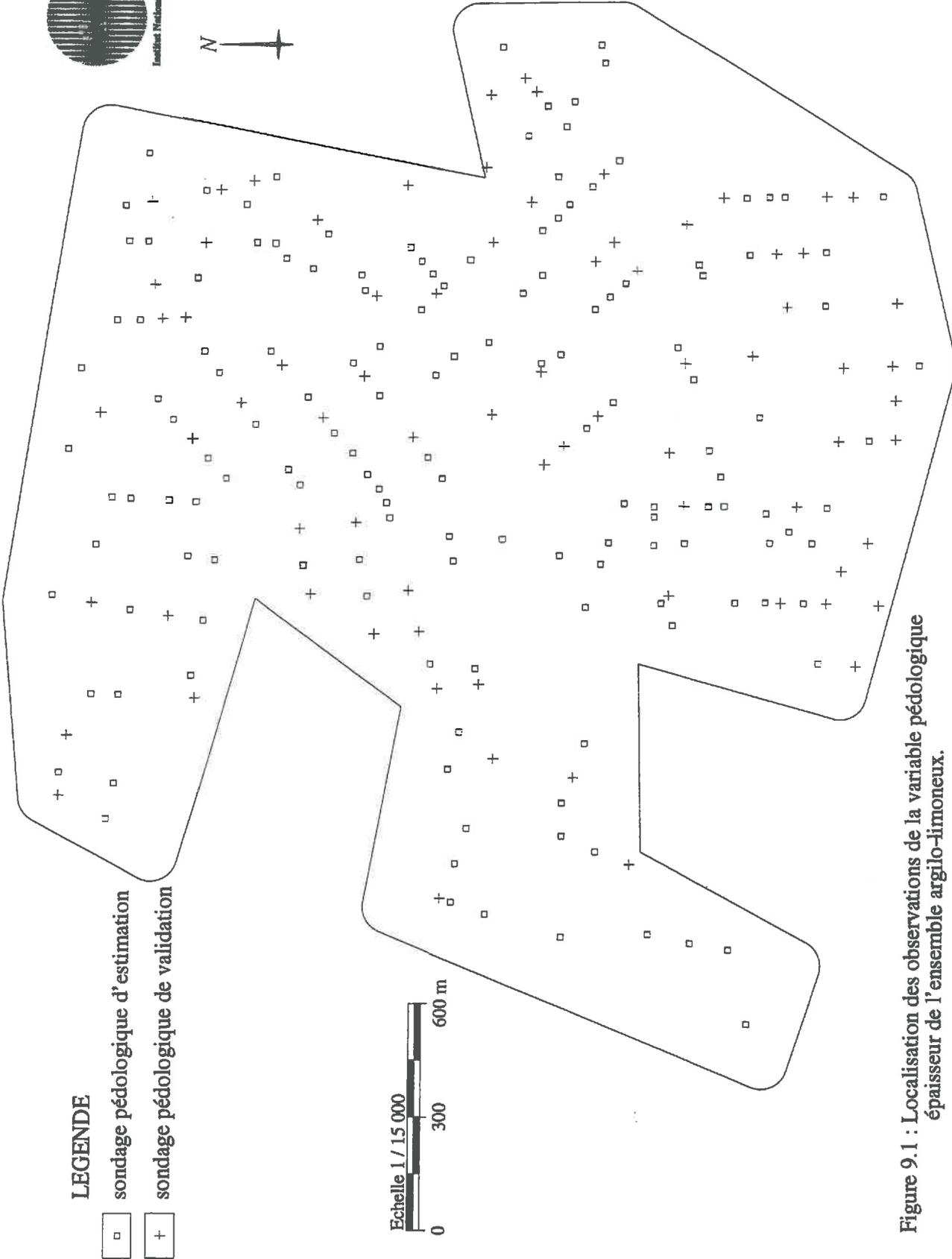
$$z_{mod.2}^* = z_{r2}^* + \varepsilon^*. \quad (47)$$

2. Application des méthodes d'estimation au secteur Est de la simulation SPOT

2.1 : Matériels

Sur une surface de 380 ha, à l'Est du secteur de la simulation SPOT (cf. Fig. 2.1, chapitre II), 225 sondages pédologiques à la tarière ont été réalisés (Fig. 9.1). Au niveau de chaque sondage, nous avons mesuré l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux (EPAL) présenté au chapitre IV (cf. chapitre IV, ensemble argilo-limoneux AL). Sur les 225 sondages, 150 sont utilisés dans l'estimation, tandis que les autres (75 sondages) servent à une validation, c'est-à-dire à une mesure de la performance des différentes méthodes d'estimation utilisées.

Le Modèle Numérique de Terrain et ses attributs primaires ont été établis sur le secteur de la simulation SPOT selon la méthode présentée au chapitre VI. Il s'agit de : (1) l'altitude (*Alt*) ; (2) l'orientation de la pente (φ) ; (3) l'intensité de la pente (β) ; (4) la convexité de la surface (*curve*) ; (5) la convexité latérale (*Plc*) ; (6) la convexité verticale (*Prc*) ; (7) les flux cumulatifs ou surfaces contributives (*Facc*). Chacune de ces informations a été calculée aux noeuds d'une grille de 20 m x 20 m. Ceci a permis d'informer chacun des 225 sondages des valeurs prises par les attributs morphologiques dans la maille englobant la localisation du point de sondage.



LEGENDE

□ sondage pédologique d'estimation

✚ sondage pédologique de validation

Echelle 1 / 15 000
0 300 600 m

Figure 9.1 : Localisation des observations de la variable pédologique épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux.

2.2 : Résultats

Le tableau 9.1 résume les statistiques sommaires concernant l'échantillon d'estimation. Nous remarquons que (1) l'altitude possède une amplitude de 8 m ; (2) la pente a une très faible intensité ; (3) la variable *EPAL* présente un fort écart-type.

Tableau 9.1 : Statistiques sommaires sur l'échantillon d'estimation.

	<i>Effectif</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>
<i>EPAL (cm)</i>	150	25	120	65,1	20,7
<i>Alt (m)</i>	150	126	134	128,8	1,7
φ (<i>degrés</i>)	150	10,4	348,9	146,6	67
β (%)	150	0,08	2,26	1,04	0,45
<i>Curve (m⁻¹)</i>	150	-0,07	0,04	-0,00	0,02
<i>Plc (m⁻¹)</i>	150	-0,04	0,03	0,00	0,01
<i>Prc (m⁻¹)</i>	150	-0,03	0,06	0,00	0,01
<i>Facc</i>	150	0	5104	63	436

2.2.1 : Relation *EPAL* et attributs morphologiques

L'orientation de la pente est une variable circulaire. Pour le calcul des statistiques sommaires et pour la recherche de relations linéaires entre *EPAL* et cette variable (φ), celle-ci est transformée en $\sin\varphi$ et $\cos\varphi$ comme il a été proposé par Mardia (1972) et Batschelet (1981).

La matrice des corrélations partielles (Tab. 9.2) montre les mêmes relations entre *EPAL* et les attributs du relief déjà présentées dans le chapitre VII. En effet, nous constatons une fois de plus que la variable *EPAL* est la plus fortement corrélée à l'intensité de la pente, puis de façon moins accentuée au sinus de l'orientation de la pente et à l'altitude. Cependant, sur ce secteur de 380 ha ces relations linéaires sont moins fortes par rapport à celles trouvées sur le secteur des 1600 ha. Ceci s'explique par le fait que sur le petit secteur, l'ensemble de la gamme de variation n'est pas prise en compte.

Tableau 9.2 : Matrice des corrélations partielles.

	<i>EPAL</i>	<i>Alt</i>	$\cos\varphi$	$\sin\varphi$	β	<i>Curve</i>	<i>Plc</i>	<i>Prc</i>	<i>Facc</i>
<i>EPAL</i>	1								
<i>Alt</i>	0,17	1							
$\cos\varphi$	0,01	-0,08	1						
$\sin\varphi$	0,34	-0,08	0,12	1					
β	-0,62	0,01	0,07	-0,26	1				
<i>Curve</i>	0,17	0,37	-0,04	-0,09	-0,08	1			
<i>Plc</i>	0,12	0,14	0,02	-0,11	0,01	0,76	1		
<i>Prc</i>	-0,16	-0,43	0,08	0,05	0,13	-0,84	-0,30	1	
<i>Facc</i>	-0,11	-0,11	-0,06	-0,04	-0,14	-0,25	-0,44	0,00	1

En gras, les coefficients de corrélation linéaire, significatifs au seuil (0,16) de 5% pour 148 degrés de liberté.

Pour modéliser la distribution spatiale de la variable *EPAL* sur le domaine d'étude, une régression linéaire multiple (RLM) pas à pas a été réalisée avec les variables explicatives : (1) intensité de la pente (β) ; (2) sinus de l'orientation de la pente ($\sin\varphi$) ; (3) altitude (*Alt*). Cette analyse a conduit successivement aux équations présentées dans le tableau 9.3.

Les expressions des modèles du tableau 9.3 sont utilisées pour estimer la distribution spatiale de la variable *EPAL* sur le domaine d'étude (Fig. 9.2a, 9.2b et 9.2c). Les statistiques sommaires relatives à ces estimations sont présentées dans le tableau 9.4 (méthodes, RLS, RLM2 et RLM3).

Tableau 9.3 : Modèles de régression relatifs au choix des variables explicatives par sélection progressive.

<i>Variables explicatives</i>	<i>Expressions des modèles</i>	<i>R² (%)</i>	<i>Ecart-type résiduel (cm)</i>
β	$94,3 - 28,1\beta$ (RLS)	38	16,3
$\beta, \sin\varphi$	$91 - 25,8\beta + 5,7 \sin\varphi$ (RLM2)	41	15,9
$\beta, \sin\varphi, Alt$	$-187,4 - 25,7\beta + 6,1 \sin\varphi + 2,2 Alt$ (RLM3)	45	15,5

L'examen visuel des trois cartes permet de constater que le modèle de régression à trois variables explicatives fournit une carte (Fig. 9.2c) qui présente des différences par rapport aux cartes (Fig. 9.2a et 9.2b). Ces dernières sont issues des modèles de régression à une et deux variables explicatives. En effet, nous constatons dans la figure 9.2c plus de surfaces où *EPAL* est supérieure à 90 cm. Cette différence se répercute sur la valeur moyenne de *EPAL* qui est plus forte et diffère de toutes les autres moyennes de l'ensemble des méthodes d'estimations utilisées (Tab. 9.4). Nous pouvons dire qu'a priori la prise en compte de l'altitude comme troisième variable explicative dans l'estimation de *EPAL* influence la précision de l'estimation. Ceci sera vérifié dans le paragraphe 3 lors de la validation.

Tableau 9.4 : Statistiques sommaires sur les différents résultats d'estimation aux noeuds de la grille 20 m x 20 m.

<i>Méthodes</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart-type</i>
RLS	11,6	94,3	67,9	13,5
RLM2	19,5	95,4	67,7	13,7
RLM3	24,4	109,7	72,6	13,6
KO	30,3	110,1	65,4	12,4
KODEX	3,7	107,4	66,6	15,1
KU	40,6	97,2	66,3	11,7
KUDEX	0,02	115,7	66	15
COHP	33,7	104	66,6	11,5
Mod.1	40,6	93,2	65,2	10,7
Mod.2	12,5	103,9	67,1	14,7

RLS = régression linéaire simple, RLM2 = régression linéaire multiple avec deux variables explicatives, RLM3 = régression linéaire multiple avec trois variables explicatives, KO = krigeage ordinaire, KODEX = krigeage ordinaire avec dérive externe, KU = krigeage universel, KUDEX = krigeage universel avec dérive externe, COHP = cokrigeage hétérotopique partielle, Mod.1 = modèle régression-krigeage modèle 1, Mod.2 = modèle régression-krigeage modèle 2.

2.2.2 : Analyse variographique et krigeage ordinaire de la variable *EPAL*

Le variogramme expérimental de la variable *EPAL* est calculé avec une hypothèse d'isotropie (Fig. 9.3). Ce variogramme expérimental est ajusté par un variogramme gigogne (effet de pépite plus deux modèles sphériques). Les coefficients des fonctions des variogrammes théoriques sont présentés dans le tableau 9.5.

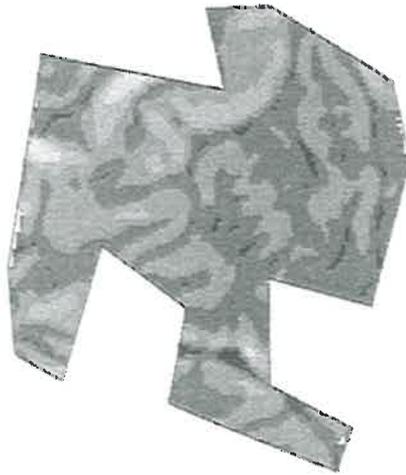
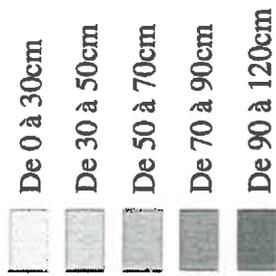


Figure 9.2a : Carte de l'épaisseur de l'argile limoneuse estimée par régression linéaire simple à partir des données d'épaisseur et l'intensité de la pente issue du MNA.



Figure 9.2b : Carte de l'épaisseur de l'argile limoneuse estimée par régression linéaire multiple à partir des données d'épaisseur et de l'intensité de la pente et du sinus de l'orientation de la pente issues du MNA.

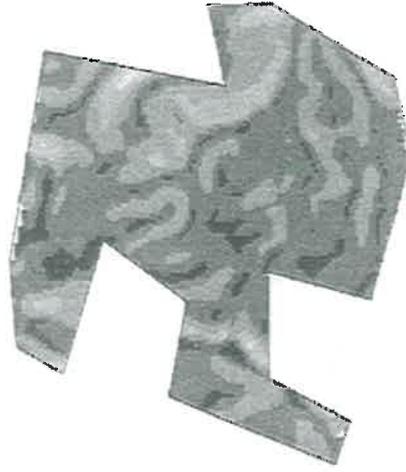


Figure 9.2c : Carte de l'épaisseur de l'argile limoneuse estimée par régression linéaire multiple à partir des données d'épaisseur et de l'intensité de la pente, du sinus de l'orientation de la pente et de l'altitude issues du MNA.

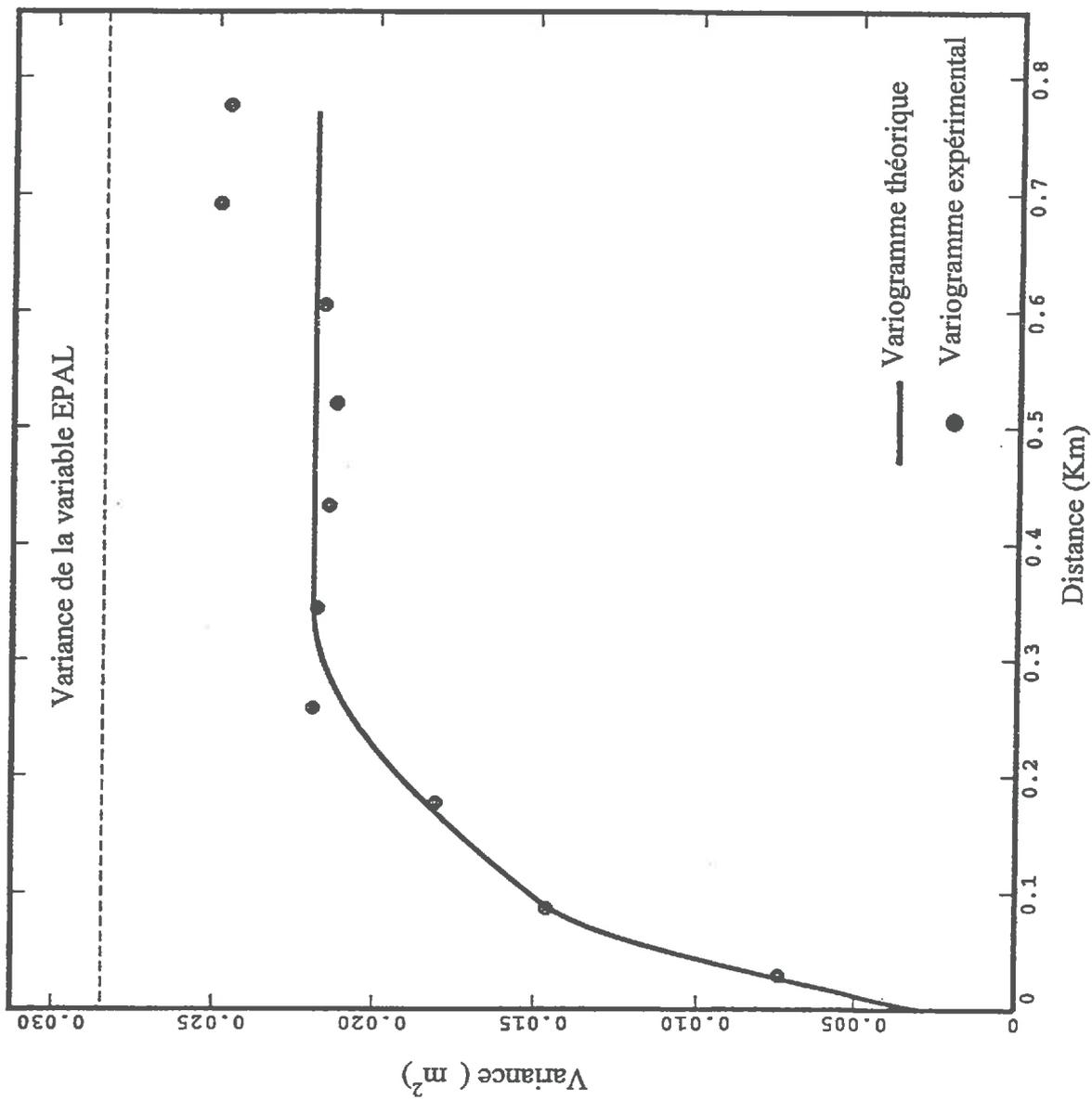


Figure 9.3 : Variogrammes expérimental et théorique de la variable EPAL.

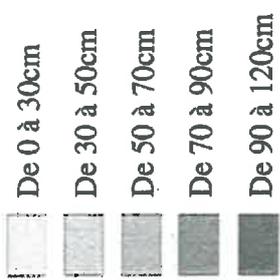
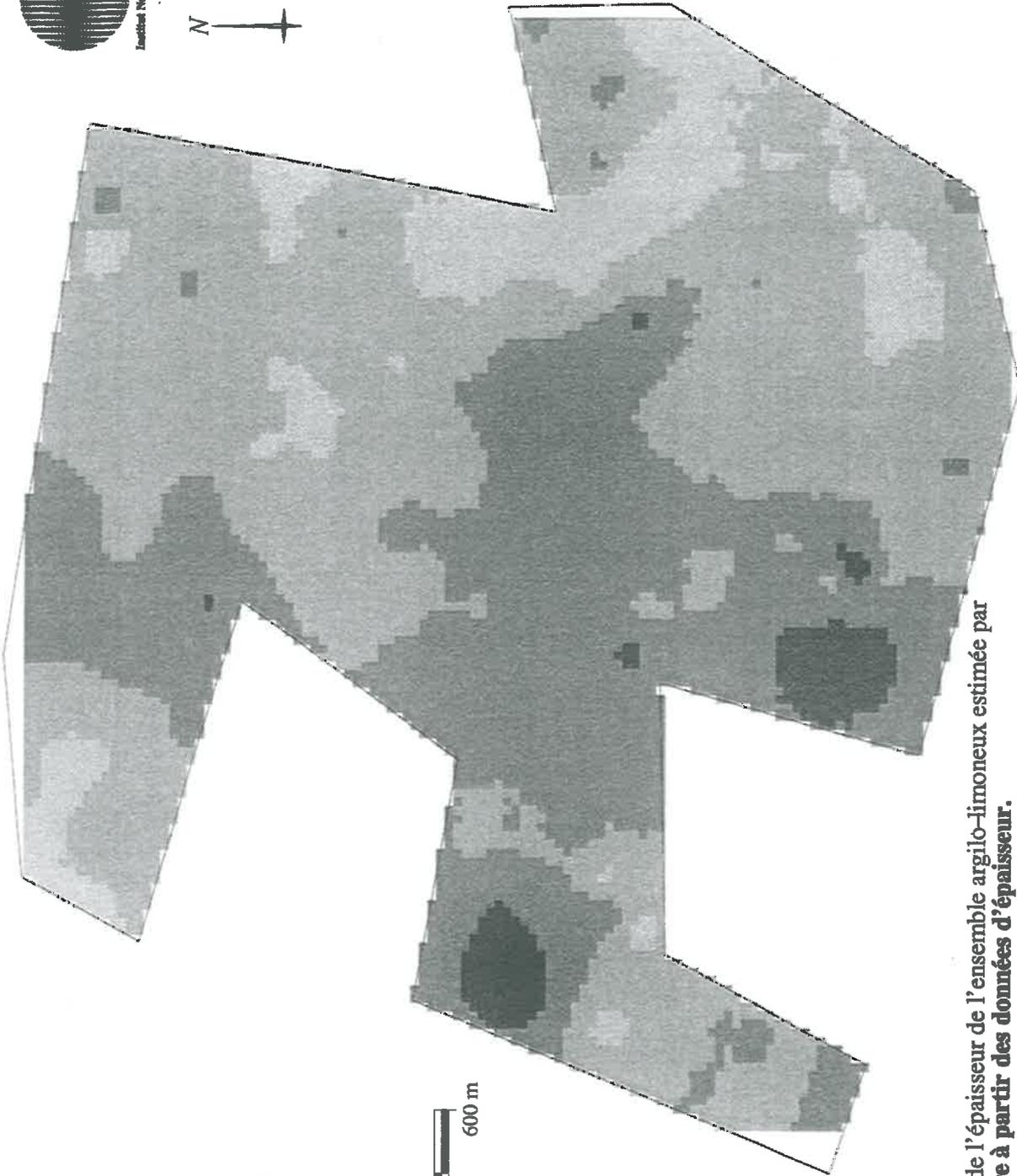


Figure 9.4 : Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée par krigage ordinaire à partir des données d'épaisseur.

Pour vérifier la validité des variogrammes théoriques ajustés au variogramme expérimental, une validation croisée est appliquée aux données initiales concernant la variable *EPAL*. Les résultats montrent que l'erreur moyenne ($R_e = 0,0015$) est proche de zéro et que la moyenne des carrés des erreurs d'estimation réduite ($s_{Re}^2 = 0,91$) est proche de l'unité. Ainsi, on peut dire que l'ajustement est bon au moins jusqu'au tiers de la distance du plus grand axe d'échantillonnage où une stationnarité locale est considérée. Il faut cependant souligner que ce test n'est pas vrai dans l'absolu quand on hésite entre deux modèles théoriques.

Tableau 9.5 : Coefficients des fonctions de variogrammes théoriques.

