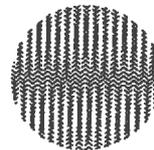




REGION CENTRE



TH-HB 25



INRA

Institut National de la Recherche Agronomique



THESE

présentée en vue de l'obtention
du Doctorat de l'Université de Nancy I
Discipline : Sciences de la Terre
Spécialité : Pédologie

par

Philippe CHERY

VARIABILITE DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUVERTURE DE SOL.

CONSEQUENCES POUR LE BILAN HYDRIQUE HIVERNAL
D'UN SECTEUR DE PETITE BEAUCE.

Soutenue publiquement le 11 juillet 1995 devant le Jury composé de :

MM. A. HERBILLON,	Professeur à l'Université de Nancy I	Président
M. JAMAGNE,	Directeur de Recherche à l'INRA d'Orléans	Rapporteur
A. TABBAGH,	Professeur à l'Université de Paris VI	Rapporteur
A. BRUAND,	Chargé de Recherche à l'INRA d'Orléans	Examineur
M. DABAS,	Chargé de Recherche au CNRS de Garchy	Examineur
M. VOLTZ,	Chargé de Recherche à l'INRA de Montpellier	Examineur

Avant-propos

Cette thèse est l'aboutissement de quatre années de travail, tant au laboratoire que sur le terrain, au sein de l'Unité de Science du sol de l'INRA d'Orléans. Elle a pu être réalisée grâce au soutien financier de la Région Centre. Que toutes les personnes qui ont bien voulu m'accorder leur confiance soient ici remerciées.

Ce travail a aussi été l'occasion pour moi de faire de nombreuses rencontres de personnes issues de disciplines très différentes, que ce soit dans l'Unité de Science du Sol de l'INRA d'Orléans, au Centre de Recherches Géophysiques du CNRS de Garchy ou à la station de Science du Sol de l'INRA de Montpellier. Que toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à ce mémoire trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance.

Je tiens particulièrement à remercier les membres du jury qui ont évalué ce travail :

- Monsieur Adrien HERBILLON, Professeur à l'Université de Nancy I qui a accepté d'être mon Directeur de thèse et qui m'a fait l'honneur de bien vouloir présider le jury.

- Monsieur Marcel JAMAGNE, Directeur de Recherche dans l'Unité de Science du Sol de l'INRA d'Orléans, qui m'a accueilli dans son laboratoire et qui a bien voulu juger ce travail et en être l'un des rapporteurs. Merci pour son accueil chaleureux à Orléans, sa lecture critique et pour le temps qu'il a dû consacrer à ce travail. Je le remercie également pour ses conseils et ses encouragements à mon égard.

- Monsieur Alain TABBAGH, Professeur à l'Université de Paris VI, qui m'a fait l'honneur d'être l'un des rapporteurs de cette thèse, je l'en remercie vivement. Merci pour son accueil au CRG de Garchy, pour ses remarques pertinentes et ses conseils judicieux.

- Monsieur Ary BRUAND, Chargé de Recherche dans l'Unité de Science du Sol de l'INRA d'Orléans, qui a initié et encadré cette thèse. Il en a suivi chaque étape avec une continuelle attention et quelques cheveux blancs!!! Qu'il trouve ici tous mes remerciements pour la somme de travail, les conseils qu'il m'a accordés et les lectures souvent "poétiques" et fastidieuses...

- Monsieur Michel DABAS, Chargé de Recherche au CNRS de Garchy, que je remercie pour sa disponibilité à mon égard, la qualité de ses critiques et son amitié. Merci Michel pour les longues heures passées sur la mise au point des dispositifs géophysiques, des heures passées sur le terrain où les conditions n'étaient pas toujours "conductrices" et aux traitements des résultats. Je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour son soutien de tout instant, son intérêt toujours constant pour ce travail, ses relectures et ses conseils judicieux. Je le remercie chaleureusement d'avoir accepté de faire partie de ce jury.

- Monsieur Marc VOLTZ, Chargé de Recherche à la station de Science du Sol de l'INRA de Montpellier à qui j'adresse tous mes remerciements pour l'intérêt qu'il a manifesté à ce travail. Je lui exprime ici toute ma reconnaissance pour ses multiples corrections judicieuses, pour sa gentillesse et ses grandes compétences. La version actuelle de ce mémoire lui doit beaucoup. Merci Marc de m'avoir accueilli à Montpellier, d'avoir bien voulu suivre ce travail et accepté de faire partie du jury.

C'est avec un grand plaisir que j'exprime toute ma reconnaissance à Bernard RENAUX et Laurent RAISON qui ont grandement contribué à l'obtention des résultats pendant les campagnes de mesure, quelquefois dans des conditions climatiques difficiles. La qualité du travail expérimental leur doit beaucoup.

Je remercie également Béatrice NOIRTIN, Lucien ROUSSET et Sacha DESBOURDES qui ont activement participé à la réalisation des documents graphiques, toujours avec gentillesse et diligence.