Effet de pépité : c_0 (m^2)	0,003
Le premier modèle sphérique	
portée : a (m)	89,7
palier : c_2 (m^2)	0,007
Le deuxième modèle sphérique	
portée : a (m)	345,3
palier : c_2 (m^2)	0,012

En utilisant le système d'équations de krigeage et les fonctions de variogrammes théoriques, *EPAL* est estimée aux noeuds d'une grille tous les 20 m en voisinage glissant. La figure 9.4 montre les résultats de cette interpolation. Nous remarquons particulièrement un aspect lissé de la carte, ceci est dû à l'existence d'un effet de pépité et d'un effet de lissage propre à la forme de l'estimateur lui-même dans le cas du krigeage. Les statistiques sommaires concernant *EPAL* estimée par krigeage ordinaire sont résumées dans le tableau 9.4 (méthode KO).

2.2.3 : Estimation de *EPAL* avec une fonction de forme : krigeage ordinaire avec une dérive externe

La matrice des corrélations (Tab. 9.2) montre qu'il existe une relation linéaire entre les variables *EPAL* et intensité de la pente ($r = -0,62$). Ainsi, l'intensité de la pente (β) connue d'une façon exhaustive sur le domaine d'étude est utilisée comme une fonction de forme (une dérive externe) dans l'estimation de la variable d'intérêt *EPAL*.

Deux étapes préalables à l'estimation de la variable *EPAL* sont nécessaires : (1) l'estimation de (β) aux noeuds d'une grille ; pour ce faire, une analyse variographique sur cette variable (Fig. 9.5) puis un krigeage ordinaire (Fig. 9.6) sont réalisés ; (2) l'estimation de (β) aux points d'observation de la variable *EPAL*, c'est-à-dire les 150 observations. Ces deux étapes réalisées, le système d'équations (36) est utilisé pour estimer *EPAL* aux noeuds d'une grille tous les 20 m (Fig. 9.7). Les statistiques sommaires sur cette estimation sont résumées dans le tableau 9.4 (méthode KODEX). Une comparaison visuelle entre les figures 9.6 et 9.7 montre que les surfaces de faibles épaisseurs correspondent aux surfaces de forte intensité de la pente et inversement.

Les paramètres des fonctions de régression linéaire entre les valeurs estimées de *EPAL* en fonction des valeurs estimées de (β) (Tab. 9.6) sont relativement similaires à ceux de la régression linéaire entre ces deux variables (*EPAL* et β) aux points d'observation.

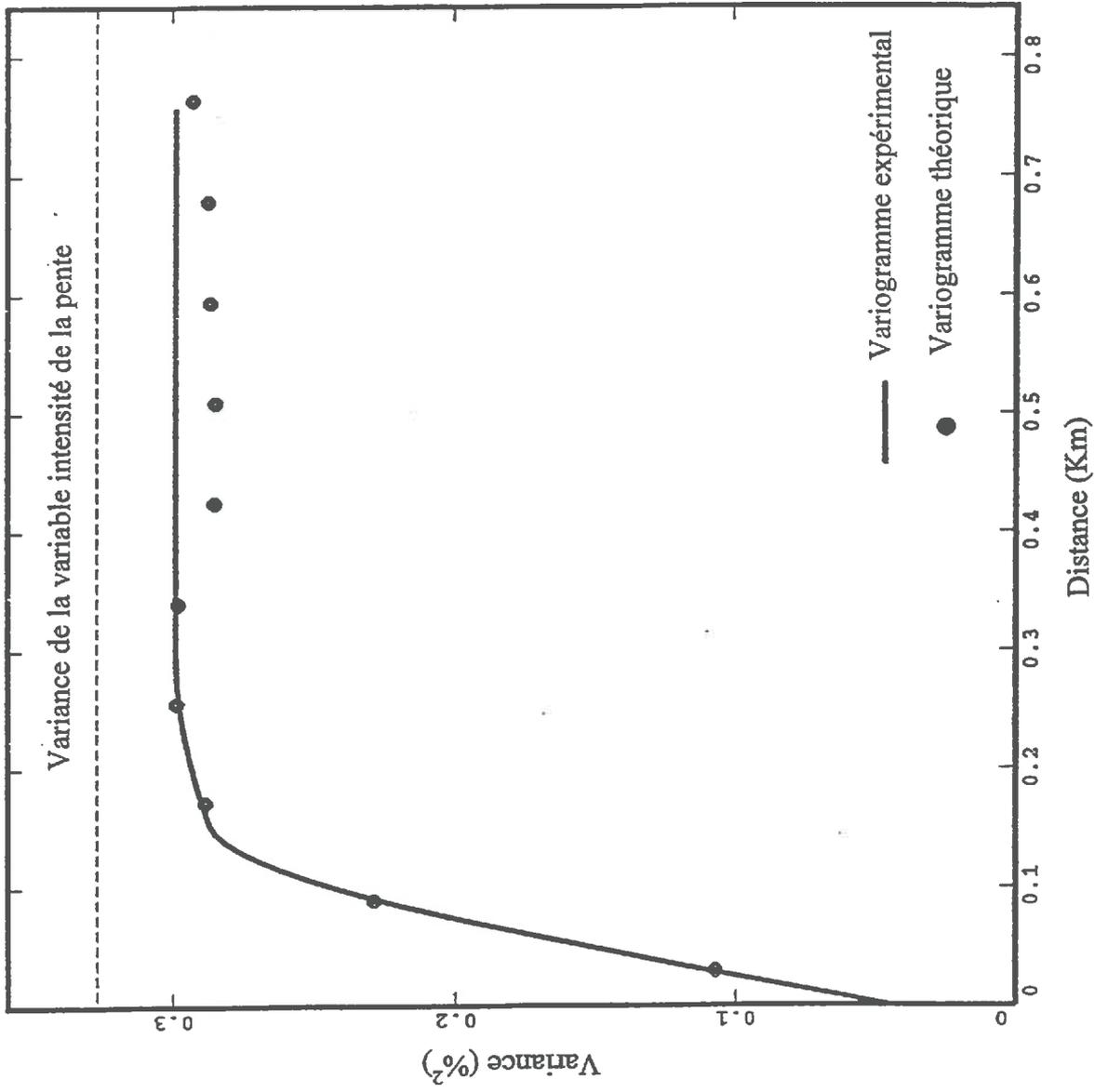
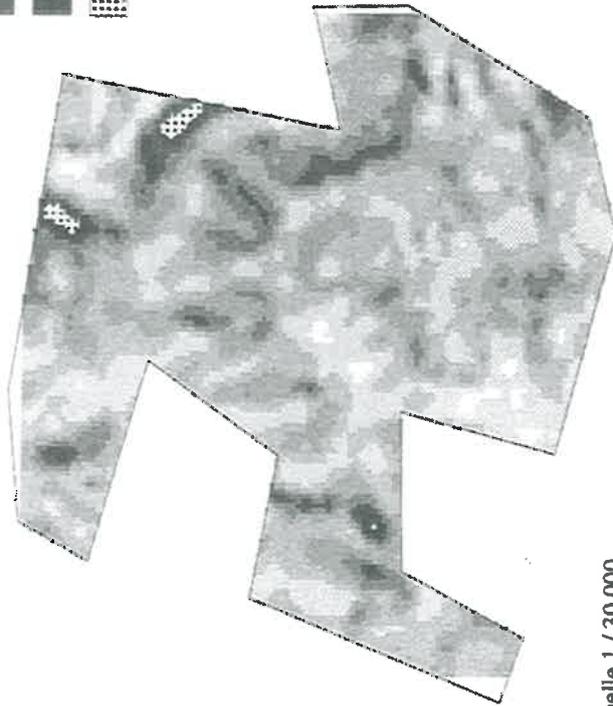
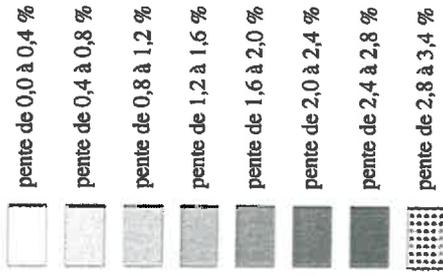


Figure 9.5 : Variogrammes expérimental et théorique de la variable intensité de la pente.



Echelle 1 / 30 000
0 0,6 1,2 km

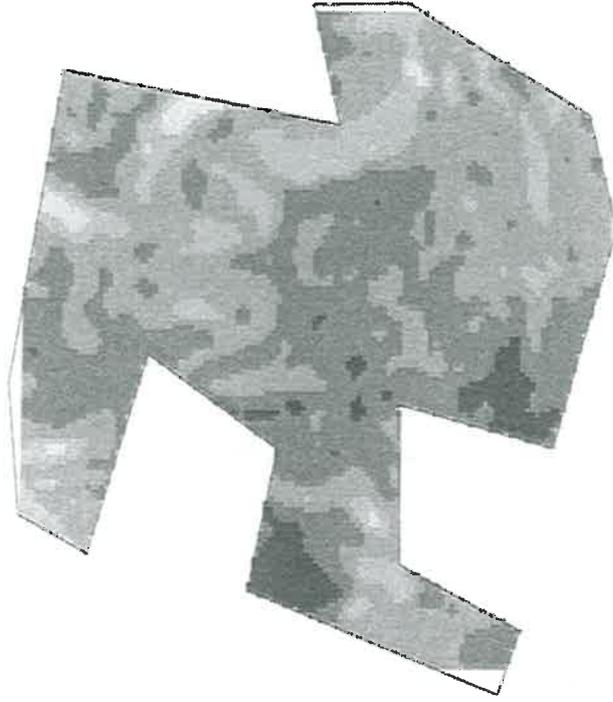
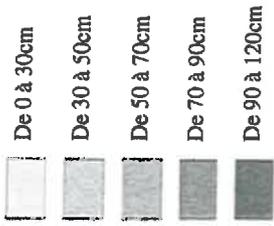


Figure 9.6 : Carte de l'intensité de la penne estimée par krigage ordinaire à partir des données de l'intensité de la penne.

Figure 9.7 : Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée par krigage ordinaire à partir des données d'épaisseur avec l'intensité de la penne utilisée comme dérive externe.

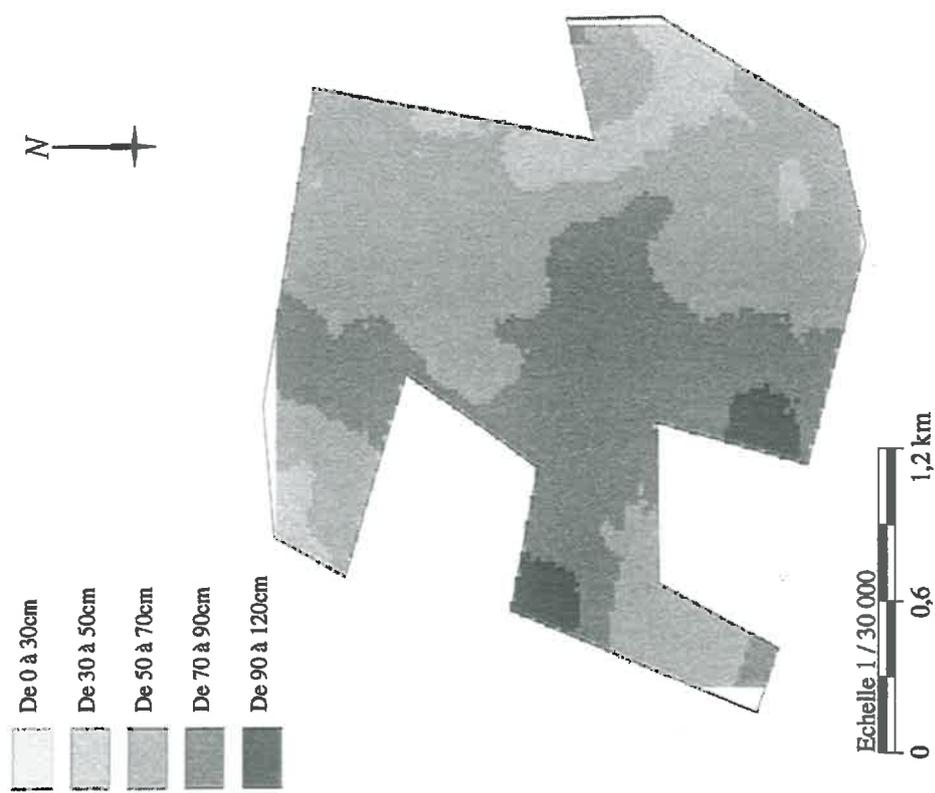


Figure 9.8 : Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée par **krigeage ordinaire avec une dérive linéaire** : **krigeage universel.**

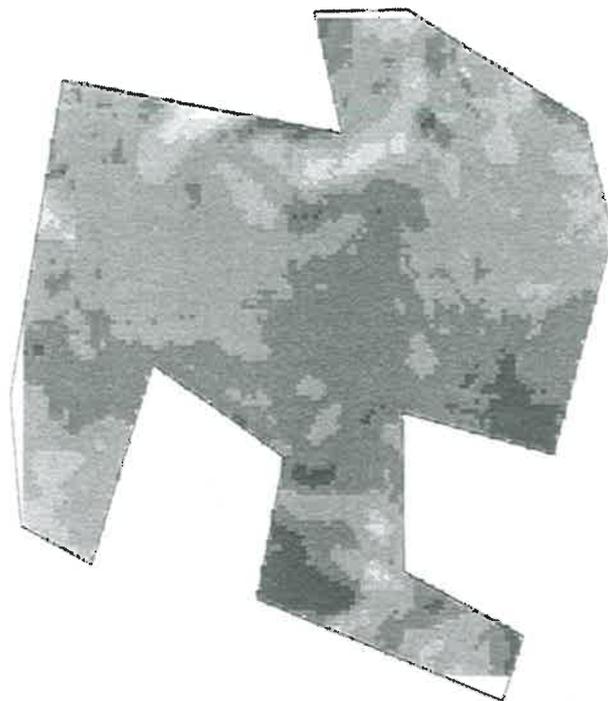


Figure 9.9 : Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée par **krigeage universel à partir des données d'épaisseur avec l'intensité de la pente utilisée comme dérive externe.**

Tableau 9.6 : Paramètres des fonctions de régression entre les variables *EPAL* et β au niveau des points d'observation et aux noeuds de la grille d'estimation.

	<i>Ordonnée à l'origine</i>	<i>pente de la droite</i>	<i>Coef. de corrélation</i>
<i>Aux points d'observation</i>	97,1	-25,5	-0,7
<i>Aux noeuds de la grille d'estimation</i>	101,3	-28,7	-0,8

2.2.4 : Estimation de *EPAL* avec une dérive linéaire : krigeage universel

Des polynômes d'ordre 1 et d'ordre 2 (une dérive linéaire et une dérive quadratique) sont testés par validation croisée. Le polynôme d'ordre 1 donne la plus faible erreur quadratique moyenne. Ainsi, pour cette étude on admet que la dérive dans la variable *EPAL* est une fonction linéaire.

Il faut cependant souligner que la dérive n'est pas toujours constante dans toutes les directions de l'espace. Dans de tels cas, une approche plus sophistiquée est utilisée, basée sur les fonctions aléatoires intrinsèques d'ordre k (*FAI-k*) et utilisant les covariances généralisées au lieu des variogrammes (Mathéron, 1973 ; Chauvet & Galli, 1982).

Sur la base du système d'équations (27), la variable *EPAL* est krigée avec une dérive linéaire. Les résultats de cette estimation (Fig. 9.8) présentent une très grande ressemblance avec ceux obtenus par krigeage ordinaire (Fig. 9.4). Cependant, nous remarquons l'absence de surface où la variable *EPAL* est inférieure à 30 cm, ainsi qu'une partie négligeable de surfaces avec une épaisseur supérieure à 90 cm (Tableau 9.4, méthode KU). Etant donné que nous avons rencontré ces catégories d'épaisseur de la variable *EPAL* lors de la prospection pédologique, nous pouvons a priori dire que la carte (Fig. 9.8) n'est pas très satisfaisante. De plus l'aspect uniforme de cette carte ne rend pas compte de la variabilité de *EPAL*. Ce dernier point est aussi valable pour la carte issue du KO.

2.2.5 : Utilisation de l'intensité de la pente comme dérive externe pour estimer la variable *EPAL*

Les résultats du paragraphe précédent nous ont conduit à choisir une autre technique de géostatistique qui intègre explicitement les données de l'intensité de la pente connues d'une façon exhaustive sur le domaine d'étude et en relation linéaire avec *EPAL* dans le système de krigeage universel. Dans cette méthode, on fait l'hypothèse d'une relation linéaire entre *EPAL* et β . Cette hypothèse est très importante dans l'estimation de *EPAL* par la méthode de la dérive externe. Ainsi, si une fonction non linéaire décrit la relation entre les deux variables, cette fonction est utilisée pour transformer les données de la variable β . Les données transformées sont alors utilisées comme dérive externe.

La variable β est connue aux noeuds de la grille d'estimation et aux points où *EPAL* est mesurée. Le système d'équations (37) est alors utilisé pour estimer *EPAL* aux noeuds d'une grille avec l'intensité de la pente utilisée comme une dérive externe. Préalablement à l'estimation proprement dite, la dérive optimale pour la variable *EPAL* est déterminée. Il s'agit des fonctions $(1, F_1 \text{ et } 1, x y, F_1)$ ce qui correspond à la condition d'universalité, une dérive linéaire (dérive interne) et la condition de dérive externe (F_1 représente la contrainte induite par la dérive externe intensité de la pente estimée ci-dessus). La covariance optimale est un effet de

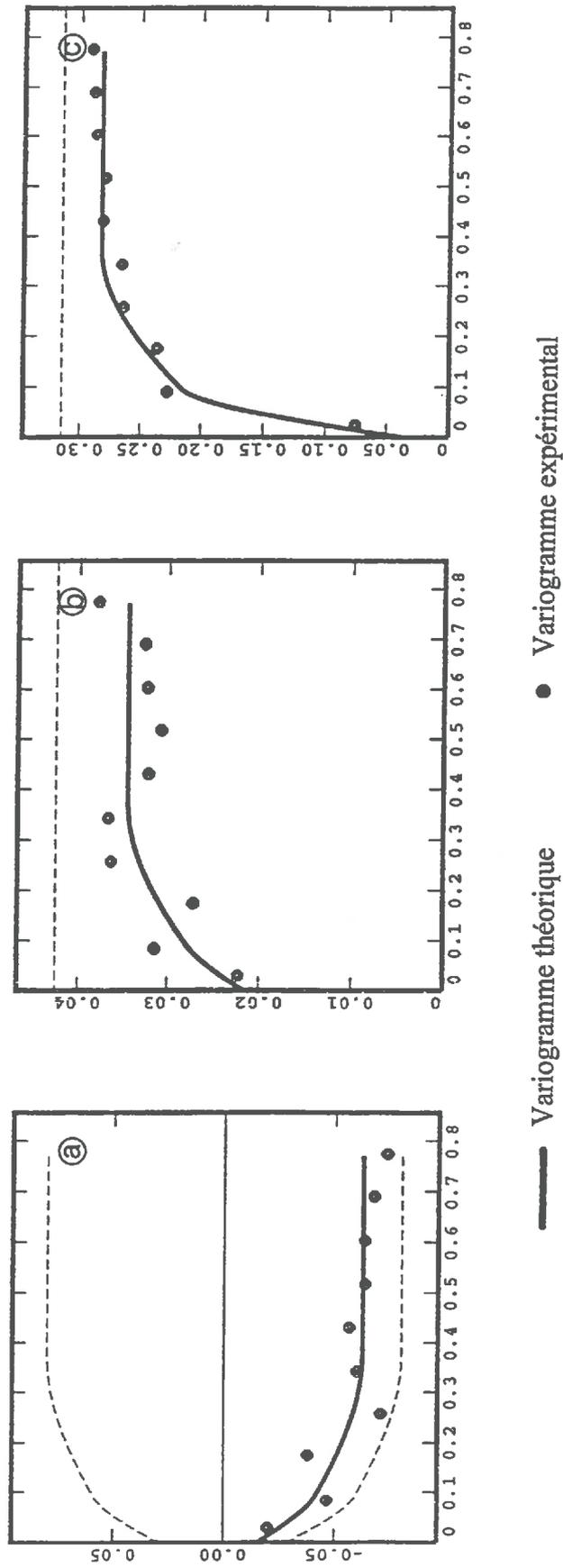


Figure 9.10 : Variogrammes expérimentaux et théoriques directs et croisé des variables épaisseur de l'argile limoneuse et intensité de la pente. (a) variogramme croisé ; (b) variogramme de l'épaisseur de l'argile limoneuse ; (c) variogramme de l'intensité de la pente.

pépite pure. Ce choix est confirmé par la validation croisée. La figure 9.9 montre le résultat de l'estimation de *EPAL* par krigeage universel à partir des données d'épaisseur avec l'intensité de la pente utilisée comme dérive externe. Cette carte reflète bien la réalité rencontrée lors de la prospection pédologique à savoir une forte variabilité de *EPAL*. Les statistiques calculées sur la grille d'estimation sont résumées dans le tableau 9.4 (méthode KUDEX).

2.2.6 : Analyse variographique multivariable et cokrigeage ordinaire de la variable *EPAL*

Pour tester la faisabilité de l'utilisation du cokrigeage dans l'estimation de la variable *EPAL*, 132 points d'observation de la variable β sont sélectionnés selon une grille régulière de 200 m x 200 m. Au même temps, β est connue au niveau des 150 points d'observation de la variable *EPAL*. Ainsi, nous avons β en 282 points dont 150 sont en commun avec *EPAL*. Cette situation nous place dans un cas de cokrigeage hétérotopique partielle.

La figure 9.10 montre les variogrammes directs et le variogramme croisé relatifs aux variables *EPAL* et β . Ces variogrammes sont ajustés par une structure gigogne (un effet de pépite plus deux modèles sphériques) dont les coefficients sont résumés dans le tableau 9.7. La validité des variogrammes est vérifiée par la procédure de validation croisée qui donne respectivement pour *EPAL* et β : (1) $R_e = -0,006$ et $s_{Re}^2 = 1,07$; (2) $R_e = 0,014$ et $s_{Re}^2 = 0,99$.

Tableau 9.7 : Coefficients des fonctions théoriques des variogrammes et du variogramme croisé.

	<i>EPAL</i>	β	<i>EPAL</i> / β
Effet de pépite : c_0	0,022 (m) ²	0,037 (%) ²	-0,016 (m x %)
Premier modèle sphérique portée : a (m) palier : c_2	94,51 0,003 (m) ²	94,51 0,139 (%) ²	94,51 -0,014 (m x %)
Deuxième modèle sphérique portée : a (m) palier : c_2	373,1 0,01 (m) ²	373,1 0,107 (%) ²	373,1 -0,033 (m x %)

Le cokrigeage de la variable *EPAL* en voisinage glissant donne la carte (Fig. 9.11) dont les statistiques sommaires sont résumées dans le tableau 9.4 (méthode COHP). Cette carte présente de fortes similitudes avec la figure 9.4 avec cependant un aspect plus fragmenté pour la carte obtenue par cokrigeage. Cette aspect pourrait être signe d'une plus grande précision. Cela dit, nous remarquons que les surfaces où *EPAL* est inférieure à 30 cm sont absentes. Ceci ne correspond pas à la réalité du terrain surtout à l'Est et au Sud-Est de la surface d'étude.

2.2.7 : Estimation de *EPAL* par deux méthodes combinant la régression et le krigeage ordinaire

La régression linéaire multiple (RLM3) entre *EPAL* et les attributs morphologiques (β , $\sin \varphi$ et *Alt*) explique plus de variabilité totale et donne l'écart type résiduel le plus faible par rapport à la régression linéaire simple (*EPAL* et β : RLS) et la régression linéaire multiple avec deux variables explicatives (β , $\sin \varphi$: RLM2). RLM3 fournit particulièrement des valeurs estimées de *EPAL* (\hat{EPAL}) et des résidus (ϵ). Pour les raisons énoncées ci-dessus, les résultats (\hat{EPAL}



Figure 9.11 : Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée par cokrigage à partir des données d'épaisseur et d'intensité de la pente.

et ε) de la RLM3 sont utilisés dans des opérations d'estimation qui permettent d'obtenir les figures 9.12 et 9.13 et dont les statistiques sommaires sont résumées sur les deux dernières lignes du tableau 9.4.

La figure 9.12 est obtenue par ce que nous avons appelé le modèle 1 (Mod.1) et qui utilise les étapes suivantes :

- l'estimation aux noeuds d'une grille de 20 m par krigeage ordinaire à partir des 150 valeurs de \hat{EPAL} : on obtient \hat{EPAL}_{KO} ,
- l'estimation aux noeuds d'une grille de 20 m par krigeage ordinaire à partir des 150 valeurs de ε : on obtient ε_{KO} ,
- enfin, la figure 9.12 est obtenue, en effectuant la somme ($\hat{EPAL}_{KO} + \varepsilon_{KO}$) au niveau de chaque noeud de la grille d'estimation.

Cette carte (Fig. 9.12) est très identique à celle obtenue par krigeage ordinaire (Fig. 9.4) et on note l'absence de surface où l'épaisseur est inférieure à 30 cm.

La figure 9.13 est obtenue par le modèle 2 (Mod.2) en effectuant la somme des valeurs obtenues aux noeuds de la grille d'estimation en appliquant le modèle de RLM3 (Fig. 9.2c), aux valeurs issues du krigeage ordinaire des résidus de la RLM (ε_{KO}).

Cette carte (Fig. 9.13) présente un aspect beaucoup moins lissé que la précédente. Ceci est dû au fait que dans la carte issue du Mod.2, les valeurs résultant de la RLM3 ne sont pas lissées par le krigeage et que le krigeage des résidus de la régression n'influence pas le résultat sur le plan lissage de la carte. Cela étant, cette carte reflète mieux la réalité observée sur le terrain à savoir une forte variabilité de $EPAL$ sur de courtes distances, de plus nous remarquons que l'ensemble des catégories d'épaisseur observées sur le terrain sont représentées.

3. Comparaison des méthodes d'estimation

3.1 : Procédures de validation

A l'instar des travaux de nombreux auteurs (Creutin & Obled, 1982 ; Van Kuilenburg *et al.*, 1982 ; Laslett *et al.*, 1987 ; Leenaers *et al.*, 1990 ; Voltz & Webster, 1990 ; Voltz & Goulard, 1994 ; Odeh *et al.*, 1994 ; Bourennane *et al.*, 1996), nous avons réalisé 75 observations donnant une information sur $EPAL$ dans une optique de validation des différentes méthodes d'estimation utilisées (échantillon de validation). Pour chaque méthode d'estimation, nous calculons l'erreur moyenne (ME) définie par

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z_i^* - z_i] \quad (48)$$

qui devrait être proche de zéro pour les méthodes d'estimation non biaisées, et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne ($RMSE$) donnée par l'expression

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [z_i^* - z_i]^2 \right\}^{0.5} \quad (49)$$

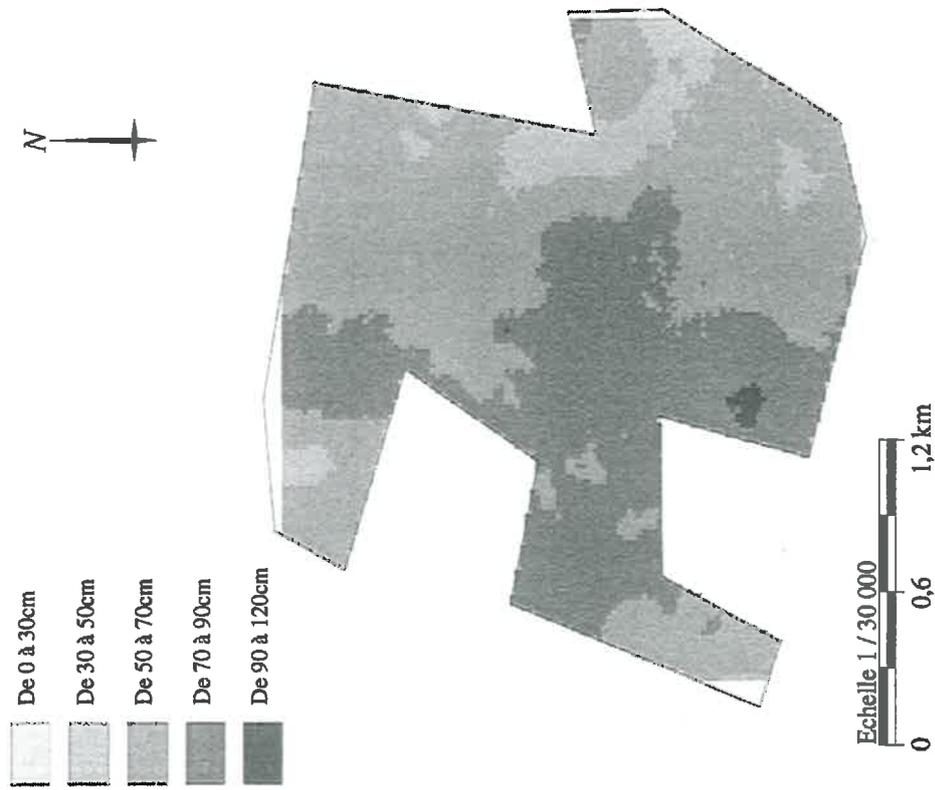


Figure 9.12 : Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée à partir d'un **modèle combinant la régression classique et le krigeage ordinaire : Modèle 1 (Mod.1).**

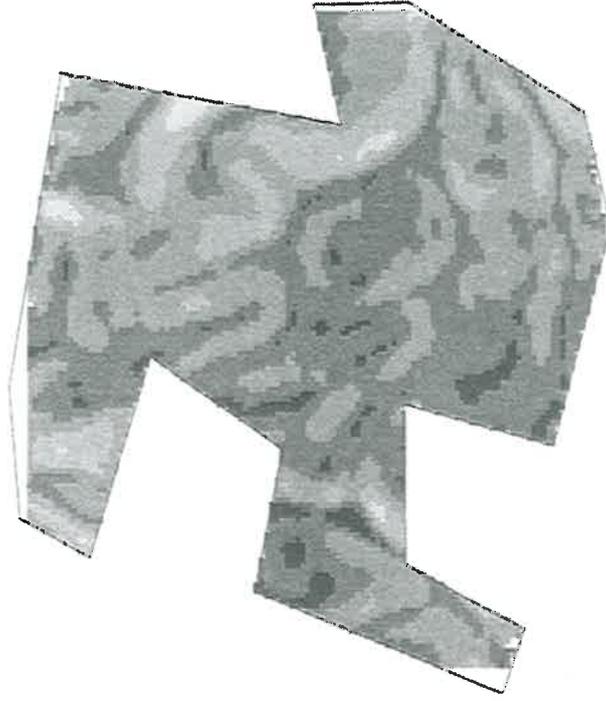


Figure 9.13 : Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée à partir d'un **modèle combinant la régression classique et le krigeage ordinaire : Modèle 2 (Mod.2).**

et qui devrait avoir la plus petite valeur possible pour une estimation précise et sans biais. Un dernier test est basé sur le rang moyen (R_i) de chaque méthode d'estimation

$$R_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N r_{ij}, \quad (50)$$

où r_{ij} est le rang de la i ème méthode au j ème point. Nous calculons aussi les écarts-types des rangs

$$SD = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (r_{ij} - R_i)^2 \right]^{0.5} \quad (51)$$

La méthode qui estime au mieux a un faible rang moyen et un faible écart-type de rang.

3.2 : Résultats

Les individus de l'échantillon de validation sont informés des valeurs de *EPAL* estimées par les différentes méthodes d'estimation utilisées. Les résultats de la comparaison des méthodes d'estimation sont résumées dans le tableau 9.8.

Tableau 9.8 : Résultats des procédures de validation.

	<i>ME</i>	<i>RMSE</i>
Effectif	75	75
RLS	9,90	24,08
RLM2	9,16	23,87
RLM3	13,79	25,52
KO	4,18	17,49
KODEX	7,59	20,10
KU	3,96	17,16
KUDEX	5,50	14,59
COHP	5,89	18,00
Mod.1	3,99	17,75
Mod.2	8,25	21,63

ME = erreur moyenne. *RMSE* = racine carrée de l'erreur quadratique moyenne.

RLS = régression linéaire simple, RLM2 = régression linéaire multiple avec deux variables explicatives, RLM3 = régression linéaire multiple avec trois variables explicatives, KO = krigeage ordinaire, KODEX = krigeage ordinaire avec dérive externe, KU = krigeage universel, KUDEX = krigeage universel avec dérive externe, COHP = cokrigeage hétérotopique partielle, Mod.1 = modèle régression-krigeage modèle 1, Mod.2 = modèle régression-krigeage modèle 2.

Les erreurs moyennes d'estimation (Tab. 9.8) sont inférieures à 10 cm à l'exception de RLM3 ($ME = 13,79$). Nous remarquons que les estimations par krigeage universel et par Mod.1 donnent les plus faibles valeurs de l'erreur moyenne et que globalement les deux méthodes qui utilisent uniquement les données de *EPAL* dans l'estimation donnent les plus faibles valeurs de l'erreur moyenne : (1) $ME = 3,96$ pour le krigeage universel ; (2) $ME = 4,18$ pour le krigeage ordinaire. Cependant, il faut prendre les valeurs de l'erreur moyenne avec précaution car, pour cet indice, les biais négatifs et les biais positifs d'estimation tendent à se compenser. Enfin, nous pouvons affirmer que l'introduction de l'altitude comme troisième variable explicative dans le modèle de régression (RLM3) ne permet pas d'obtenir de

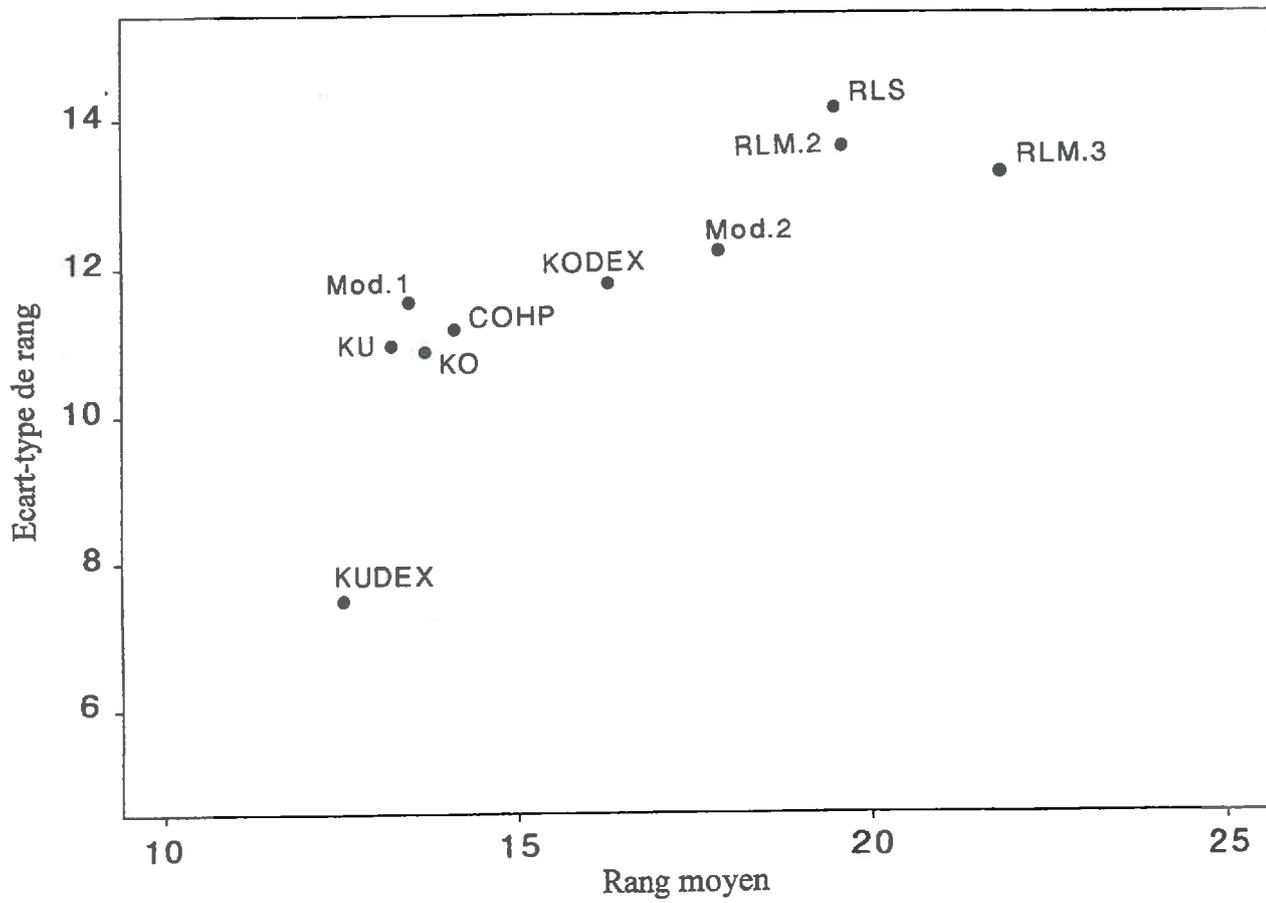


Figure 9.14 : Ecart-types des rangs en fonction des rangs moyens.

meilleures estimations. D'après les chiffres du tableau 9.8, la régression linéaire multiple avec deux variables explicatives (β et $\sin\phi$) est la plus performante par rapport aux modèles RLS et RLM2.

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) indique que le krigeage universel avec dérive externe (KUDEX) est la méthode la plus précise dans le cas étudié. Le gain de précision (Tab. 9.9) entre l'estimation par krigeage universel (qui vient en seconde position en terme de précision sur la base de *RMSE*) et l'estimation par krigeage universel avec dérive externe est de 15 % en moyenne.

Tableau 9.9 : Gain de précision par rapport à la méthode de la dérive externe (KUDEX).

Méthodes d'estimation	Gain de précision (%)
RLS - KUDEX	39,41
RLM2 - KUDEX	38,88
RLM3 - KUDEX	42,83
KO - KUDEX	16,58
KODEX - KUDEX	27,41
KU - KUDEX	14,98
COHP - KUDEX	18,94
Mod.1 - KUDEX	17,80
Mod.2 - KUDEX	32,55

Les résultats de comparaison de la performance des méthodes d'estimation sur la base de ces deux indices (*ME* et *RMSE*) sont un peu en contradiction et sont par conséquent ambiguës. Ainsi, pour avoir une mesure d'estimation plus révélatrice, nous calculons le rang moyen d'estimation (R_i) pour chaque méthode et les écarts-types (*SD*) des rangs. La figure 9.14 montre *SD* en fonction de R_i . Nous remarquons, comme l'indique déjà l'indice *RMSE*, que l'estimation de *EPAL* à partir des données de *EPAL* avec une 'dérive interne' et l'intensité de la pente utilisée comme 'dérive externe' est la plus précise (le plus faible rang moyen $R_i = 12,52$ et le plus faible écart-type des rangs $SD = 7,49$) par rapport aux autres méthodes utilisées.

On note aussi que, quel que soit l'indice considéré, les modèles de régression et Mod.2 (estimation en grande partie à base de régression linéaire multiple) constituent les méthodes d'estimation les moins performantes (Tab. 9.9 et Fig. 9.14).

Enfin, le calcul de l'intervalle de confiance donné par l'expression

$$\bar{d} \pm t_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{SCE_d}{n(n-1)}}, \quad (52)$$

où \bar{d} est la moyenne des différences entre les deux échantillons considérés, la valeur $t_{1-\frac{\alpha}{2}}$ est relative à une distribution *t* à $n-1$ degrés de liberté et SCE_d est la somme des carrés des écarts de la différence entre les deux échantillons considérés, est effectué sur des échantillons associés par paires. En effet, le test par paires est d'autant plus sensible ou d'autant plus puissant que les deux échantillons sont plus fortement corrélés (Dagnelie, 1970).

Le tableau 9.10 montre les intervalles de confiance pour l'ensemble des méthodes d'estimation considérées prises deux à deux. Nous pouvons constater par exemple qu'entre KUDEX et RLM3, l'erreur moyenne est comprise vraisemblablement entre 5,06 et 11,52.

Tableau 9.10 : Intervalle de confiance de la différence de deux moyennes.

	RLS	RLM2	RLM3	KO	KODEX	KU	KUDEX	COHP	Mod.1	Mod.2
RLS	\									
RLM2	-0,11 1,59	\								
RLM3	-5,11 -2,68	-5,62 -3,64	\							
KO	2,54 8,89	1,73 8,23	6,45 12,76	\						
KODEX	-0,23 4,83	-0,89 4,02	3,85 8,53	-5,41 -1,42	\					
KU	2,74 9,12	1,93 8,46	6,64 13,01	-0,31 0,74	1,58 5,68	\				
KUDEX	1,01 7,78	0,26 7,06	5,06 11,52	-3,62 0,98	-0,14 4,34	-3,73 0,67	\			
COHP	1,21 6,80	0,37 6,16	5,01 10,79	-2,79 -0,64	-0,29 3,70	-2,87 -0,98	-2,61 1,82	\		
Mod.1	3,04 8,76	2,19 8,12	6,89 12,69	-0,77 1,14	1,43 5,76	-0,93 0,86	-0,80 3,80	0,85 2,94	\	
Mod.2	-0,06 3,35	-0,64 2,45	4,37 6,69	-6,63 -1,52	-2,45 1,13	-6,88 -1,69	-5,44 -0,07	-4,77 0,04	-6,68 -1,83	\

Conclusions du chapitre IX

Dans ce chapitre, nous avons estimé l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux (*EPAL*) sur une surface de 380 hectares. Pour ce faire, nous avons utilisé plusieurs méthodes d'estimation. Ces méthodes peuvent être distinguées ainsi :

1. les méthodes non spatiales : estimations réalisées par régression linéaire simple et multiple,
2. les méthodes spatiales dans lesquelles l'estimation a été réalisée : (i) directement à partir des données de *EPAL* par utilisation du krigeage ordinaire (KO) et du krigeage universel (KU) ; (ii) par utilisation simultanée des données de *EPAL* et des données de l'intensité de la pente (β). Dans ce cas, les méthodes d'estimation utilisées sont le krigeage ordinaire avec dérive externe (KODEX), le krigeage universel avec dérive externe (KUDEX), et le cokrigeage hétérotopique partielle (COHP),
3. les méthodes couplées : estimation par des modèles qui combinent la régression linéaire multiple et le krigeage ordinaire et où nous avons distingué deux scénarios.

Ces différentes estimations sont réalisées sur la base : (i) d'un échantillon de 150 individus (échantillon d'estimation) où nous avons l'information sur les valeurs de *EPAL* et sur les

valeurs des différents attributs morphologiques issus du Modèle Numérique de Terrain (MNT) ; (ii) de l'intensité de la pente connue de façon exhaustive sur la surface d'étude.

Pour tester la performance de chacune des méthodes d'estimation utilisées, nous avons : (i) informé 75 individus d'un échantillon de validation avec les valeurs de *EPAL* estimées suivant les différentes méthodes. Ainsi, pour chaque valeur de *EPAL* mesurée dans l'échantillon de validation, correspond dix valeurs estimées ; (ii) mesuré quatre indices qui sont l'erreur moyenne (*ME*), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*), le rang moyen de chaque méthode d'estimation (R_i) et les écarts types des rangs (*SD*).

Les erreurs moyennes d'estimation indiquent les plus faibles biais d'estimation pour le krigeage universel et le krigeage ordinaire, autrement dit pour les méthodes qui utilisent uniquement les données de *EPAL* dans l'estimation. Cependant, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne montre que la méthode qui intègre l'intensité de la pente comme dérive externe dans le système d'équations du krigeage universel (*KUDEX*) est la plus précise. Le gain de précision varie de 15 à 40 % suivant la méthode d'estimation considérée, par rapport au krigeage universel avec une dérive externe (*KUDEX*). Par exemple, si uniquement la régression linéaire multiple d'une part et le krigeage universel avec dérive externe d'autre part étaient utilisés pour estimer *EPAL*, nous aurions obtenu un gain de précision de 43 % (Tab. 9.9).

Les deux derniers indices calculés (R_i et *SD*) confirment que l'estimation par la méthode de la dérive externe (*KUDEX*) est la méthode d'estimation la plus précise dans le cas de cette étude. Cependant, il faut souligner que dans cette méthode, on ne tient pas compte des possibles incertitudes sur la variable auxiliaire utilisée (intensité de la pente pour cette étude), ainsi la carte des erreurs associées à la carte de la variable d'intérêt (*EPAL*) estimée par *KUDEX* doit être prise avec précaution.

La multiplication des méthodes pour estimer *EPAL* peut se justifier par le fait que : (i) nous cherchons à estimer au mieux l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux qui joue un rôle important dans la modélisation des transferts des flux sur le secteur de la Petite Beauce ; (ii) nous ne pouvons pas conclure par rapport à la source de l'amélioration de l'estimation, si nous nous contentons de comparer par exemple uniquement le krigeage ordinaire (*KO*) et le krigeage universel avec une dérive externe (*KUDEX*). Autrement dit, en affirmant que *KUDEX* est la méthode la plus précise, nous ne pouvons pas savoir si la 'dérive interne' liée à l'algorithme du krigeage universel est à l'origine de cette amélioration ou bien si c'est l'inclusion de la 'dérive externe' (intensité de la pente) qui améliore l'estimation. La comparaison des performances entre les méthodes indique, dans le cas de cette étude, que c'est la présence simultanée des deux dérives (interne et externe) qui améliore l'estimation (*RMSE* = 17,49 pour *KO*, 17,16 pour *KU* et 14,59 pour *KUDEX*).

Le cokrigeage a également été utilisé, car dans la littérature, nous constatons qu'il est le plus pratiqué quand il s'agit d'estimer une variable peu échantillonnée sur un domaine spatial à partir des données de cette variable et des données d'une autre variable plus échantillonnée sur le même domaine spatial. Cependant, il est souvent difficile de modéliser une corégionalisation surtout quand les variables sont hétérogènes et que la variable d'intérêt (variable à estimer) est peu échantillonnée. Ses performances restent, dans le cas de cette étude, proches du krigeage ordinaire et du krigeage universel sans atteindre celles du krigeage universel avec dérive externe.

La régression linéaire multiple présente l'avantage d'exiger seulement $(p + 2)$ paramètres à estimer (p étant le nombre de variables explicatives utilisées), alors qu'un cokrigeage par exemple demande pour chaque variable aléatoire le calcul de trois paramètres (effet de pépite + portée + palier) pour les variogrammes directs et le variogramme croisé. Ainsi, si le gain de précision n'est pas conséquent, la régression linéaire multiple reste une méthode très pratique surtout sur de grandes surfaces. Quant aux méthodes qui combinent la régression et le krigage ordinaire, particulièrement Mod.1 dans le cas de cette étude, elles présentent un grand potentiel à minimiser l'erreur moyenne d'estimation.

Il faut souligner aussi que les estimations par les méthodes spatiales monovariées (KO et KU) fournissent des cartes présentant un aspect lissé et très homogène. Ce résultat est normal car il est dû en grande partie à la forme de l'estimateur lui-même dans le cas de ces méthodes d'interpolation. Cependant, ce type de carte ne correspond pas à la réalité du terrain où souvent une plus grande variabilité est observée.

Les résultats obtenus sont évidemment dépendants des données de notre étude, c'est-à-dire de la structure spatiale des variables (analyse variographique) et de l'intensité des relations entre ces variables (analyse corrélative). Pour d'autres jeux de données, les résultats pourraient être différents. Toutefois, nous pouvons tirer quelques enseignements d'ordre général.

Le développement de la géostatistique a permis de mettre au point un grand nombre de méthodes d'interpolation dérivées du krigage. Elles ont pour point commun de calculer l'interpolateur comme une moyenne mobile des données, les poids affectés à chaque donnée étant calculés de façon à minimiser l'erreur d'estimation.

Lorsque l'on dispose de données hétérogènes, nous sommes amenés à se poser la question suivante : comment utiliser au mieux l'information dense pour améliorer l'estimation à partir des données ponctuelles ? A cette question nous ne pouvons pas répondre de manière unique. Selon les cas, nous retiendrons telle méthode ou telle autre, les critères à utiliser pouvant être les suivants :

- le degré de corrélation de la variable d'intérêt avec les données de la variable exhaustive,
- le modèle permettant de mieux expliquer la variable d'intérêt à partir d'une procédure de validation croisée,
- la confiance que l'on accorde aux différentes variables exhaustives.

La densité d'échantillonnage, liée au coût de l'information guidera en priorité l'utilisation de telle ou telle méthode en fonction des objectifs de précision souhaitée.

Chapitre X : Sensibilité du modèle de répartition des sols et généralisation des résultats à partir des données disponibles

Introduction

L'objectif dans ce chapitre est de tester : (1) la sensibilité du modèle de répartition de l'épaisseur de l'argile limoneuse à la densité de l'échantillonnage et à la précision des variables qui le constituent ; (2) l'effet de la taille du domaine d'étude sur le modèle de distribution spatiale des sols ; et (3) les possibilités de généralisation des résultats établis sur des petits secteurs à une surface de 3500 ha.

Nous nous contentons de comparer les résultats issus de l'estimation par la méthode de la dérive externe (KUDEX) et ceux issus de la régression linéaire multiple (RLM) car :

- le KUDEX fournit la meilleure estimation en moyenne de l'épaisseur de l'argile limoneuse (*cf. chapitre IX*),
- la RLM est la méthode la plus utilisée en cartographie du sol quand il s'agit de réaliser ce qu'on appelle une généralisation spatiale d'un modèle de répartition des sols à une surface plus grande,
- les deux méthodes d'estimation tiennent compte de la relation sol-morphologie du relief dans l'estimation de la variable sol.

1. Sensibilité du modèle à la densité d'échantillonnage

Dans ce paragraphe, nous nous proposons de tester l'effet de : (1) la densité d'échantillonnage de la variable d'intérêt (épaisseur de l'argile limoneuse) ; (2) la précision du Modèle Numérique d'Altitude (MNA) et de ses attributs dérivés sur les performances de la méthode de la dérive externe (KUDEX) et sur les performances de la régression linéaire multiple avec deux variables explicatives (RLM2).

1.1 : Effet de la densité d'échantillonnage de la variable d'intérêt

Afin d'examiner l'influence de la densité d'observation de la variable d'intérêt (épaisseur de l'argile limoneuse) sur les performances de chacune des deux méthodes d'estimation retenues (KUDEX et RLM2), cinq scénarios d'échantillonnage ont été envisagés de 40, 50, 75, 100 et 125 individus choisis de façon aléatoire parmi les 150 individus du secteur des 380 ha (cf. chapitre IX). Pour chaque scénario, nous avons réalisé une estimation de l'épaisseur de l'argile limoneuse sur la surface des 380 ha par : (1) la méthode de la dérive externe décrite dans le chapitre IX ; (2) la régression linéaire multiple à deux variables explicatives. Dans ces deux cas d'estimation, la dérive externe pour le KUDEX et les variables explicatives pour la RLM2 sont issues du MNA établi à partir d'un levé topographique (cf. chapitre VI).

Les différentes estimations de l'épaisseur de l'argile limoneuse étant réalisées, l'échantillon de validation de 75 individus du chapitre IX a été utilisé pour mesurer les performances de chacune des deux méthodes en fonction de la densité d'échantillonnage de la variable d'intérêt. Ainsi, chacun des 75 individus a été informé de dix valeurs différentes de l'épaisseur de l'argile limoneuse estimées successivement par KUDEX et RLM2.

Le tableau 10.1 résume les valeurs de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) pour les différents scénarios d'échantillonnage et pour chacune des deux méthodes d'estimation considérées.

Tableau 10.1 : Mesure des performances de la méthode de la dérive externe et de la régression linéaire multiple suivant la densité d'échantillonnage de la variable d'intérêt.

Nombre d'individus	40	50	75	100	125	150*
<i>RMSE</i> (KUDEX)	21,5	18	19	15,3	15,3	14,6
<i>RMSE</i> (RLM2)	22,6	22,6	22	22	23,9	23,9

* Ce cas correspond aux traitements réalisés dans le chapitre IX.

Nous constatons pour le cas de la méthode de la dérive externe (KUDEX), que la valeur de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) décroît progressivement au fur et à mesure que la densité d'échantillonnage de la variable d'intérêt augmente (Tab. 10.1). La valeur de *RMSE* a tendance à se stabiliser à partir de l'échantillon de 100 individus. Le gain de précision par cette méthode atteint 32 %, quand nous passons d'une estimation à partir d'un échantillon de 40 individus à une estimation à partir d'un échantillon de 150 individus.

Les valeurs de la *RMSE* dans le cas de la régression linéaire multiple restent assez stables jusqu'à un échantillon de 100 individus. Autrement dit, le gain de précision par RLM n'est que d'environ 3 % entre une estimation à partir d'un échantillon de 40 individus et une estimation à partir d'un échantillon de 100 individus sur la variable d'intérêt. Nous constatons aussi, dans le cas de la RLM, que la valeur de la *RMSE* se met à augmenter pour les

échantillons de 125 et 150 individus. Cette perte de précision avec l'augmentation de la taille de l'échantillon de la variable d'intérêt dans le cas de la RLM peut s'expliquer par le fait que les modèles de régression à partir de ces deux échantillons possèdent une variance résiduelle plus élevée par rapport aux modèles relatifs aux quatre autres échantillons de plus petite taille.

L'estimation par régression linéaire multiple donne des valeurs de *RMSE* plus élevées que celles données par la méthode de la dérive externe quelle que soit la taille de l'échantillon (Tab. 10.1). La figure 10.1 montre les taux de gain de précision de l'estimation par la méthode de la dérive externe par rapport à l'estimation par régression linéaire multiple pour les différentes tailles d'échantillons. Ces taux varient entre 4 et 40 % suivant la taille de l'échantillon.

Nous pouvons ainsi dire que, quelle que soit la taille de l'échantillon de la variable d'intérêt, la méthode de la dérive externe donne en moyenne des estimations plus précises que la régression linéaire multiple dans le cas de notre étude. Ceci peut s'expliquer par le fait que dans la méthode de la dérive externe, il est tenu compte de la dépendance spatiale entre les individus lors de l'estimation. Cela étant, pour des échantillons de petites tailles par exemple celui de 40 individus, le gain n'est pas très significatif entre les deux méthodes. Ainsi, en deçà de cette densité d'échantillonnage, l'utilisation de la méthode de la dérive externe ne se justifie pas.

1.2 : Effet de la précision du MNA et de ses attributs dérivés

La variable auxiliaire pour le KUDEX (intensité de la pente) et les variables explicatives pour la RLM2 (intensité de la pente et orientation de la pente) dans le paragraphe 1.1 ainsi que dans les chapitres précédents sont issues d'un MNA établi à partir d'un levé topographique sur le terrain. Ce MNA sera appelé dans la suite de ce chapitre MNA_{inra} . Une autre façon moins coûteuse d'obtenir un MNA est de le calculer à partir des courbes de niveau indiquées sur les cartes topographiques de l'IGN au 1/25.000 (cf. chapitre VI). Il est dans ce cas moins précis ainsi que ses attributs dérivés. Ce MNA sera appelé dans la suite de ce chapitre MNA_{ign} .

L'objectif est d'étudier l'influence de la perte de précision des variables auxiliaires issues du MNA_{ign} sur la performance de l'estimation par le KUDEX et par la RLM2. Pour la variable d'intérêt (épaisseur de l'argile limoneuse), nous considérons l'échantillon de 150 individus pour réaliser cette étude.

L'estimation de l'épaisseur de l'argile limoneuse réalisée par chacune des deux méthodes (KUDEX et RLM) a permis d'informer l'échantillon de validation des 75 individus des valeurs des épaisseurs estimées.

La valeur de la *RMSE* pour l'estimation par la méthode de la dérive externe (KUDEX) utilisant le MNA_{ign} est égale à 18 (Tab. 10.2). Cette valeur diffère de celle obtenue ($RMSE = 14,6$, Tab. 10.1) avec le même échantillon (150 individus) pour la variable d'intérêt mais avec la variable auxiliaire "intensité de la pente" issue du MNA_{inra} . Cette différence correspond à un gain de précision de 19 %. Ce gain s'explique par le fait que la relation linéaire entre l'épaisseur de l'argile limoneuse et l'intensité de la pente issue du MNA_{inra} plus "précis" est plus forte ($r = -0,62$) par rapport à la même relation ($r = -0,42$) quand l'intensité de la pente est issue du MNA_{ign} . Autrement dit, ce gain de précision est dû exclusivement à la précision de la variable auxiliaire 'intensité de la pente'.

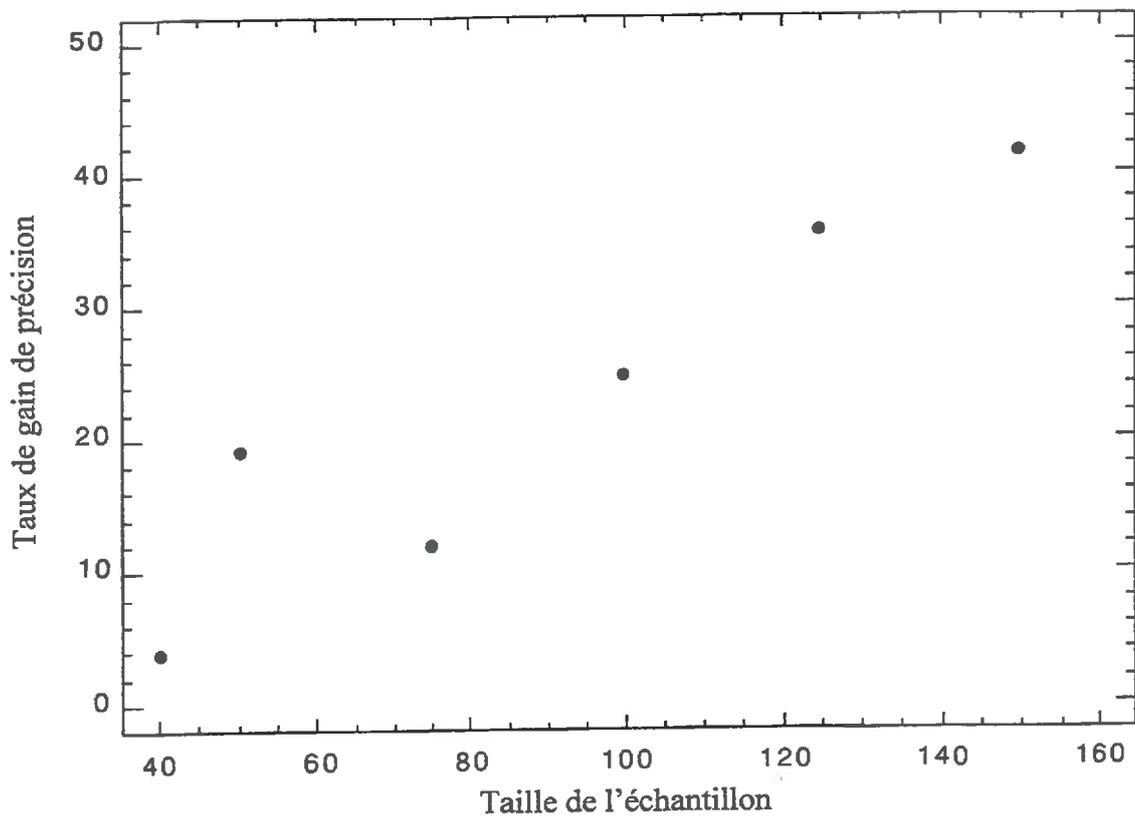


Figure 10.1 : Variation des taux de gain de précision des estimations par le KUDEX par rapport à la RLM en fonction de la densité d'échantillonnage de la variable d'intérêt.

La valeur de la *RMSE* est de 30,1 pour la validation de l'estimation par RLM2 avec le MNA_{ign} . Cette différence par rapport à la valeur 23,9 (Tab. 10.1) est due au fait que le modèle de régression qui sert à l'estimation dans ce cas n'explique que 27 % de la variabilité totale avec un écart-type résiduel de 17,8 cm alors que dans le cas des variables explicatives dérivées du MNA_{inra} , la variabilité totale expliquée par le modèle de régression représente 41 % avec un écart-type résiduel de 15,9 cm (cf. Chapitre IX Tab. 9.3).

Le tableau 10.2 montre qu'une estimation par KUDEX à partir de 50 sondages associés au MNA_{inra} fournit la même valeur de *RMSE* qu'une estimation à partir de 150 sondages associés au MNA_{ign} . De ce résultat, il ne faudrait pas en conclure que plus de sondages pédologiques suffisent à compenser un *MNA* imprécis. En effet, nous avons constaté au cours de ce travail, que la relation linéaire sur un même domaine spatial entre l'épaisseur de l'argile limoneuse et l'intensité de la pente issue du MNA_{ign} est d'autant plus faible que la densité d'observation pédologique est forte.

Tableau 10.2 : Influence de la précision de la variable auxiliaire sur l'estimation de la variable d'intérêt par KUDEX.

Taille de l'échantillon de la variable d'intérêt	Origine de la variable auxiliaire "intensité de la pente"	<i>RMSE</i>	Coefficient de corrélation linéaire*
50	MNA_{inra}	18	-0,55
150	MNA_{ign}	18	-0,42

* Il s'agit du coefficient de corrélation linéaire entre la variable d'intérêt et la variable auxiliaire aux points d'observation de la variable d'intérêt.

En résumé, nous pouvons dire que la précision de la variable auxiliaire est non seulement importante dans la minimisation de l'erreur moyenne d'estimation de la variable d'intérêt mais elle régit aussi la taille de l'échantillon de cette variable.

2. Sensibilité du modèle à la taille du domaine d'étude

Dans ce paragraphe, l'objectif est d'étudier l'influence de la taille du domaine d'étude sur le modèle de distribution de l'épaisseur de l'argile limoneuse (*EPAL*). Pour cela, nous considérons les deux secteurs de 380 et 1600 hectares définis dans les chapitres IX et VII. Pour chaque secteur, nous avons respectivement 150 et 341 observations pédologiques sur *EPAL* (Fig. 10.2) et les données morphologiques du relief issues du MNA_{inra} .

Le tableau 10.3 montre que les relations linéaires entre *EPAL* et les principaux attributs morphologiques du relief sont plus fortes sur le secteur des 1600 ha. Par conséquent, le modèle de régression qui donne l'épaisseur de l'argile limoneuse sur cette surface et qui a pour expression :

$$\hat{EPAL} = 112,2 - 44,2\beta + 0,8 \sin \varphi$$

explique 71,7 % de la variabilité totale de l'épaisseur de l'argile limoneuse avec une variance des résidus de 178,2 cm², tandis que le modèle de régression établi sur le secteur des 380 ha et qui a pour expression :

$$\widehat{EPAL} = 91 - 25,8\beta + 5,7 \sin \varphi$$

n'explique que 41 % de la variabilité totale de l'épaisseur de l'argile limoneuse pour une variance des résidus de 252,8 cm².

Cette diminution de la variance des résidus quand la taille du domaine d'étude augmente, est probablement due au fait que la densité d'observation sur le domaine de 1600 ha correspond à un individu pour 5 ha. Par conséquent, moins de variabilité spatiale est prise en compte sur ce domaine par rapport au domaine spatial des 380 ha sur lequel nous avons une observation pour 2,5 ha. De plus, sur le domaine des 380 ha, la prospection cartographique est surtout réalisée suivant des toposéquences (Fig. 10.2). Cette méthode de prospection recherche implicitement la variabilité maximale de la variable étudiée. Par conséquent, elle peut engendrer une variabilité spatiale nettement supérieure à la variabilité spatiale moyenne sur le domaine d'étude de la variable en question.

La diminution de la variance des résidus avec l'augmentation de la taille du domaine d'étude est connue en théorie (Cressie, 1991, p. 284 ; Heuvelink, 1993, p. 42). Cette diminution s'explique par le fait que la variabilité spatiale au sein d'un grand domaine se compense. Néanmoins, la valeur moyenne de la variabilité spatiale est vaguement connue.

Tableau 10.3 : Relation entre *EPAL* et les attributs du relief suivant la surface du domaine d'étude.

Surface d'étude (ha)	Taille de l'échantillon	Coefficient de corrélation linéaire		
		<i>EPAL</i> / β	<i>EPAL</i> / $\sin \varphi$	<i>EPAL</i> / <i>Alt</i>
380	150	-0,62	0,34	0,17
1600	341	-0,84	0,41	0,31

EPAL : épaisseur de l'argile limoneuse, β : intensité de la pente, $\sin \varphi$: sinus de l'orientation de la pente, *Alt* : altitude.

Nous pouvons ainsi dire que le modèle de distribution de l'épaisseur de l'argile limoneuse en fonction des principaux attributs morphologiques du relief apparaît de façon nette quand la surface est importante et la densité d'échantillonnage relativement lâche. Dès que nous considérons un domaine spatial plus petit et qu'on augmente la densité d'observation de la variable sol, le modèle perd de ses performances du fait de l'introduction d'une plus forte variabilité sur de faibles distances. Cela étant, une tendance générale se dégage étant donné que les variables explicatives restent les mêmes quelles que soient la taille du domaine et la densité d'échantillonnage.

3. Généralisation spatiale

L'objectif de ce paragraphe est de vérifier la robustesse des résultats mises en évidence sur des petits secteurs en les appliquant sur une surface plus grande. Pour cela, nous avons retenu une surface de 3500 ha (cf. chapitre II, Fig. 2.1) englobant les sites de 380 et 1600 ha précédemment définis. La cartographie de l'épaisseur de l'argile limoneuse (*EPAL*) sur la surface des 3500 ha (généralisation spatiale) est effectuée par régression linéaire multiple et par la méthode de la dérive externe. La validation de la cartographie de *EPAL* sur le secteur des 3500 ha est réalisée à partir d'un échantillon de 128 individus indépendants provenant d'une ancienne campagne de cartographie.

Les carrés indiquent la localisation des 150 individus sur le secteur des 380 ha.
Les croix indiquent la localisation des 341 individus sur le secteur des 1600 ha.



Figure 10.2 : Position relative des secteurs de 380 et 1600 ha et répartition des observations pédologiques au sein de chaque secteur.

Les carrés indiquent la localisation des 128 individus de validation.
Les croix indiquent la localisation des 341 individus d'estimation.



N
Institut National de la Recherche Agronomique



Echelle 1 / 45 000
0 0,9 1,8 km



Figure 10.3 : Localisation des observations pédologiques d'estimation et de validation sur le secteur des 3500 ha.



3.1 : Cartographie de EPAL par un modèle de régression et par la méthode de la dérive externe

Sur le secteur de 3500 ha, nous disposons (1) du MNA_{ign} et de ses attributs dérivés (cf. chapitre VI) ; (2) de 341 observations pédologiques où nous avons mesuré l'épaisseur de l'argile limoneuse ; (3) de 128 observations pédologiques qui servent à la validation. La figure 10.3 montre que l'ensemble des observations pédologiques d'estimation se situe au Nord du secteur des 3500 ha tandis que les observations pédologiques de validation sont toutes situées au Sud du secteur.

A partir des 341 observations pédologiques et des attributs morphologiques du relief dérivés du MNA_{inra} , nous avons établi dans le chapitre VII un modèle de répartition de l'épaisseur de l'argile limoneuse (EPAL) sur le secteur de 1600 ha. Les paramètres de ce modèle sont rappelés dans le tableau 10.4. Sur cette même surface de 1600 ha, un modèle de répartition de l'épaisseur de l'argile limoneuse (EPAL) est établi à partir des 341 observations citées ci-dessus et des attributs morphologiques du relief issus du MNA_{ign} (Tab. 10.4).

Tableau 10.4 : Paramètres des modèles de régression en fonction de l'origine des attributs morphologiques du relief.

Origine des attributs morphologiques du relief	Ordonnée à l'origine	Coefficients de régression		Coefficient de détermination (R^2 %)	Ecart-type résiduel (cm)
		β^*	$\sin \varphi^*$		
MNA_{inra}	122,2	-44,2	0,8	71,7	13,3
MNA_{ign}	89,4	-23,5	11,6	34,3	20,3

* β : intensité de la pente, $\sin \varphi$: sinus de l'orientation de la pente.

Nous constatons que le modèle de régression obtenu à partir de variables explicatives issues du MNA_{inra} diffère de celui établi sur la base de ces mêmes variables explicatives issues du MNA_{ign} . Les différences sont non seulement au niveau des paramètres (ordonnée à l'origine et les coefficients de régression) des deux modèles mais aussi au niveau de la variabilité totale que chaque modèle explique (Tab. 10.4). Le coefficient de régression partielle de la composante sinus de l'orientation de la pente varie d'un facteur de 10 entre les deux modèles. Cette forte différence du coefficient de régression partielle de la variable explicative 'orientation de la pente' s'explique par le fait que cette variable est très sensible à la précision du MNA.

Cela étant, si nous considérons qu'une différence maximale de 45° entre les orientations équivalentes issues des deux MNA n'est pas très importante, nous constatons (Tab. 10.5, les valeurs en gras) qu'environ 70 % de la surface totale est dans ce cas de figure (zones bleues sur la figure 10.4). Cependant, les 30 % de la surface où la différence entre les orientations équivalentes peut atteindre 90° n'est pas négligeable (zones vertes, roses et rouges sur la figure 10.4).

Il faut noter aussi que l'intensité de la pente issue des deux MNA peut être très différente par endroit. En effet, les surfaces où la différence peut atteindre 2,4 % (Fig. 10.5) ne sont pas négligeables. Ces zones de forte variation de l'intensité de la pente entre les deux MNA semblent correspondre aux fonds de talwegs.

Tableau 10.5 : Différence entre les orientations de la pente selon l'origine du MNA, exprimée en pourcentage de surface.

<i>Classe d'orientation de la pente (°)</i>	<i>Nombre d'individus</i>	<i>Pourcentage de surface</i>
0 - 45	22786	68,0
45 - 90	5363	16,1
90 - 135	1693	5,1
135 - 180	945	2,8
180 - 225	503	1,5
225 - 270	487	1,4
270 - 315	897	2,7
315 - 360	815	2,4
<i>Total</i>	33489	100

Le modèle de régression établi sur le secteur de 1600 ha à partir de 341 observations pédologiques et des attributs morphologiques issus du MNA_{ign} est utilisé pour réaliser la cartographie de l'épaisseur de l'argile limoneuse sur le secteur des 3500 ha (Fig. 10.6), étant donné que sur cette surface nous ne disposons que d'un MNA_{ign} .

La carte (Fig. 10.6) montre une grande hétérogénéité des épaisseurs particulièrement dans sa partie Sud. Cette hétérogénéité traduit le fait que les attributs morphologiques du relief varient plus dans la partie Sud du secteur des 3500 ha que dans la partie Nord.

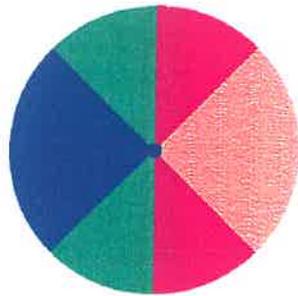
L'intensité de la pente issue du MNA_{ign} , connue de façon exhaustive sur le domaine des 3500 ha, est en relation linéaire ($r = -0,50$) significativement différente de zéro avec l'épaisseur de l'argile limoneuse aux points d'observations (341) de la variable épaisseur. Cette variable exhaustive est utilisée comme fonction de forme dans la cartographie de la variable 'épaisseur de l'argile limoneuse' (Fig. 10.7) par la méthode de la dérive externe.

La figure 10.7 présente dans sa partie Sud des structures particulières montrant une augmentation progressive de l'épaisseur de l'argile limoneuse en se dirigeant vers la partie Nord. Ces structures ne reflètent pas la réalité du terrain. En effet, une telle homogénéité sur des plages assez grandes n'a jamais été constatée lors des différentes prospections cartographiques. Cet aspect structuré de la carte (Fig. 10.7) peut s'expliquer, d'un point de vue mathématique, par le fait que, dans la partie Sud de la carte, la variable d'intérêt "épaisseur de l'argile limoneuse" n'est pas prise en compte. Par conséquent, la dérive et la covariance ne sont pas identifiées dans cette partie. Cela étant, la carte de la différence entre les épaisseurs estimées par le modèle de régression et les épaisseurs estimées par la méthode de la dérive externe (Fig. 10.8) montre surtout des plages où la différence est comprise entre 0 et 30 cm.

3.2 : Validation des résultats de la cartographie sur le secteur des 3500 ha

Afin de choisir entre une généralisation spatiale soit à partir du modèle de régression, soit à partir de la méthode de la dérive externe, une validation des résultats (Fig. 10.6 et Fig. 10.7) a été réalisée sur la base des 128 individus de l'échantillon de validation. Ainsi, chacun des 128 individus de l'échantillon de validation a été informé des valeurs de l'épaisseur de l'argile limoneuse estimées par le modèle de régression et par la méthode de la dérive externe.

Orientations des pentes:



Pentes en pourcentages:

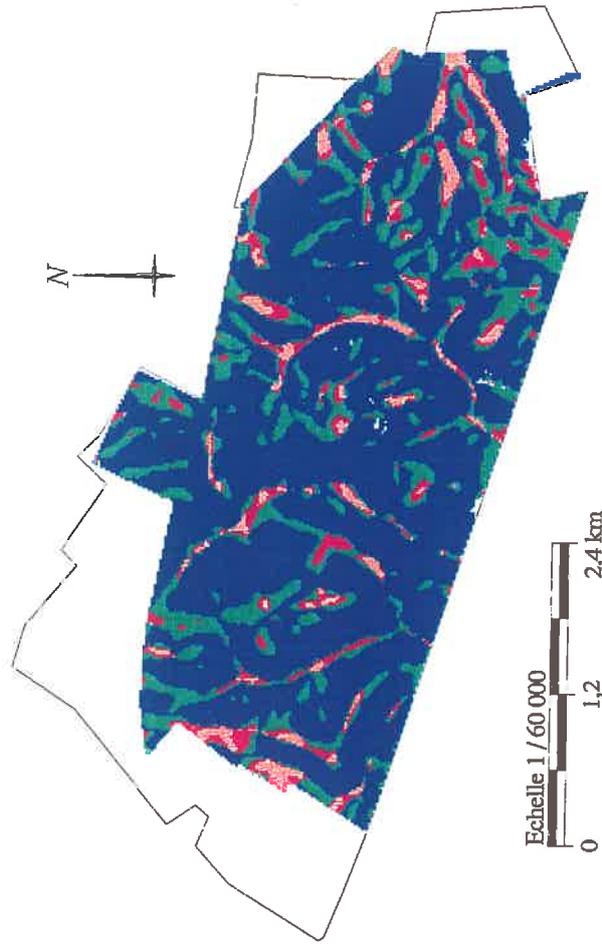
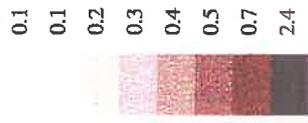


Figure 10.4 : Carte des différences entre les orientations de la pente issues du MNA estimé à partir du levé topographique et les orientations de la pente issues du MNA estimé à partir de la carte topographique.

Figure 10.5 : Carte des différences entre les intensités de la pente issues du MNA estimé à partir du levé topographique et les intensités de la pente issues du MNA estimé à partir de la carte topographique.

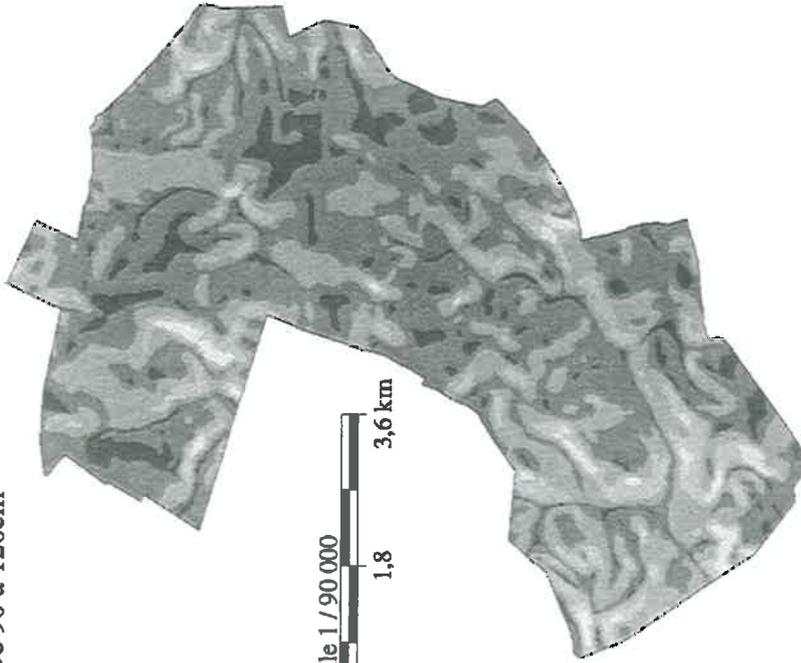
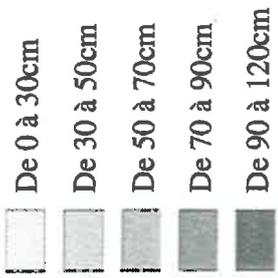


Figure 10.6 : Cartographie de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux par un modèle de régression linéaire multiple sur le secteur des 3500 ha.

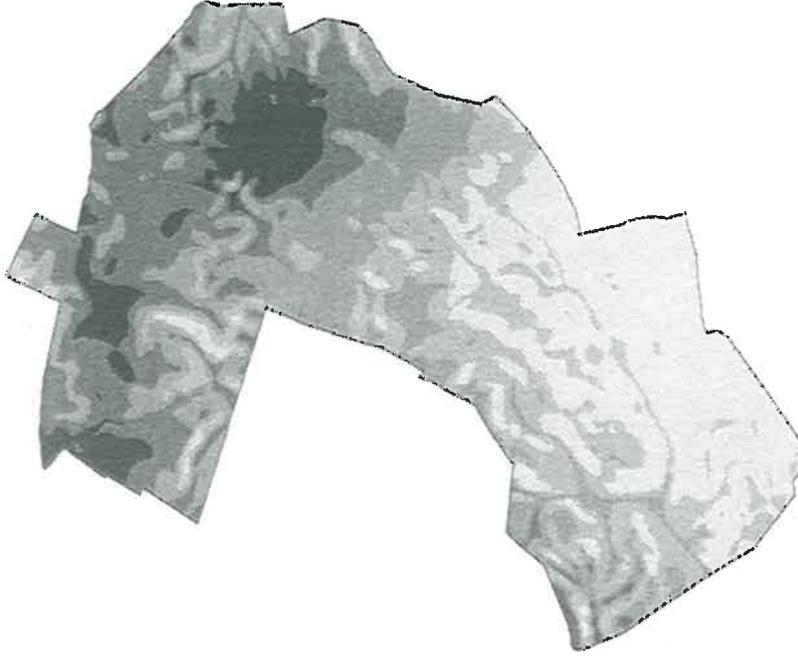


Figure 10.7 : Cartographie de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux par la méthode de la dérive externe sur le secteur des 3500 ha en utilisant l'intensité de la pente comme fonction de forme.

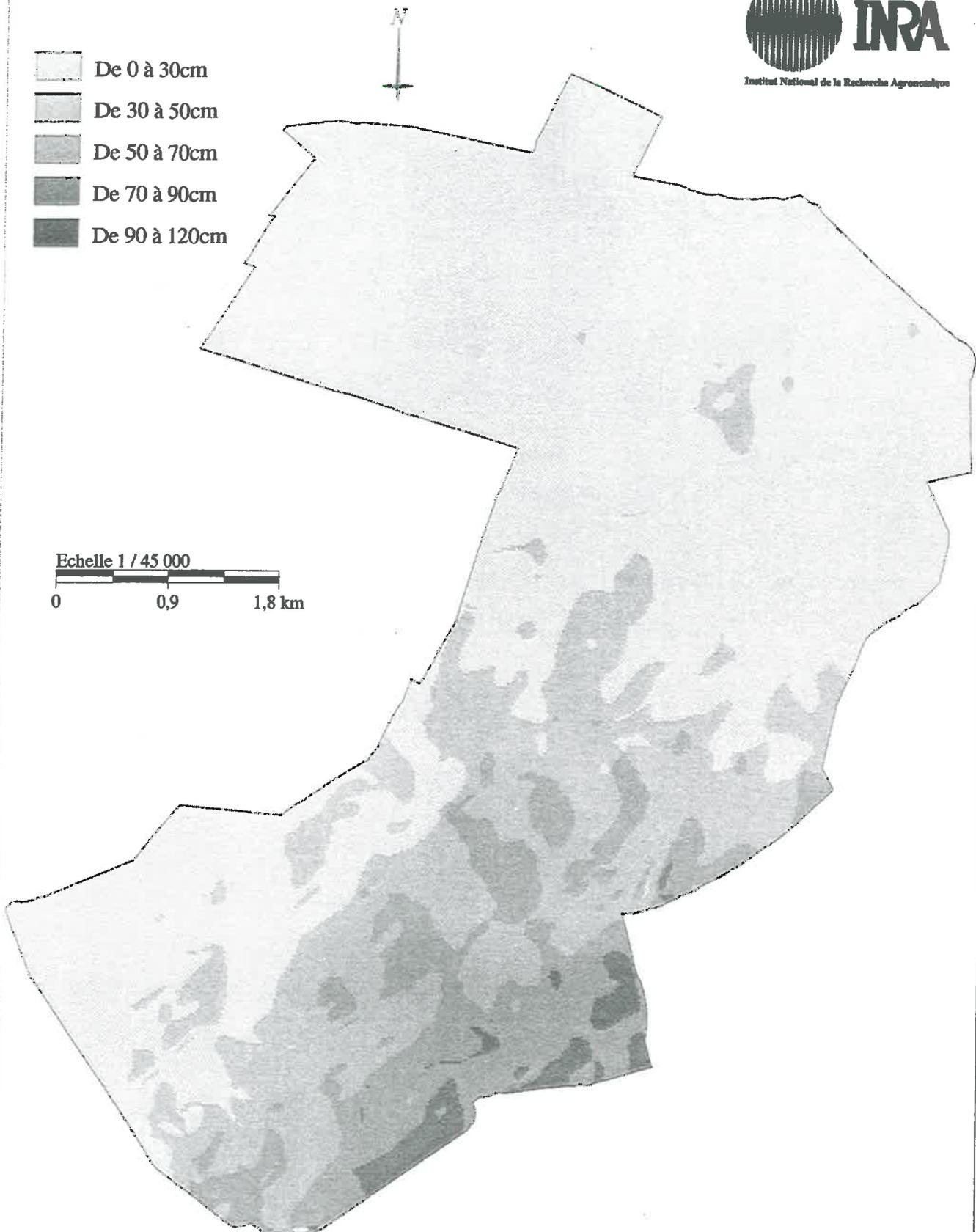


Figure 10.8 : Carte des différences entre les épaisseurs de l'ensemble argilo-limoneux estimées par le modèle de régression et les épaisseurs estimées par la méthode de la dérive externe sur le secteur des 3500 ha.

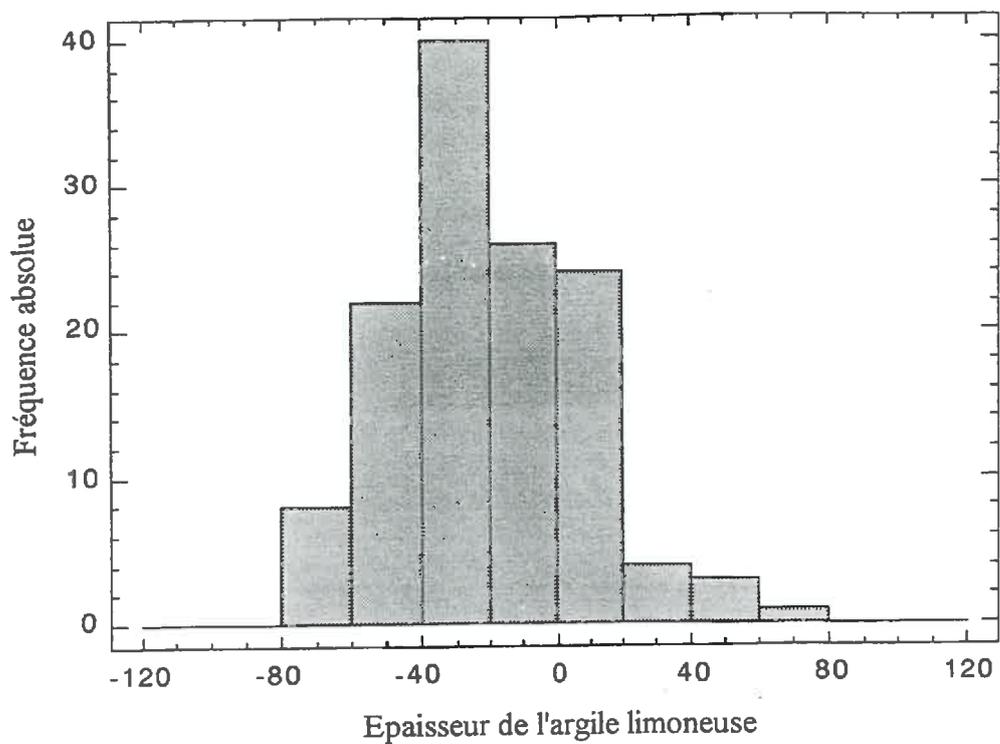


Figure 10.9a : Histogramme des résidus entre les valeurs observées de l'épaisseur de l'argile limoneuse et les valeurs estimées par le modèle de régression linéaire multiple.

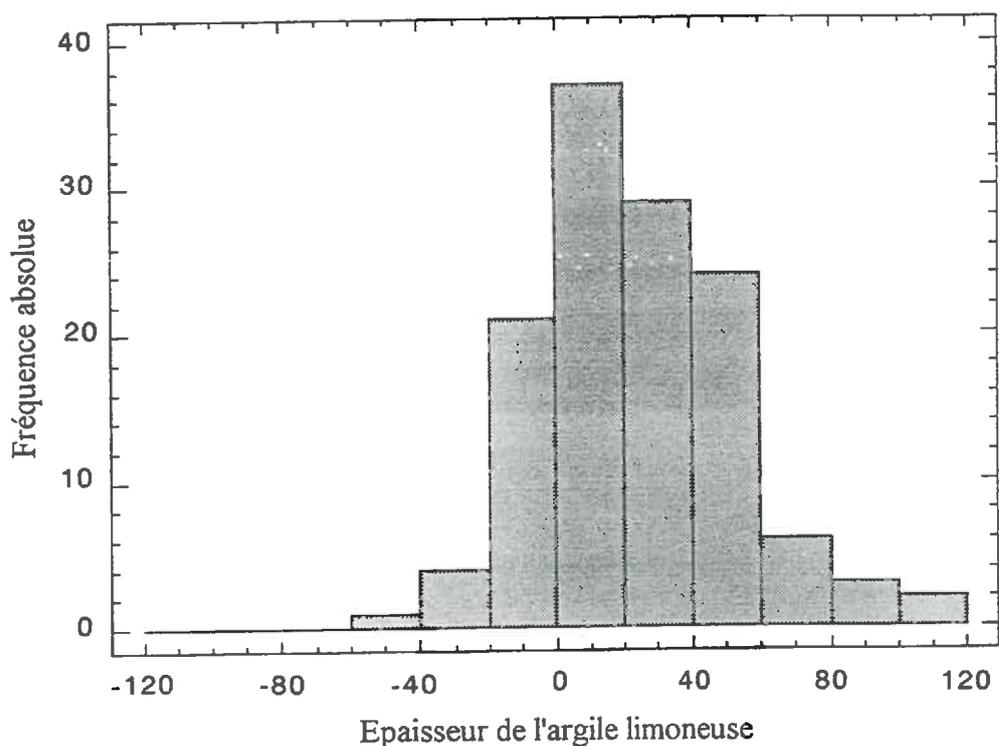


Figure 10.9b : Histogramme des résidus entre les valeurs observées de l'épaisseur de l'argile limoneuse et les valeurs estimées par la méthode de la dérive externe.

L'analyse des résidus entre les valeurs estimées par chacune des deux méthodes par rapport aux valeurs mesurées de l'épaisseur au niveau des 128 points d'observation montre (Fig. 10.9a et 10.9b) que :

- la distribution des résidus résultant du modèle de régression (Fig. 10.9a) est biaisée négativement alors que la distribution résultant de la méthode de la dérive externe (Fig. 10.9b) est biaisée positivement,
- en moyenne le modèle de régression a tendance à surestimer l'épaisseur de l'argile limoneuse (erreur moyenne = -19,4 cm), tandis que la méthode de la dérive externe sous-estime en moyenne l'épaisseur de l'argile limoneuse (erreur moyenne = 23,7 cm),
- les deux méthodes d'estimation donnent des résidus (r) avec une forte amplitude :
 - $-80 \leq r \leq +80$ cm pour le modèle de régression ;
 - $-60 \leq r \leq +118$ cm pour la méthode de la dérive externe.Cela étant, pour la méthode de la dérive externe environ 24 % des résidus sont compris entre [-10, +10] cm (31 individus sur 128), en revanche seulement 22 % des résidus du modèle de régression sont dans cet intervalle.

Ainsi, si nous nous référons à la concentration des résidus autour de zéro c'est-à-dire entre [-10, +10] cm d'erreur, il semble que la méthode de la dérive externe permette une "légèrement" meilleure généralisation spatiale par rapport au modèle de régression. Cela dit, la relation linéaire entre l'intensité de la pente dérivée du MNA_{ign} (la dérive externe) et la variable d'intérêt (épaisseur de l'argile limoneuse) n'est pas très forte ($r = -0,50$). Par conséquent, l'application de la méthode de la dérive externe n'est pas très intéressante en terme de rapport entre la complexité de la méthode et le résultat de l'estimation.

Conclusions du chapitre X

De l'étude réalisée au travers de ce chapitre il ressort clairement que la réalisation d'un Modèle Numérique d'Altitude à partir d'un levé topographique était indispensable pour notre étude. Autrement dit, le MNA réalisé sur le terrain a permis de mettre en évidence et de quantifier la relation constatée lors des différentes prospections cartographiques entre la distribution du sol et les attributs morphologiques du relief.

Cette étude a montré aussi que la prospection cartographique suivant des toposéquences, où des observations sont souvent réalisées lorsque l'on constate des changements dans la couverture pédologique, peut engendrer une variabilité spatiale supérieure à la variabilité "réelle" sur le domaine d'étude.

Enfin, si une cartographie de l'épaisseur de l'argile limoneuse est indispensable à l'échelle d'un paysage (échelle de décision), il est préférable alors de réaliser une généralisation spatiale, dans le cas de notre étude, à partir du modèle de régression tout en soulignant que le résidu peut être localement important, puisque nous ne disposons pas d'un MNA suffisamment précis sur de grandes surfaces.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'objectif de ce travail était tout d'abord de parvenir à la **compréhension et à l'établissement des lois de distribution spatiale des sols et plus particulièrement d'un ensemble majeur dit ensemble argilo-limoneux (AL) en fonction des facteurs pédogénétiques** sur un secteur de Petite Beauce. Par la suite, il s'agissait de **formaliser ces lois de distribution**, autrement dit d'établir un modèle prédictif qui permette d'estimer l'épaisseur de cet ensemble en tout point du domaine d'étude. Enfin, il était question d'**examiner les possibilités de généralisation du modèle** établi de la distribution spatiale de AL sur une surface plus grande (extrapolation) en utilisant des indicateurs aisément disponibles.

Démarche adoptée et principaux résultats

Pour répondre à l'objectif défini ci-dessus, nous avons procédé en trois principales étapes.

Première étape

Recherche des lois de distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux selon les principaux facteurs pédogénétiques

En admettant que le sol est le résultat des interactions sommées au cours du temps des facteurs de la pédogenèse, nous avons privilégié, dans notre étude, l'approche pédogénétique pour parvenir à la compréhension et à la détermination de la loi de distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux. Pour cela, nous avons retenu quatre facteurs pédogénétiques qui sont le matériau parental, le relief, le climat et l'action anthropique.

1. Distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux selon le matériau parental

L'étude de la distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux en fonction du matériau parental a nécessité, dans un premier temps, l'identification et la caractérisation des principaux matériaux et horizons pédologiques. Ainsi, une typologie en cinq ensembles a été établie à partir des descriptions morphologiques et analytiques de 27 fosses pédologiques ouvertes en différentes localités du secteur d'étude. Ces ensembles ont été nommés ainsi :

- ensemble argilo-limoneux (AL) au sein duquel nous avons distingué un sous-ensemble non carbonaté que nous avons noté ALNC,
- ensemble 'matériaux cryoturbés' (MC),
- ensemble 'calcaires pulvérulents' (CP),
- ensemble 'formation argilo-sableuse à sablo-argileuse' (FAS),
- ensemble 'calcaires durs' (K).

La caractérisation morphologique et analytique de ces ensembles a permis de constater que : (i) l'ensemble argilo-limoneux supérieur (AL) est **faiblement différencié** et se caractérise principalement par une **épaisseur variable** ; (ii) les résidus de décarbonatation de AL sont identiques d'un point de vue textural aux résidus de décarbonatation des autres ensembles sous-jacents et particulièrement de l'ensemble MC qui est le plus fréquent sur le secteur d'étude.

A ce stade de notre travail, nous avons formulé l'hypothèse que l'ensemble argilo-limoneux supérieur est le produit de décarbonatation des matériaux sous-jacents. Autrement dit, **l'ensemble argilo-limoneux supérieur est considéré comme autochtone.**

Cette étape d'identification et de caractérisation a permis aussi de déterminer les facteurs discriminant les différents ensembles. Il s'agit de la couleur, de la texture, de la charge en éléments grossiers et de la teneur en carbonate de calcium estimée par l'effervescence à l'HCl. Ces facteurs ont constitué, dans la suite de notre travail, les critères de cartographie sur le secteur d'étude.

L'analyse de la variation de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux (*EPAL*) selon les matériaux qui lui sont sous-jacents a été menée de deux manières :

- (i) une étude ponctuelle à partir des 27 fosses pédologiques, qui a permis de constater que **l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux varie indifféremment du type de matériau sur lequel il repose,**
- (ii) une approche tridimensionnelle grâce une prospection géophysique par résistivité électrique qui a fourni une vision quasi continue de la variation de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux et des matériaux sous-jacents.

Parmi les résultats de la prospection géophysique, nous avons constaté que :

- (1) le matériau calcaire n'est pas homogène aussi bien verticalement qu'horizontalement,
- (2) la stratigraphie est sub-horizontale,
- (3) **les épaisseurs de l'ensemble argilo-limoneux ne dépendent pas des matériaux sous-jacents.** Autrement dit, l'argile limoneuse se rencontre sur tous les types de matériaux avec des épaisseurs variables,
- (4) d'un point de vue méthodologique, la **résistivité électrique** a permis de **cartographier la profondeur d'apparition du toit calcaire en place ou partiellement remanié.** Cependant, elle n'a pas permis de distinguer l'ensemble argilo-limoneux des matériaux cryoturbés et des calcaires pulvérulents.

De l'analyse de la variation de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux (*EPAL*) en fonction des matériaux qui lui sont sous-jacents, il est donc apparu que l'ensemble argilo-limoneux (*AL*) et particulièrement son épaisseur ne sont pas liés au type de matériau immédiatement sous-jacent. Autrement dit, ***AL* ne serait pas strictement autochtone.** Ceci est en contradiction avec l'hypothèse d'autochtonie admise ci-dessus. Il faut donc invoquer des phénomènes de remaniements locaux par cryoturbation et de redistribution qui ont pu affecter cet ensemble. Sous une telle hypothèse, les possibles relations entre le sol et les matériaux sous-jacents sont toujours difficiles à mettre en évidence.

2. Distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux et des matériaux sous-jacents selon les attributs du relief

Cette étude a été précédée de la quantification des attributs morphologiques du relief. Cette modélisation du relief a été réalisée à partir d'un levé topographique sur le terrain. En effet, les cartes topographiques se sont avérées inadaptées pour modéliser un relief peu accentué comme celui du secteur d'étude.

A partir du levé topographique, un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) a été établi sur la base d'une grille au pas de 20 m. Nous disposons ainsi d'une estimation de l'altitude en tout

point de l'espace ainsi que des attributs morphologiques du relief tels que l'intensité de la pente et ses convexités, son orientation et le flux cumulatif. L'établissement de ce MNA a permis de quantifier la faible amplitude des altitudes (15 m maximum) et la faible intensité des pentes (0,5 % en moyenne).

Les matériaux cryoturbés (*MC*) et les calcaires pulvérulents (*CP*) se distribuent dans l'espace géographique indépendamment des attributs du relief. La formation argilo-sableuse (*FAS*), bien qu'elle soit peu fréquente sur le secteur d'étude, semble se localiser dans les zones de plateaux occupant des points hauts dans la zone d'étude.

L'argile limoneuse non carbonatée (*ALNC*) est en relation avec l'orientation de la pente. En effet, elle est plus fréquente sur les versants orientés vers le Nord-Est. L'angle moyen de distribution maximale de l'*ALNC* est de 75° par rapport au Nord. Cette argile limoneuse non carbonatée peut, par endroit, reposer directement sur les matériaux cités ci-dessus. Mais le plus souvent elle est associée à l'ensemble argilo-limoneux.

L'analyse de la variation de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux (*EPAL*) en fonction des attributs du relief a montré que *AL* est plus épais aux endroits de faible intensité de la pente. Ces endroits correspondent souvent aux versants orientés vers le Nord-Est. Ainsi, la variation de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux a été modélisée en fonction des attributs morphologiques 'intensité de la pente' et son orientation. Cette modélisation a permis une cartographie de l'épaisseur de l'argile limoneuse sur une surface de 1600 ha.

3. Prise en compte du facteur pédogénétique "climat" dans la compréhension des lois de distribution de l'ensemble argilo-limoneux

L'analyse des fréquences moyennes du vent actuel sur le secteur d'étude a montré que la direction du vent a un angle moyen de 243° par rapport au Nord. Cette direction moyenne du vent coïncide à quelques degrés près avec l'opposé de l'angle de distribution maximale de l'argile limoneuse non carbonatée.

Cette constatation, à laquelle s'ajoute le fait que l'ensemble argilo-limoneux est plus épais sur les versants Nord-Est caractérisés par de faibles intensités de la pente, renforce l'hypothèse d'une action du vent sur la mise en place d'un matériau initial. Par la suite, sous l'effet de l'action combinée de la décarbonatation et de la redistribution par le vent, l'ensemble argilo-limoneux se serait principalement développé sur les versants se trouvant sous le vent (Nord-Est).

Deuxième étape

Optimisation de l'estimation de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux

Dans la première étape de notre travail, nous avons effectué une cartographie de l'épaisseur de l'argile limoneuse. Cette cartographie a été réalisée à partir d'un modèle de régression utilisant les critères de différenciation mis en évidence dans la deuxième partie de ce travail, soit principalement l'intensité de la pente et son orientation.

Parmi les résultats de cette cartographie, nous avons constaté qu'il demeure une variabilité résiduelle non négligeable. Par conséquent, nous avons consacré un chapitre à la recherche d'une méthode qui permette la meilleure estimation de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux (*EPAL*). Ainsi une dizaine de méthodes regroupées en trois catégories ont été

testées. Ces trois catégories sont : (i) les méthodes non spatiales telles que la régression linéaire ; (ii) les méthodes spatiales basées sur la théorie des variables régionalisées ; (iii) les méthodes couplées combinant les méthodes non spatiales et les méthodes spatiales.

Les résultats de ces estimations (cartes de *EPAL*), validés à partir d'un échantillon indépendant d'observations de *EPAL*, montrent que la méthode de la dérive externe (KUDEX) fournit la meilleure estimation. **Cette méthode spatiale multivariable intègre au sein de son algorithme de calcul l'information exhaustive sur l'intensité de la pente en relation linéaire avec *EPAL*.**

La méthode de la dérive externe, qui est un cas particulier du krigeage universel (géostatistique non stationnaire), permet d'utiliser une information connue de façon exhaustive sur une variable pour estimer une deuxième variable peu échantillonnée. Cette méthode nécessite l'existence d'une relation linéaire entre les deux variables étudiées. De plus, il est nécessaire que la variable exhaustive soit connue aux points d'observations de la variable peu échantillonnée et aux noeuds de la grille d'estimation.

Cette méthode ressemble à la démarche cartographique dite conventionnelle. En effet, toutes les deux tendent à mettre à profit des relations déterministes entre des paramètres environnementaux pour minimiser le coût de la cartographie d'une variable difficile d'accès. Cependant, la méthode de la dérive externe présente l'avantage de quantifier ces relations et de reposer sur un support théorique.

Il est clair que cette méthode présente des similitudes avec le cokrigeage dans le sens où ces deux méthodes servent entre autre à estimer une variable peu échantillonnée sur la base d'autres variables plus échantillonnées. Cependant, la méthode de la dérive externe est plus souple car elle ne nécessite pas une modélisation de la corégionalisation entre les variables étudiées.

Enfin, il faut signaler que la méthode de la dérive externe présente "pour l'instant" l'inconvénient de ne pas tenir compte des possibles incertitudes sur la variable exhaustive utilisée. Ainsi, la carte des erreurs associées à la carte estimée par la méthode de la dérive externe doit être prise avec précaution.

Troisième étape

Tests de sensibilité du modèle établi de répartition de l'ensemble argilo-limoneux

Le modèle de répartition de l'ensemble argilo-limoneux a été établi principalement sur la base d'observations ponctuelles de *EPAL* et de l'intensité de la pente estimée à partir d'un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) réalisé à partir d'un levé topographique.

Dans le dernier chapitre de ce travail, nous avons réalisé différents tests de sensibilité du modèle établi. Ces tests étaient relatifs à :

- la densité d'échantillonnage de la variable d'intérêt (épaisseur de l'argile limoneuse)
- la précision du MNA et de ses attributs dérivés,
- la taille du domaine d'étude,

Seules deux méthodes d'estimation ont été retenues : (1) la méthode de la dérive externe (KUDEX) ; (2) la régression linéaire multiple avec deux variables explicatives (RLM2).

Pour ce qui est de l'effet de la densité d'observation de la variable d'intérêt, les résultats ont montré que, quelle que soit la taille de l'échantillon de la variable *EPAL*, la méthode de la dérive externe réalise de meilleures estimations en moyenne par rapport à la régression linéaire multiple.

L'effet de la précision du MNA et de ses attributs dérivés a été examiné par la prise en compte d'un autre MNA du secteur d'étude estimé à partir des cartes topographiques.

Les résultats montrent que : (1) la réalisation d'un MNA précis à partir d'un levé topographique était indispensable pour mener une étude approfondie des relations sol - morphologie du relief dans un paysage aussi doux que celui de la zone d'étude ; (2) la densification de l'observation de la variable d'intérêt (épaisseur de l'argile limoneuse) ne suffit pas à compenser l'imprécision d'un MNA tel que celui établi sur le secteur d'étude à partir des courbes de niveaux des cartes topographiques.

Le test de sensibilité du modèle à la taille du domaine d'étude a principalement révélé un effet lié au mode d'échantillonnage. En effet, lors d'une prospection cartographique selon des toposéquences, des observations sont réalisées dès qu'un changement est constaté au sein de la couverture pédologique ou dans le paysage. Cela engendre alors un accroissement de la variabilité étudiée par rapport à la variabilité intrinsèque du caractère estimé selon un échantillonnage aléatoire.

Essai de généralisation spatiale à partir des données disponibles

Cette étape de généralisation spatiale à l'échelle du secteur de Villamblain (surface de 3500 ha) est très importante car elle représente l'objectif finalisé à l'échelle régionale.

Sur cette surface, la cartographie de *EPAL* a été effectuée principalement à partir du MNA estimé à partir de la carte topographique et de ses attributs dérivés. Cette cartographie a été réalisée par un modèle de régression et par la méthode de la dérive externe.

Les résultats de la validation montrent que les deux approches de cartographie se valent. Cependant, en se référant aux sorties cartographiques, à la connaissance du terrain et à la souplesse de l'approche, le modèle de régression semble plus approprié sur le secteur de Villamblain.

Le modèle de répartition spatiale des sols peut être généralisé à des surfaces encore plus grandes sur la base des MNA et d'images satellitaires. En effet, dans d'autres travaux sur le secteur d'étude (Bourennane *et al.*, 1994 ; King *et al.*, 1996), ont montré que le croisement de l'information sur la réflectance des sols nus et l'orientation de la pente issue des MNA permet particulièrement la cartographie des sols calcaires sur de plus grandes étendues.

**

La démarche que nous avons adoptée pour répondre aux objectifs de ce travail est basée principalement sur une approche pédogénétique. Elle se situe donc dans la filiation des travaux

de cartographie conventionnelle. Cependant, notre approche se distingue de cette dernière par au moins deux aspects :

1. la quantification des attributs du relief et par conséquent la quantification des relations entre le sol et la morphologie du terrain,
2. l'utilisation d'une méthode de la géostatistique non stationnaire, en l'occurrence la méthode de la dérive externe.

Bien que cette méthode de la dérive externe soit connue et utilisée dans la recherche pétrolière et minière, elle est novatrice en science du sol. Cette méthode est sans doute appelée à se développer du fait de la multiplication de données exhaustives obtenues par les satellites ou plus généralement par les méthodes géophysiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Aandahl, A.R. 1948. The characterization of slope positions and their influence on the total nitrogen content of a few virgin soils of western Iowa. *Soil Science Society of America Proceedings*, 13, 449-454.
- Adams, J.A., Campbell, A.S. & Culler, E.J.B. 1975. Some properties of a chronotoposequence of soils from granite in New Zealand. 1. Profile weights, and general composition. *Geoderma*, 13, 23-40.
- Adams, J.A. & Raza, M.A. 1978. The significance of truncation in the evolution of slope soil in mid-Wales. *Journal of Soil Science*, 29, 243-257.
- Ahmed, S. & De Marsily, G. 1987. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. *Water Resources Research*, 23, 1717-1737.
- Anderson, M.G. & Burt, T.P. 1978. The role of topography in controlling throughflow generation. *Earth Conference Proceedings*, 3, 331-334.
- Arrouays, D. 1995. *Analyse et modélisation spatiales de l'évolution des stocks de carbone organique des sols à l'échelle d'un paysage pédologique. Application à l'étude des sols de 'touyas' du piedmont pyrénéen*. Thèse de Doctorat, ENSA Montpellier.
- Arrouays, D., Duval, O & Renaux, B. 1989. *Esquisse des paysages pédologiques du Loiret*. Notice explicative de la carte pédologique du Loiret à 1/250.000, SESCOF-INRA, Orléans.
- Astle, W.L., Webster, R. & Lawrance, C.J. 1969. Land classification for management planning in the Luangwa valley of Zambia. *Journal of Applied Ecology*, 6, 143-169.
- Baize, D. 1980. Granulométrie et homogénéité des profils. Application aux Planosols de Champagne humide. *Sciences du Sol*, 2, 83-112.
- Baize, D. 1986. Couvertures pédologiques, cartographie et taxonomie. *Science du Sol*, 3, 227-243.
- Baize, D. 1988. Les formations calcaires redistribuées du Jovinien et les sols qui en sont issus. *Sciences du Sol*, 2, 113-136.
- Baize, D. & Girard, M.C. 1990. Brunisols et sols Calcimagnésiens. In : *Référentiel Pédologique Français*, A.F.E.S. 83-91.
- Bascomb, C.L. & Jarvis, M.G. 1976. Variability in three areas of the Denchworth soil map unit I : Purity of the map unit and property variability within it. *Journal of Soil Science*, 27, 420-437.
- Batschelet, E. 1981. *Circular Statistics in Biology*. Academic Press, London.
- Beckett, P.H.T. 1968. Soil formation and slope development. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 12, 1 - 24.
- Beckett, P.H.T. & Webster, R. 1971. Soil variability. A review. *Soil Fertilizers*, 34, 1-15.
- Beckett, P.H.T & Bie, S.W. 1975. Reconnaissance for soil survey. I. Pre-survey estimates of the density of soil boundaries necessary to produce pure mapping units. *Journal of Soil Science*, 26, 144-154.
- Bell, J.C., Cunningham, R.L. & Havens, M.W. 1992. Calibration and validation of a soil - landscape model for predicting soil drainage class. *Soil Science Society of American Journal*, 56, 1860-1866.
- Bell, J.C., Thompson, J.A., Butler, C.A. & Mc Sweeny K. 1994. Modeling soil genesis from a landscape perspective. *15th International Congress of Soil Science*, Acapulco 10-16/07/1994. Volume 6a, 179-195.

- Bocquier, G. 1973.** *Genèse et évolution de deux toposéquences de sols du Tchad. Interprétation biogéodynamique.* Mémoire ORSTOM, 62.
- Bocquier, G. 1984.** L'évolution des démarches en pédologie, de l'héritage de B.B. Dokouchaev à la diversité des démarches actuelles en pédologie. *Science du Sol*, 2, 113-121.
- Boulaine, J. 1980.** *Pédologie appliquée.* Collection Sciences Agronomiques, Paris.
- Boulaine, J. 1984.** Les unités cartographiques complexes en pédologie. *Compte Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 70, 542-550.
- Boulet, R., Chauvel, A., Humbel, F.X. & Lucas, Y. 1982a.** Analyse structurale et cartographie en pédologie. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 4, 309-321.
- Boulet, R., Humbel, F.X. & Lucas, Y. 1982b.** Analyse structurale et cartographie en pédologie. II. Une méthode d'analyse prenant en compte l'organisation tridimensionnelles des couvertures pédologiques. *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 4, 341-351.
- Bourennane, H. 1992.** *Analyse et modélisation de la distribution spatiale d'un volume pédologique d'après des critères morphologiques. Application au limon-argileux sur un secteur de Petite Beauce.* D.E.A. de Géosciences Filière Pédologie, Université de Nancy I.
- Bourennane, H., Aubron, I., Isambert, M., Girard, M.C. & King, D. 1994.** Apport de la télédétection dans l'analyse de la distribution spatiale des sols calcaires en Petite Beauce. *4èmes Journées Nationales de l'Etude des Sols*, Lille 17-21/04/93.
- Bourennane, H., King, D., Chéry, P. & Bruand, A. 1996.** Improving the kriging of a soil variable using slope gradient as external drift. *European Journal of Soil Science*, 47, 473-483.
- Bregt, A.K., Bouma, J. & Jellinek, M. 1987.** Comparison of thematic maps derived from a soil map and from kriging of point data. *Geoderma*, 39, 281-291.
- Bregt, A.K. 1988.** *Quality of representative profile descriptions for predicting the land quality moisture deficit at different scales.* In Land Qualities in Space and Time. Bouma et Bregt (Eds), Pudoc Wageningen, 169-172.
- Burgess, T.M. & Webster, R. 1980a.** Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science*, 31, 315-331.
- Burgess, T.M. & Webster, R. 1980b.** Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II. Block kriging. *Journal of Soil Science*, 31, 333-341.
- Burgess, T.M. & Webster, R. 1984.** Optimal sampling strategies for mapping soil types. II. Risks functions and sampling intervals. *Journal of Soil Science*, 32, 643-659.
- Burrough, P.A. 1986.** *Principles of Geographical Information Systems for land resources.* Clarendon press Oxford.
- Burrough, P. 1989.** Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Journal of Soil Science*, 40, 447-493.
- Burrough, P. 1992.** Development of intelligent geographical information systems. *International Journal of Geographical Information System*, 6, 1-11.
- Burrough, P., Mc Millan, R.A. & Van Dersen, W. 1992.** Fuzzy classification methods for determining land suitability from soil profile observations and topography. *Journal of Soil Science*, 43, 193-210.
- Burt, T.P. & Butcher, D. 1985.** Topographic control of soil moisture distributions. *Journal of Soil Science*, 36, 469-486.

- Chauvet, P. & Galli, A. 1982.** *Universal Kriging*. Publication C-96, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau.
- Chéry, P. 1995.** *Variabilité de l'épaisseur de la couverture de sol. Conséquences pour le bilan hydrique hivernal d'un secteur de Petite Beauce*. Thèse de l'Université de Nancy I.
- Chilès, J.P. 1991.** Application du krigeage avec dérive externe à l'implantation d'un réseau de mesures piézométriques. *Sciences de la Terre, Série Informatique*, **30**, 131-147.
- Cochran, W.G. 1977.** *Sampling technics*. John Wiley & Sons, New York.
- Conacher, A.J. & Dalrymple, J.B. 1977.** The nine unit landsurface model. An approach to pedogeomorphic research. *Geoderma*, **18**, 1-154.
- Cooper, A.W. 1960.** An example of the role of microclimate in soil genesis. *Soil Science*, **90**, 109-120.
- C.O.R.P.E.N. : Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates. 1985.** *Les nitrates dans l'eau : un défi relevé*. Ministères de l'Agriculture et de l'Environnement.
- C.P.C.S. 1967.** *Classification des sols. Commission de pédologie et de cartographie des sols*. Document INRA-Grignon.
- Cressie, N. 1991.** *Statistics for Spatial Data*. John Wiley & Sons, New York.
- Creutin, J.D. & Obled, C. 1982.** Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison. *Water Resources Research*, **18**, 413-431.
- Dabas, M., Hesse, A., Jolivet, A. & Tabbagh, A. 1989.** Intérêt de la cartographie de la résistivité électrique pour la connaissance du sol à grande échelle. *Science du Sol*, **27**, 65-68.
- Dagnelie, P. 1970.** *Théorie et méthodes statistiques*. Volume 2, Editions J. Duculot, S.A Gembloux.
- Dalsgaard, K., Basstrup, E. & Bunting, B.T. 1981.** The influence of topography on the development of Alfisols on calcareous clay till in Denmark. *Catena*, **8**, 111-136.
- Daniels, W.L., Everett, C.J. & Zelazny, L.W. 1987.** Virgin hardwood forest soils of the southern Appalachian mountains. I. Soil morphology and geomorphology. *Soil Science Society of American Journal*, **51**, 722-729.
- Daroussin, J., Bourennane, H., King, D., Isambert, M. & Duval, O. 1992.** Deriving spatial occurrence of a pedological horizon from morphometrical parameters. *European ArclInfo User Conference*, 5-7/10/1992, Madrid.
- Davidson, D.A. 1977.** The subdivision of slope profile on the basis of soil properties. A case study from mid-Wales. *Earth Surface Process*, **2**, 55-61.
- Davis, F.L. 1936.** A study of the uniformity of soil types and of the fundamental differences between the different soil series. *Alaska Agri. Exp. Stn. Bull.*, **244**, 1-153.
- Delhomme, J.P. 1978.** Kriging in the hydrosiences. *Advances in Water Resources*, **1**, 251-266.
- Desprez, N. & Mégnien, C. 1965.** Connaissances nouvelles sur la structure de la Beauce. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7-VII, 303-308.
- Dokuchaev, V.V. 1948.** *Russian Chernozem*. Selected Works of V.V. Dokuchaev, Volume I. Moskva, 1948. Translated from Russian by Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1967.
- Dress, L.R. & Wilding, L.P. 1973.** Elemental variability within a sampling unit. *Soil Science Society of America Proceedings*, **37**, 82-87.
- Duval, O. & Isambert, M. 1992.** *Etude pédologique du secteur de Villamblain (Beauce)*. Rapport interne, SESCOF, INRA, Orléans.

- Evans, I.S. 1980. An integrated of terrain analysis and slope mapping. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 36, 274-295.
- Fanning, D.S. & Fanning, M.C.B. 1989. *Soil, Genesis, and Classification*. Wiley, New York
- Favrot, J.C. 1989. Une stratégie d'inventaire cartographie à grande échelle : La méthode des secteur de référence. *Science du Sol*, 4, 351-368.
- Finney, H.R., Holowaychuk, N. & Heddleson, M.R. 1962. The influence of microclimate on the morphology of certain soils of the Allegheny plateau of Ohio. *Soil Science Society of America Proceedings*, 26, 287-292.
- Franzmeier, D.P., Pederson, E.J., Longwell, T.L., Byrne, J.G. & Losche, C.J., 1969. Properties of some soils in the Cumberland plateau as related to slope, aspect, and position. *Soil Science Society of America Proceedings*, 33, 755-761.
- Fridland, V.M. 1976. Levels of organisation of the soil mantle and regularities of soil geography. Presented at the 23 rd International Geographical Conference. Moscow (section 4) *Biogeography and Soil Geography*.
- Furley, P.A. 1968. Soil formation and slope development. 2. The relationship between soil formation and gradient angle in the Oxford area. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 12, 25-42.
- Furley, P.A. 1971. Relationships between slope form and soil properties developed over chalk parent materials. In D.Brunsdon (Editor). Slopes, Form & Process. I.B.G., Spec. Publ., 3, 141-163.
- Galli, A. & Meunier, G. 1987. Study of a gas reservoir using the external drift method. *Geostatistical Case Studies*. In: (eds G. Matheron, and M. Armstrong), Reidel, Dordrecht, pp 105-119.
- Gascuel, O.C. 1984. *Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol*. Thèse de Docteur Ingénieur, ENSM Fontainebleau et ENSA-INRA Rennes.
- Gascuel, O.C., Walter, C. & Voltz, M. 1993. Intérêt du couplage des méthodes géostatistiques et de cartographie des sols pour la prédiction spatiale. *Science du Sol*, 4, 193-213.
- Gigout, M. 1973. L'altération périglaciaire du calcaire de Beauce. In : Le calcaire de Beauce, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussée. Spécial U*, 78p.
- Girard, M.C. 1983. *Recherche d'une modélisation en vue d'une représentation spatiale de la couverture pédologique. Application à une région des plateaux jurassiques de Bourgogne*. Thèse de Docteur-ès-Sciences.
- Girard, M.C. & King, D. 1988. Un algorithme interactif pour la classification des horizons de la couverture pédologique. *Science du Sol*, 2, 81-103.
- Girard, M.C., Aurousseau, P., King, D. & Legros, J.P. 1989. Apport de l'informatique à l'analyse spatiale de la couverture pédologique et à l'exploitation des cartes. *Science du Sol*, 27, 335-350.
- Greenlee, D.D. 1987. Raster and vector processing for scanned line work. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 10, 1383-1387.
- Harradine, F.F. 1949. The variability of soil properties in relation to stage of profile development. *Soil Science Society of America Proceedings*, 14, 302-311.
- Heuvelink, G.B.M. 1993. *Error Propagation in Quantitative Spatial Modelling. Applications in Geographical Information Systems*. Utrecht, Nederlandse Geografische Studies 163.
- Horemans, M. 1984. *Notice explicative de la carte pédologique de France au 1/250.000. Feuille numéro 31*. Document SESCOF-INRA.

- Hubert, J. 1983. *Climatologie du Loiret*. Commission météorologique départementale du Loiret.
- Hudson, G. & Wackernagel, H. 1994. Mapping temperature using kriging with external drift: theory and an example from Scotland. *International Journal of Climatology*, **14**, 77-91.
- Hugget, R.J. 1975. Soil landscape systems. A model of soil genesis. *Geoderma*, **13**, 1-22.
- Hugget, R.J. 1976. Lateral translocation of soil plasm through a small valley basin in the Northaw Great Wood, Hertfordshire. *Earth Surface Processes*, **1**, 99-109.
- Hutchinson, M.F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, **103**, 211-232.
- Isambert, M. 1984. *Notice explicative de la carte pédologique de France au 1/100.000. Feuille de Châteaudun*. Document SESCOF-INRA.
- Isambert, M., Bourennane, H., Couturier, A., King, D. & Jamagne, M. 1996. Analyse de la distribution des sols en fonction de l'orientation de la pente. Application à un secteur du Vexin français. *Géologie de la France* (soumis).
- Jamagne, M. 1979. La cartographie des sols. In : 'Pédologie' T2, (Eds. B. Souchier and M. Bonneau). *Chapitre XXVII*. Masson, Paris, 419-439.
- Jamagne, M., King, D., Le Bas, C., Daroussin, J., Burrill, A. & Vossen, P. 1994. Creation and use of a European Soil Geographic Database. *15th International Congress of Soil Science*, Acapulco 10-16/07/1994. Volume 6a, 728-742.
- Jenny, H. 1941. *Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology*. McGraw Hill, New York.
- Jenny, H. 1980. *The Soil Resource. Origin and Behavior*. Springer-Verlag, New York.
- Jenson, S.K. & Domingue, J.O. 1988. Extrating topographic structure from Digital Elevation Data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **11**, 1593-1600.
- Johnson, R.A. & Wehrly, T.E. 1977. Measures and models for angular correlation and angular-linear correlation. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, **39**, 222-229.
- Jordana, M. 1992. *Introduction à l'étude des transferts des nitrates dans la zone non saturée de l'aquifère des calcaires de Beauce : site expérimental de Villamblain*. Mémoire de D.E.A. Université de Paris VI, Laboratoire de Géologie Appliquée.
- Journel, A.G. & Huijbregts, C. J. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press, London.
- King, D. 1984. Analyse de quelques concepts en cartographie des sols basée sur une automatisation des cartes thématiques dérivées. *Agronomie*, **4**, 461-472.
- King, D., Duval, O. Girard, M.C. 1992. Comparison between the expert's approach and statistical methods in searching for reference soil horizons. *Biométrie - Praximétrie*, **32**, 39-59.
- King, D., Daroussin, J. & Jamagne, M. 1994. Proposal for a Spatial Organisation Model in Soil Science. *Journal of the American Society for Information Science*, **9**, 705-717.
- King, D., Bourennane, H., Isambert, M. & Renaux, B. 1996. Apport d'une simulation SPOT5 à la cartographie des sols calcaires en Petite Beauce. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, **141**, 110-114.
- Kirkby, M.J. 1977. Soil development models as a component of slope models. *Earth Surface Processes*, **2**, 203-230.
- Krige, D.G. 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, **52**, 119-139.

- Lagacherie, P. 1992.** *Formalisation des lois de distribution des sols pour automatiser la cartographie pédologique à partir d'un secteur de référence. Cas de la petite région naturelle, Moyenne vallée de l'Hérault.* Thèse de doctorat, ENSA-Montpellier.
- Laslett, G.M., McBratney A.B., Pahl, P.J. & Hutchinson, M.F. 1987.** Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *Journal of Soil Science*, **38**, 325-341.
- Le Parco, R. 1995.** *Utilisation d'une méthode géophysique pour la cartographie des sols. Apports et limites de la méthode électrique pour l'estimation de l'épaisseur de la couverture limoneuse en Petite Beauce.* Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Géophysique - Géotechniques, Université de Paris VI, Institut des Sciences et Technologies.
- Leenaers, H., Okx, J.P. & Burrough, P.A. 1990.** Employing elevation data for efficient mapping of soil pollution on floodplains. *Soil Use and Management*, **6**, 105-114.
- Leenhardt, D., Voltz, M., Bornand, M. & Webster, R. 1994.** Evaluating soil map for predicting of soil water properties. *European Journal of Soil Science*, **45**, 293-302.
- Legros, J.P. 1978a.** Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. 1. Précision dans la délimitation des sols. *Annale Agronomique*, **6**, 499-519.
- Legros, J.P. 1978b.** Recherche et contrôle numérique de la précision en cartographie pédologique. 2. Précision dans la caractérisation des unités. *Annale Agronomique*, **6**, 583-601.
- Lesch, S.M, Strauss, D.J. & Rhoades, J.D. 1995.** Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques. 1. Statistical prediction models: A comparison of multiple linear regression and cokriging. *Water Resources Research*, **31**, 373-386.
- Lorain, J.M. 1973.** La géologie du calcaire de Beauce. In : Le calcaire de Beauce, *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussée. Spécial U*, 78p.
- Losche, C.J., Mc Cracken, R.J. & Duvey, C.B. 1970.** Soils of steeply sloping landscapes in the southern Appalachian mountains. *Soil Science Society of America Proceedings*, **34**, 473-478.
- Macaire, J.M. 1971.** *Etude sédimentologique des formations superficielles sur le tracé de l'autoroute A10 entre Artenay et Meung / Loire.* Thèse 3ème cycle Université d'Orléans.
- Macaire, J.M. 1972a.** Sur le limon de la Beauce au Nord-Ouest d'Orléans (Loiret). *Compte Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **274**, 1892-1895.
- Macaire, J.M. 1972b.** Le limon des plateaux dans le Loiret sur le tracé de l'autoroute A10. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **61**, 37-41.
- Macyk, T.M., Pawluk, S. & Lindsay, J.D. 1978.** Relief and microclimate as related to soil properties. *Canadian Journal of Soil Science*, **58**, 421-438.
- Mardia, K.V. 1972.** *Statistics of Directional Data.* Academic Press, London.
- Marsman, B.A. & De Gruijter, J.J. 1986.** *Quality of soil maps. A comparison of soil survey methods in a study area.* Soil Survey Papers **15**, Stiboka, Wageningen.
- Matheron, G. 1965.** *La théorie des variables régionalisées et ses applications.* Masson, Paris.
- Matheron, G. 1973.** The intrinsic random functions and their applications. *Advances in Applied Probability*, **5**, 439-468.
- Mausbach, M.J., Brasher, B.R., Yeck, R.D. & Nettleton, W.D. 1980.** Variability of measured properties in morphologically matched pedons. *Soil Science Society of American Journal*, **44**, 358-363.

- Mc Bratney, A.B., Webster, R., Mc Laren, R.G. & Spiers, R.B. 1982. Regional variation of extractible copper and cobalt in the topsoil of South-East Scotland. *Agronomie*, **2**, 969-982.
- Mc Bratney, A.B. & Webster, R. 1983. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. V. Coregionalization and multiple sampling strategy. *Journal of Soil Science*, **34**, 137-162.
- Mc Bratney, A.B. & De Gruijter, J.J. 1992. A continuum approach to soil classification by modified fuzzy k-means with extragrades. *Journal of Soil Science*, **43**, 159-175.
- Mc Bratney, A.B., De Gruijter, J.J. & Brus, D.J. 1992. Spatial prediction and mapping of continuous soil classes. *Geoderma*, **54**, 39-64.
- Mégnién, C. & Desprez, N. 1973. Hydrogéologie de la Beauce. *Bulletin B.R.G.M.* (2) III, 3, 192-211.
- Mégnién, C. 1976. *Hydrogéologie du Centre du Bassin de Paris, contribution à l'étude de quelque aquifères principaux*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paris VI.
- Mégnién, C. 1980. *Synthèse géologique du Bassin de Paris. Volume I : Stratigraphie et paléogéographie*. Mémoire du B.R.G.M. n° 101.
- Ménillet, F. 1980. Les lithofaciès des calcaires de Beauce (Stampien à Aquitanien) du Bassin de Paris (France). *Bulletin B.R.G.M. section IV*, 1, 15-25.
- Moore, I.D., Grayson, R.B. & Ladson, A.R. 1991. Digital terrain modelling : A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological processes*, **5**, 3-30.
- Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A. & Peterson, G.A. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of American Journal*, **57**, 443-452.
- Munsell Color Company, INC. 1954. *Manuel Color Chart*. Baltimore.
- Nicoullaud, B., Darthout, R. & Duval, O. 1995. Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs dans les sols argilo-limoneux de Petite Beauce. *Etude et Gestion des Sols*, **2**, 183-200.
- Nortcliff, S. 1978. Soil variability and reconnaissance soil mapping. A statistical study in Norfolk. *Journal of Soil Science*, **29**, 403-418.
- Odeh, I.O.A., Chittleborough, D.J. & Mc Bratney, A.B. 1991. Elucidation of soil-landform interrelationships by canonical ordination analysis. *Geoderma*, **49**, 1-32.
- Odeh, I.O.A., Mc Bratney, A.B. & Chittleborough, D.J. 1992a. Fuzzy-c-means and kriging for mapping soil as a continuous system. *Soil Science Society of American Journal*, **56**, 1848-1854.
- Odeh, I.O.A., Mc Bratney, A.B. & De Gruijter, J.J. 1992b. A comparison of kriging methods for mapping of continuous soil classes. *Proceedings of Pedometrics-92. Developments in Spatial Statistics for Soil Science*, 1-3 September 1992, Wageningen, 77-92.
- Odeh, I.O.A., Mc Bratney, A.B. & Chittleborough, D.J. 1994. Spatial prediction of soil properties from landform attributes derived from a digital elevation model. *Geoderma*, **63**, 197-214.
- Oliver, M.A. 1984. *Soil variation in the Wyre Forest. Its elucidation and measurement*. P.H.D. Thesis University of Birmingham.
- O'Loughlin, E.M. 1981. Saturation regions in catchments and their relationships to soil and topography properties. *Journal of Hydrology*, **53**, 229-246.
- Ould-Mohamed, S. 1991. *Prise en compte de l'organisation du sol dans l'étude des transferts d'eau et de solutés*. D.E.A. de Pédologie, Université de Nancy I.

- Ould-Mohamed, S. 1995. *Etude du fonctionnement hydrique hivernal d'un sol limono-argileux de Petite Beauce. Application d'un modèle d'infiltration et incidence sur la lixiviation du nitrate*. Thèse de l'Université d'Orléans.
- Pédro, G. 1989. L'approche spatiale en pédologie. Fondement de la connaissance des sols dans le milieu naturel. Réflexions liminaires. *Science du Sol*, 4, 287-300.
- Renard, D. & Nai-Hsien, M. 1988. Utilisation de dérives externes multiples. *Sciences de la Terre. Série Informatique*, 28, 281-301.
- Righi, D., Laville-Timsit, L., Jamagne, M. & Bourennane, H. 1993. Tentative linkage of geochemical spatialized data with distribution of soils within a granitic area (Massif Central, France). *Pedologie*, XLIII-3, 373-387.
- Robinson, G.W. & Lloyd, E.W. 1915. On the probable error of sampling in soil surveys. *Journal of Agricultural Science*, 7, 144-153.
- Rogowski, A.S. 1996. Quantifying soil variability in GIS applications: II Spatial distribution of soil properties. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10, 455-475.
- Ruellan, A., Dosso, M. & Fritsch, E. 1989. L'analyse structurale de la couverture pédologique. *Science du Sol*, 4, 319-334.
- Ruhe, R.V. & Walker, P.H. 1968. Hillslope models and soil formation. I. Open Systems. *9th International Congress of Soil Science*, Adelaide, 4, 551-560.
- Shumskii, P.A. 1964. *Principles of structural glaciology*. Traduction Krauss, Dover Publication Company.
- Smeck, N.E. & Wilding, L.P. 1980. Quantitative evaluation of pedon formation in calcareous glacial deposits in Ohio. *Geoderma*, 24, 1-16.
- Soil Survey Manual. 1951. *US Department of Agriculture*, Washington, 18, 503p.
- Speight, J.G. 1974. A parametric approach to landform regions. *Special Publication Institute of British Geographers*, 7, 213-230.
- Speight, J.G. 1980. The role of topography in controlling throughflow generation : a discussion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 5, 187-191.
- Stein, A., Hoogerwerf, M. & Bouma, J. 1988. Use of soil map delineations to improve cokriging of point data on moisture deficits. *Geoderma*, 43, 163-177.
- Tabbagh, J. 1988. Traitement des données et élimination des valeurs erronées en prospection électrique en continu. *Revue d'Archéométrie*, 12, 1-9.
- Tarboton, D.G., Bras, R.L. & Rodriguez-Iturbe, I. 1991. On the extraction of channel networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*, 5, 81-100.
- Troeh, F.R. 1964. Landform parameters correlated to soil drainage. *Soil Science Society of America Proceedings*, 28, 808-812.
- Van Kuilenburg, J., De Gruijter, J.J., Marsman, B.A. & Bouma, J. 1982. Accuracy of interpolation between point data on soil moisture capacity, compared with estimates from mapping units. *Geoderma*, 27, 311-325.
- Van Meirvenne, M. & Hofman, G. 1989. Spatial variability of soil texture in a polder area. II. Cokriging. *Pedologie*, XXXIX-2, 209-226.
- Van Meirvenne, M., Scheldeman, K., Baert, G. & Hofman, G. 1992. Quantification of soil textural fractions of the Bas-Zaire using soil map polygons and/or point observations. *Proceedings of Pedometrics-92. Developments in Spatial Statistics for Soil Science*, 1-3 September 1992, Wageningen, 222-238.
- Van Vliet Lanoë, B. 1984. Structures caused by repeated freezing and thawing in various loamy sediments. A comparison of active fossil and experimental data. *Earth Surface Process and Landform*, 9, 77-83.

- Van Vliet Lanoë, B. 1987. Dynamique périglaciaire actuelle et passée. Apport de l'étude micromorphologique et de l'expérimentation. *Bulletin AFEQ*, 1, 113-132.
- Vauclin, M., Vieira, S.R., Vachaud, G. & Nielsen, D.R. 1983. The use of cokriging with limited field soil observations. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 175-184.
- Voltz, M. 1986. *Variabilité spatiale des propriétés physiques en milieu alluvial. Essai de cartographie quantitative des paramètres hydrométriques*. Thèse de Docteur Ingénieur, ENSA Montpellier.
- Voltz, M. & Webster, R. 1990. A comparison of kriging, cubic splines and classification for predicting soil properties from sample information. *Journal of Soil Science*, 41, 473-490.
- Voltz, M. & Goulard, M. 1994. Spatial interpolation of soil moisture retention curves. *Geoderma*, 62, 109-123.
- Wackernagel, H. 1995. *Multivariate Geostatistics*. Springer, Berlin.
- Walter, C. 1990. *Estimation de propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle. Cartographie pédologique et géostatistique dans le Sud de l'Ille et Vilaine*. Thèse de l'Université de Paris VI.
- Webster, R. 1977. Canonical Correlation in Pedology : How useful ? *Journal of Soil Science*, 28, 196-221.
- Webster, R. & Burgess, T.M. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. III. Changing drift and universal kriging. *Journal of Soil Science*, 31, 505-524.
- Webster, R. & Burgess, T.M. 1983. Spatial variation in soil and the role of kriging. *Agronomy and Water Management*, 6, 111-122.
- Wopereis, M.C., Gascuel, O.C., Bourrie, G. & Soignet, G. 1982. Spatial variability of heavy metals in soil on a one hectare scale. *Soil Science*, 146, 113-118.
- Zadeh, L. 1965. Fuzzy sets. *Inf. Control*, 8, 338-353.
- Zevenbergen, L.W. & Thorne, C.R. 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-56.

Liste des figures

Chapitre II

Figure 2.1 : Position relative des quatre niveaux d'investigation.

Figure 2.2 : Schéma récapitulatif de la démarche adoptée.

Chapitre III

Figure 3.1 : Situation géographique de la région naturelle 'Petite Beauce'.

Figure 3.2 : Vue d'ensemble de l'allure générale de la surface du sol dans le secteur d'étude.

Figure 3.3 : Schéma de répartition des sols sur deux versants orientés Nord-Est et Sud-Ouest (d'après Duval & Isambert).

Chapitre IV

Figure 4.1 : Localisation des fosses pédologiques sur le secteur de Villamblain (Echelle 1 / 50.000).

Figure 4.2 : Schéma d'organisation des horizons pédologiques et photo de la fosse 3.

Figure 4.3 : Schéma d'organisation des horizons pédologiques et photo de la fosse 27.

Figure 4.4 : Schéma d'organisation des horizons pédologiques et photo de la fosse 16.

Figure 4.5a : Histogramme de la teneur en calcaire total ($CaCO_3$) des individus de l'ensemble argilo-limoneux (AL).

Figure 4.5b : Histogramme de la teneur en argile des individus de l'ensemble argilo-limoneux (AL).

Figure 4.6a : Granulométrie sans décarbonatation des individus (horizons) de l'ensemble argilo-limoneux (AL).

Figure 4.6b : Granulométrie des résidus insolubles des individus (horizons) de l'ensemble argilo-limoneux (AL).

Figure 4.7 : Squelettes granulométriques des résidus insolubles (horizons) des cinq ensembles d'horizons.

- Figure 4.8 :** Histogramme de la teneur en calcaire total ($CaCO_3$) des individus de l'ensemble matériaux cryoturbés (*MC*).
- Figure 4.9a :** Granulométrie sans décarbonatation des individus (horizons) de l'ensemble matériaux cryoturbés (*MC*).
- Figure 4.9b :** Granulométrie des résidus insolubles des individus (horizons) de l'ensemble matériaux cryoturbés (*MC*).
- Figure 4.10a :** Histogramme de la teneur en argile des individus de l'ensemble argilo-sableux à sablo-argileux (*FAS*).
- Figure 4.10b :** Granulométrie des individus (horizons) de l'ensemble argilo-sableux à sablo-argileux (*FAS*).
- Figure 4.11a :** Granulométrie sans décarbonatation des individus (horizons) de l'ensemble calcaires durs (*K*).
- Figure 4.11b :** Granulométrie des résidus insolubles des individus (horizons) de l'ensemble calcaires durs (*K*).

Chapitre V

- Figure 5.1 :** Coupe pédologique schématique des trois ensembles d'horizons (d'après Ould Mohamed, 1991).
- Figure 5.2 :** Différents types de Succession d'horizons au niveau des fosses pédologiques.
- Figure 5.3a :** Variation de l'épaisseur de l'argile limoneuse au sein des 27 fosses pédologiques réalisées sur le secteur d'étude suivant le type d'agencement des horizons.
- Figure 5.3b :** Histogramme de l'épaisseur de l'argile limoneuse au sein des 27 fosses pédologiques réalisées sur le secteur d'étude.
- Figure 5.4a :** Quadripôle électrique : cas du dispositif carré.
- Figure 5.4b :** Configuration du dispositif Wenner (d'après Lamothe, 1993).
- Figure 5.5 :** (a) Matériaux détectés par sondages électriques et leurs épaisseurs. (b) Matériaux détectés par sondages pédologiques et leurs épaisseurs.
- Figure 5.6 :** Coupe schématique du terrain sur la base des résistivités électriques.
- Figure 5.7 :** Principaux éléments du dispositif RATEAU.
- Figure 5.8 :** Résistivité apparente en fonction de la distance parcourue : profil électrique.

Figure 5.9 : Variogramme de la résistivité apparente.

Figure 5.10 : Carte des résistivités apparentes estimées par krigeage ordinaire et courbes d'isoaltitudes issues d'un Modèle Numérique de Terrain.

Figure 5.11 : Carte de la profondeur d'apparition du toit calcaire.

Figure 5.12a : Variation de l'épaisseur de l'argile limoneuse au sein des 58 sondages pédologiques suivant le type de succession des horizons.

Figure 5.12b : Histogramme de l'épaisseur de l'argile limoneuse au sein des 58 sondages pédologiques.

Figure 5.12c : Comparaison multiple des moyennes (Test de Tukey).

Chapitre VI

Figure 6.1 : Fréquences relatives des classes d'altitude mesurée.

Figure 6.2 : Variogrammes expérimental et théoriques de la variable altitude.

Figure 6.3 : (a) Histogramme des erreurs standardisées. (b) Diagramme de dispersion des altitudes mesurées en fonction des altitudes estimées.

Figure 6.4 : Modèle Numérique d'Altitude (MNA) estimé par krigeage à partir d'un levé topographique sur le secteur de la simulation SPOT.

Figure 6.5 : Fréquences relatives des classes d'altitude estimée.

Figure 6.6 : Modèle Numérique des intensités de la Pente (MNP) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

Figure 6.7 : Histogramme des intensités de la pente estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

Figure 6.8 : Modèle Numérique des Orientations de la pente (MNO) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

Figure 6.9 : Fréquences relatives des orientations de la pente estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

Figure 6.10a : Modèle Numérique des Convexités Transversales (MNCT) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

Figure 6.10b : Modèle Numérique des Convexités Verticales (MNCV) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.

- Figure 6.10c :** Modèle Numérique des Convexités Horizontales (MNCH) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.
- Figure 6.11a :** Histogramme des convexités transversales estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.
- Figure 6.11b :** Histogramme des convexités verticales estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.
- Figure 6.11c :** Histogramme des convexités horizontales estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.
- Figure 6.12 :** Modèle Numérique des Directions du Flux (MNFD) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.
- Figure 6.13 :** Modèle Numérique des Accumulations du Flux (MNFA) estimées à partir du MNA sur le secteur de la simulation SPOT.
- Figure 6.14 :** Modèle Numérique d'Altitude (MNA) estimé à partir des courbes de niveaux d'un document IGN au 1/25.000 sur le secteur de Villamblain.
- Figure 6.15a :** Modèle Numérique des intensités de la Pente (MNP) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villamblain.
- Figure 6.15b :** Modèle Numérique des Orientations de la pente (MNO) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villamblain.
- Figure 6.15c :** Modèle Numérique des Convexités Transversales (MNCT) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villamblain.
- Figure 6.15d :** Modèle Numérique des Convexités Verticales (MNCV) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villamblain.
- Figure 6.15e :** Modèle Numérique des Convexités Horizontales (MNCH) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villamblain.
- Figure 6.15f :** Modèle Numérique des Directions du flux (MNFD) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villamblain.
- Figure 6.15g :** Modèle Numérique des Accumulations du Flux (MNFA) estimées à partir du MNA sur le secteur de Villamblain.

Chapitre VII

- Figure 7.1 :** Localisation des 341 observations pédologiques sur le secteur de la simulation SPOT.
- Figure 7.2a :** Distributions relatives des altitudes au sein de la population et de l'échantillon.
- Figure 7.2b :** Distributions relatives des orientations de la pente au sein de la population et de l'échantillon.
- Figure 7.2c :** Distributions relatives des intensités de la pente au sein de la population et de l'échantillon.
- Figure 7.3 :** Cartographie des épaisseurs de l'argile limoneuse (carbonatée ou non carbonatée) à partir de l'intensité de la pente issue du MNA.
- Figure 7.4a :** Fréquence de présence de l'argile limoneuse non carbonatée en fonction de l'orientation de la pente.
- Figure 7.4b :** Ajustement des fréquences relatives observées par un polynôme trigonométrique.
- Figure 7.4c :** Cartographie des fréquences de présence de l'argile limoneuse non carbonatée en fonction de l'orientation de la pente issue du MNA.
- Figure 7.5 :** Comparaison des épaisseurs de l'ensemble argilo-limoneux et des fréquences de présence de l'argile limoneuse non carbonatée.

Chapitre VIII

- Figure 8.1 :** Fréquences moyennes des directions du vent fort (%).
- Figure 8.2a :** Distribution granulométrique avant et après décarbonatation le long d'un transect orienté Nord-Est / Sud-Ouest.
- Figure 8.2b :** Variation de la teneur en limon grossier avant et après décarbonatation au sein des horions de surface.
- Figure 8.2c :** Variation de la teneur en limon grossier avant et après décarbonatation au sein des horions de profondeur.
- Figure 8.3 :** Comparaison multiple (test de Tukey) des valeurs moyennes d'éclairement en fonction de l'orientation de la pente.

- Figure 9.1 :** Localisation des observations de la variable pédologique épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux.
- Figure 9.2a :** Carte de l'épaisseur de l'argile limoneuse estimée par **régression linéaire simple à partir des données d'épaisseur et l'intensité de la pente issue du MNA.**
- Figure 9.2b :** Carte de l'épaisseur de l'argile limoneuse estimée par **régression linéaire multiple à partir des données d'épaisseur et de l'intensité de la pente et du sinus de l'orientation de la pente issues du MNA.**
- Figure 9.2c :** Carte de l'épaisseur de l'argile limoneuse estimée par **régression linéaire multiple à partir des données d'épaisseur et de l'intensité de la pente, du sinus de l'orientation de la pente et de l'altitude issues du MNA.**
- Figure 9.3 :** Variogrammes expérimental et théorique de la variable EPAL.
- Figure 9.4 :** Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée par **krigeage ordinaire à partir des données d'épaisseur.**
- Figure 9.5 :** Variogrammes expérimental et théorique de la variable intensité de la pente.
- Figure 9.6 :** Carte de l'intensité de la pente estimée par **krigeage ordinaire à partir des données de l'intensité de la pente.**
- Figure 9.7 :** Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée par **krigeage ordinaire à partir des données d'épaisseur avec l'intensité de la pente utilisée comme dérive externe.**
- Figure 9.8 :** Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée par **krigeage avec une dérive linéaire : krigeage universel.**
- Figure 9.9 :** Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée par **krigeage universel à partir des données d'épaisseur avec l'intensité de la pente utilisée comme dérive externe.**
- Figure 9.10 :** Variogrammes expérimentaux et théoriques directs et croisé des variables épaisseur de l'argile limoneuse et intensité de la pente : (a) variogramme croisé ; (b) variogramme de l'épaisseur de l'argile limoneuse ; (c) variogramme de l'intensité de la pente.
- Figure 9.11 :** Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée par **cokrigeage à partir des données d'épaisseur et d'intensité de la pente.**

Figure 9.12 : Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée à partir d'un modèle combinant la régression classique et le krigeage ordinaire : Modèle 1 (Mod.1).

Figure 9.13 : Carte de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux estimée à partir d'un modèle combinant la régression classique et le krigeage ordinaire : Modèle 2 (Mod.2).

Figure 9.14 : Ecarts types des rangs en fonction des rangs moyens.

Chapitre X

Figure 10.1 : Variation des taux de gain de précision des estimations par le KUDEX par rapport à la RLM en fonction de la densité d'échantillonnage de la variable d'intérêt.

Figure 10.2 : Position relative des secteurs de 380 et 1600 ha et répartition des observations pédologiques au sein de chaque secteur.

Figure 10.3 : Localisation des observations pédologiques d'estimation et de validation sur le secteur des 3500 ha.

Figure 10.4 : Carte des différences entre les orientations de la pente issues du MNA estimé à partir du levé topographique et les orientations de la pente issues du MNA estimé à partir de la carte topographique.

Figure 10.5 : Carte des différences entre les intensités de la pente issues du MNA estimé à partir du levé topographique et les intensités de la pente issues du MNA estimé à partir de la carte topographique.

Figure 10.6 : Cartographie de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux par un modèle de régression linéaire multiple sur le secteur des 3500 ha.

Figure 10.7 : Cartographie de l'épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux par la méthode de la dérive externe sur le secteur des 3500 ha en utilisant l'intensité de la pente comme une fonction de forme.

Figure 10.8 : Carte des différences entre les épaisseurs de l'ensemble argilo-limoneux estimées par le modèle de régression et les épaisseurs estimées par la méthode de la dérive externe sur le secteur des 3500 ha.

Figure 10.9a : Histogramme des résidus entre les valeurs observées de l'épaisseur de l'argile limoneuse et les valeurs estimées par le modèle de régression linéaire multiple.

Figure 10.9b : Histogramme des résidus entre les valeurs observées de l'épaisseur de l'argile limoneuse et les valeurs estimées par la méthode de la dérive externe.

Liste des tableaux

Chapitre IV

- Tableau 4.1 :** Résultats de l'analyse granulométrique avant décarbonatation, teneur en $CaCO_3$, en *C* et *CEC* des horizons de la fosse 3.
- Tableau 4.2 :** Résultats de l'analyse granulométrique avant décarbonatation, teneur en $CaCO_3$, en *C* et *CEC* des horizons de la fosse 27.
- Tableau 4.3 :** Résultats de l'analyse granulométrique, teneur en $CaCO_3$, en *C* et *CEC* des horizons de la fosse 16.
- Tableau 4.4 :** Caractéristiques granulométriques, $CaCO_3$ et *CEC* des horizons *AL*.
- Tableau 4.5 :** Caractéristiques granulométriques, $CaCO_3$ et *CEC* des horizons *MC*.
- Tableau 4.6 :** Caractéristiques granulométriques, $CaCO_3$ et *CEC* des horizons *CP*.
- Tableau 4.7 :** Caractéristiques granulométriques, $CaCO_3$ et *CEC* des horizons *FAS*.
- Tableau 4.8 :** Caractéristiques granulométriques, $CaCO_3$ et *CEC* des horizons *K*.

Chapitre V

- Tableau 5.1 :** Epaisseur de l'argile limoneuse et type de matériau sous-jacent rencontré au sein des fosses pédologiques.
- Tableau 5.2 :** Variation de la résistivité apparente au sein de chaque classe de l'épaisseur de la première couche.
- Tableau 5.3 :** Comparaison des profondeurs d'apparition du toit calcaire (*PATC*) selon la prospection pédologique et la prospection géophysique.
- Tableau 5.4 :** Epaisseur de l'argile limoneuse et type de matériau sous-jacent rencontrés déterminés à partir de sondages pédologiques

Chapitre VI

- Tableau 6.1 :** Statistiques sommaires sur la variable altitude mesurée.
- Tableau 6.2 :** Coefficients des fonctions des variogrammes théoriques.

Tableau 6.3 : Statistiques sommaires sur la variable altitude estimée par krigeage (MNA) et les différents attributs morphologiques dérivés du MNA.

Tableau 6.4 : Forme de la surface en pour-cent suivant les trois types de convexités.

Tableau 6.5 : Pourcentage de surface par direction du flux.

Tableau 6.6 : Statistiques sommaires sur la variable altitude estimée (MNA) et les différents attributs morphologiques dérivés du MNA sur le secteur de Villamblain.

Chapitre VII

Tableau 7.1 : Statistiques sommaires sur l'échantillon des 341 individus.

Tableau 7.2 : Résultats du test du khi-deux.

Tableau 7.3 : Répartition de l'argile limoneuse par classe d'intensité de la pente.

Tableau 7.4 : Matrice des corrélations partielles entre l'épaisseur de l'argile limoneuse et les attributs morphologiques.

Tableau 7.5 : Répartition de l'argile limoneuse par classe d'orientation de la pente.

Tableau 7.6 : Répartition des observations pédologiques en fonction des classes d'intensités de la pente et de son orientation.

Tableau 7.7 : Répartition des individus de la population en fonction des classes d'intensités de la pente et de son orientation.

Tableau 7.8 : Répartition de l'argile limoneuse en fonction des classes d'intensité de la pente et de son orientation.

Tableau 7.9 : Répartition des matériaux par classe d'orientation de la pente.

Tableau 7.10 : Répartition des matériaux par classe d'intensité de la pente.

Chapitre VIII

Tableau 8.1 : Statistiques sommaires du croisement de l'orientation de la pente et de l'ombrage.

Chapitre IX

Tableau 9.1 : Statistiques sommaires sur l'échantillon d'estimation.

Tableau 9.2 : Matrice des corrélations partielles.

Tableau 9.3 : Modèles de régression relatifs au choix des variables explicatives par sélection progressive.

Tableau 9.4 : Statistiques sommaires sur les différents résultats d'estimation aux noeuds de la grille 20 m x 20 m.

Tableau 9.5 : Coefficients des fonctions de variogrammes théoriques.

Tableau 9.6 : Paramètres des fonctions de régression entre les variables *EPAL* et β au niveau des points d'observation et aux noeuds de la grille d'estimation.

Tableau 9.7 : Coefficients des fonctions théoriques des variogrammes et du variogramme croisé.

Tableau 9.8 : Résultats des procédures de validation.

Tableau 9.9 : Gain de précision par rapport à la méthode de la dérive externe (KUDEX).

Tableau 9.10 : Intervalle de confiance de la différence de deux moyennes.

Chapitre X

Tableau 10.1 : Mesure des performances de la méthode de la dérive externe et de la régression linéaire multiple suivant la densité d'échantillonnage de la variable d'intérêt.

Tableau 10.2 : Influence de la précision de la variable auxiliaire sur l'estimation de la variable d'intérêt par KUDEX.

Tableau 10.3 : Relation entre *EPAL* et les attributs du relief suivant la surface du domaine d'étude.

Tableau 10.4 : Paramètres des modèles de régression en fonction de l'origine des attributs morphologique du relief.

Tableau 10.5 : Différence entre les orientations de la pente selon l'origine du MNA, exprimée en pourcentage de surface.

Table des matières

Avant-propos

Sommaire

Résumé

Introduction générale 3

Première partie : Présentation de la démarche

Chapitre I : Démarches cartographiques en pédologie

Introduction	9
1. Brève description des méthodes de cartographie en pédologie	10
2. Développement des approches de la statistique spatiale	12
3. Utilisation des relations entre sol et morphologie du relief	14
Conclusions du chapitre I	16

Chapitre II : Approche développée

Introduction	18
1. Objet d'étude et différents niveaux d'investigation	18
2. Rôles et opérations menés pour chacun des quatre niveaux d'investigation	21
2.1 : Loi de distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux selon les principaux facteurs pédogénétiques	21
2.1.1 : Identification et caractérisation des principaux matériaux	21
2.1.2 : Relation ensemble argilo-limoneux - matériaux sous-jacents	22
2.1.3 : Relation matériaux - relief	22
2.1.4 : Autres hypothèses relatives à la loi de distribution de AL	22
2.2 : Modélisation, sensibilité du modèle et généralisation spatiale	23
2.2.1 : Optimisation de l'estimation de EPAL	23

Chapitre III : Cadre général : présentation du milieu physique

Introduction	25
1. Géologie de la zone	26
2. Hydrogéologie	26
3. Climat	29
4. Topographie de la zone	29
5. Les sols	29
6. Actions anthropiques	30
Conclusions du chapitre III	31

Deuxième partie : Recherche des lois de distribution spatiale des sols selon les principaux facteurs pédogénétiques

Chapitre IV : Identification et caractérisation des principaux matériaux et horizons pédologiques

Introduction	35
1. Description morphologique et caractéristiques pédologiques de trois fosses considérées de référence sur le secteur d'étude	39
1.1 : Limon peu épais reposant sur un substrat calcaire dur : Sol de la fosse 3	39
1.2 : Limon reposant sur des matériaux cryoturbés : Sol de la fosse 27	41
1.3 : Limon reposant sur des matériaux argileux à sables grossiers : Sol de la fosse 16	43
2. Détermination et caractérisation des principaux horizons pédologiques présents sur le secteur d'étude	46
2.1 : Identification des différents horizons pédologiques	46
2.2 : caractères morphologiques de terrain des différents ensembles d'horizons	46
2.3 : Caractérisation analytique des différents ensembles d'horizons	47
2.4 : Synthèse, discussion et premières hypothèses	61

Chapitre V : Etude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse selon le matériau parental

Introduction	65
1. Relation entre sol et matériaux sous-jacents à l'échelle du secteur de 3500 ha	67
2. Relation entre sol et matériaux à l'échelle d'une parcelle de 20 ha	69
2.1 : Introduction	69
2.2 : Etude de la variabilité verticale par sondages électriques	71
2.2.1 : Méthode	71
2.2.2 : Différenciation des couches par sondage électrique	71
2.2.3 : Analyse structurale des matériaux le long du transect	75
2.3 : Etude de la variabilité latérale par traînés électriques	77
2.3.1 : Méthode : description du dispositif RATEAU	77
2.3.2 : Résultat de la prospection par traînés électriques	79
2.3.3 : Cartographie de la profondeur d'apparition du toit calcaire	79
2.4 : Validation de l'approche géophysique	83
2.5 : Etude de la variation de l'épaisseur du sol en fonction de la succession des matériaux	85
Conclusions du chapitre V	88

Chapitre VI : Définition et caractérisation des principaux attributs du relief

Introduction	89
1. Modèle Numérique d'Altitude et attributs morphologiques dérivés sur le secteur de la simulation SPOT	91
1.1 : Présentation des mesures d'altimétrie	91
1.2 : Estimation de l'altitude aux noeuds d'une grille d'interpolation	91
1.3 : Calcul des attributs morphologiques à partir du MNA	97

1.3.1 : Intensité de la pente	99
1.3.2 : Orientation de la pente	99
1.3.3. : Convexités de la pente	103
1.3.4 : Directions et accumulations du flux	105
2. Modèle Numérique d'Altitude et attributs morphologiques dérivés sur le secteur de Villamblain	109
Conclusions du chapitre VI	113

Chapitre VII : Etude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse et des matériaux sous-jacents selon les attributs du relief

Introduction	115
1. caractéristiques morphologiques des observations pédologiques	119
2. Etude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse en fonction des attributs morphologiques du relief	120
2.1 : Analyse statistique de l'épaisseur de l'argile limoneuse en fonction des attributs morphologiques du relief	120
2.1.1 : La pente	120
2.1.2 : L'altitude	123
2.1.3 : Les convexités	123
2.1.4 : Synthèse	124
2.2 : Cartographie de l'épaisseur de l'argile limoneuse sur le secteur de la simulation SPOT	125
3. Etude de la distribution spatiale de l'argile limoneuse non carbonatée en fonction des attributs morphologiques du relief	127
3.1 : Fréquence de présence de l'argile limoneuse non carbonatée en fonction de l'orientation de la pente	127
3.2 : Cartographie de la fréquence de présence de l'argile limoneuse non carbonatée sur le secteur de la simulation SPOT	127
4. Distribution spatiale des différents matériaux en fonction des attributs morphologiques du relief	131

Conclusions du chapitre VII	132
-----------------------------	-----

Chapitre VIII : Autres facteurs pédogénétiques et synthèse relative aux résultats de la deuxième partie

Introduction	133
1. Relation entre la distribution spatiale de l'ensemble argilo-limoneux et les facteurs pédogénétiques "climat" et "action anthropique"	135
1.1 : Direction des vents dominants actuels dans la zone d'étude	135
1.2 : Distribution granulométrique le long d'un transect	135
1.3 : Estimation de l'énergie solaire selon l'orientation des versants	139
1.4 : Effet des chemins et des bords de parcelles sur l'épaisseur de AL	140
2. Synthèse relative aux résultats des chapitres de la deuxième partie	141

Troisième partie : Modélisation spatiale et généralisation

Chapitre IX : Optimisation de l'estimation de la variable sol : épaisseur de l'ensemble argilo-limoneux

Introduction	145
1. Théorie des méthodes utilisées	146
1.1 : Régression linéaire multiple	146
1.2 : Géostatistiques stationnaires	146
1.2.1 : Modèle linéaire de régionalisation	146
a. Variogramme expérimental	146
b. Variable régionalisée et fonction aléatoire	147
c. Variogramme théorique	148
1.2.2 : Krigeage	148
a. Krigeage de la moyenne	148
b. Krigeage en un point : le krigeage ordinaire	151

c. Validation croisée	153
1.3 : Géostatistiques non stationnaires	153
1.3.1 : Krigeage universel	153
1.3.2 : Méthode de la dérive externe	155
a. Krigeage ordinaire avec dérive externe	155
b. Krigeage universel avec dérive externe	157
1.4 : Géostatistiques multivariées	157
1.4.1 : Fonction de covariance croisée	157
1.4.2 : Variogramme croisé	158
1.4.3 : Cokrigeage	158
a. Isotopie et hétérotopie	158
b. Cokrigeage ordinaire	159
c. Cokrigeage simple	159
1.5 : Modèles régression - krigeage	160
2. Application des méthodes d'estimation au secteur Est de la simulation SPOT	160
2.1 : Matériels	160
2.2 : Résultats	162
2.2.1 : Relation EPAL et attributs morphologiques	162
2.2.2 : Analyse variographique et krigeage ordinaire de la variable EPAL	163
2.2.3 : Estimation de EPAL avec une fonction de forme : krigeage ordinaire avec une dérive externe	167
2.2.4 : Estimation de EPAL avec une dérive linéaire : krigeage universel	171
2.2.5 : Utilisation de l'intensité de la pente comme dérive externe pour estimer la variable EPAL	171
2.2.6 : Analyse variographique multivariée et cokrigeage ordinaire de la variable EPAL	173
2.2.7 : Estimation de EPAL par deux modèles combinant la régression linéaire et le krigeage	173

3. Comparaison des méthodes d'estimation	175
3.1 : Procédures de validation	175
3.2 : Résultats	177
Conclusions du chapitre IX	180

Chapitre X : Sensibilité du modèle de répartition des sols et généralisation des résultats à partir des données disponibles

Introduction	183
1. Sensibilité du modèle à la densité d'échantillonnage	184
1.1 : Effet de la densité d'échantillonnage de la variable d'intérêt	184
1.2 : Effet de la précision du MNA et de ses attributs dérivés	185
2. Sensibilité du modèle à la taille du domaine d'étude	187
3. Généralisation spatiale	188
3.1 : Cartographie de EPAL par un modèle de régression et par la méthode de la dérive externe	191
3.2 : Validation des résultats de la cartographie sur le secteur des 3500 ha	192
Conclusions du chapitre X	197
Conclusion générale	201
Références bibliographiques	209
Liste des figures	219
Liste des tableaux	227