Un grand merci pour leur collaboration quotidienne et leur bonne humeur à Messieurs Pierre COURTEMANCHE, Hervé GAILLARD, Christian LE LAY, Didier CHESNEAU et Roger DARTHOUT. Merci à Marie-Pierre POUSSINEAU, Magalie MAROLLEAU, Monique SOLER et David DUPRE qui ont assuré la réalisation de documents dans ce mémoire. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute mon amitié. Je tiens aussi à remercier Messieurs Abel DORIGNY et Michel HARDY, pour leurs nombreux conseils et pour des discussions toujours fructueuses. Merci à Madame Odile DUVAL d'avoir accepté de relire ce document et de m'avoir fait part de ses remarques.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à Yves LE BISSONNAIS, Micheline EIMBERCK, Joël DAROUSSIN et Dominique"s" KING et ARROUAYS pour leur amitié et leurs conseils divers.

Je remercie également MM. Michel ISAMBERT, Jacky ROQUES, Raymond HARDY, Bernard NICOULLAUD, Denis BAIZE, Jean Claude BEGON, Gérald YART et Alain COUTURIER pour leur aide, leurs conseils et leur gentillesse.

Je tiens à remercier vivement Monsieur PERDEREAU qui, en nous accueillant sur ses terres de Machelainville, a permis la réalisation de ce travail dans les meilleures conditions.

Je ne remercierai jamais assez mes parents, ma famille et tous mes amis qui m'ont toujours soutenu dans les hauts et les bas de ces dernières années. Merci également à Tatachat pour tout ce qu'elle a pu m'apporter. Je leur adresse tous mes remerciements pour leur présence le jour de la soutenance. Je remercie aussi Cécile pour ce que nous avons fait ensemble...

Je ne pourrais terminer sans remercier vivement tous les "complices" de tous les jours sans qui ces années auraient pu être plus tristes. Merci donc à Fatiha ATTOU, Hassane BENKHADRA, Hocine BOURENNANE, Vincent CHAPLOT, Denis FOX, Elisabeth GALLIEN, Christine LE BAS, Béatrice NOIRTIN, Saleck OULD-MOHAMED, Laurent RAISON et Anne-Laure THOMAS ainsi que tous les autres pour leur soutien moral.

SOMMAIRE

Introduction générale

Première Partie

Le secteur de Liconcy-Machelainville

- Chapitre 1** : Cadre général : La "Petite Beauce"
- Chapitre 2** : Caractéristiques du secteur d'étude
- Chapitre 3** : Les sols du secteur d'étude

Deuxième Partie

Variation d'épaisseur de la couverture de sol

- Chapitre 4** : Rappel et mise en oeuvre des méthodes d'interpolation et des méthodes statistiques
- Chapitre 5** : Variation de l'épaisseur de la couverture de sol et étude de la formation limono-argileuse
- Chapitre 6** : Délimitation des matériaux argilo-sableux par trainés électriques

Troisième Partie

Fonctionnement hydrique hivernal de la couverture de sol

- Chapitre 7** : Termes du bilan hydrique et bilan

Conclusion générale

Bibliographie

Listes des figures et des tableaux

Table des matières

Annexes

... "La route de Châteaudun à Orléans, d'une blancheur de craie, s'en allait toute droite pendant quatre lieues, déroulant le défilé géométrique des poteaux du télégraphe. Et rien d'autre que trois ou quatre moulins de bois, sur leur pied de charpente, les ailes immobiles. Des villages faisaient des îlots de pierre, un clocher au loin émergeait d'un pli de terrain, sans qu'on vit l'église, dans les molles ondulations de cette terre de blé." (Emile Zola).

Voici donc comment apparaissait la Beauce en 1887 sous la plume d'Emile Zola dans son roman "La Terre". Aujourd'hui, entre la Loire et le Loir, entre Orléans et Châteaudun, aux confins des départements du Loiret, du Loir-et-Cher et de l'Eure-et-Loir, les pylônes des lignes à haute tension ont remplacé ceux du télégraphe, des moulins de bois ne subsistent que des tours en ruines balisant ça et là le paysage et les immenses silos à grain des coopératives ont supplanté les lointains clochers...

INTRODUCTION GENERALE

La gestion de l'eau dans les **milieux calcaires filtrants** et cultivés de façon **intensive** pose, depuis plusieurs années, des problèmes à la fois d'ordre quantitatifs et qualitatifs. La culture intensive dans ce type de milieu implique souvent une **irrigation importante**. Un des effets de cette pratique est de profondément **modifier** le fonctionnement des aquifères. Les **déficits pluviométriques** de ces dernières années ont aggravé de façon sensible ce phénomène.

D'autre part, on constate avec le temps une **dégradation générale** de la qualité des eaux des nappes phréatiques. Cette dégradation est provoquée essentiellement par **l'augmentation de la teneur en nitrates** et la présence de plus en plus fréquente de **produits herbicides et pesticides** (Mariotti et Landreau, 1986). Devant l'ampleur prise par ces phénomènes et la sensibilisation croissante de l'opinion publique aux problèmes de gestion de l'eau, des programmes d'action destinés à **réduire** les flux azotés ont été mis en place sous l'égide du CORPEN (Comité d'Orientation pour la Réduction de la Pollution des Eaux par les Nitrates) à l'échelle nationale (Morlet, 1990).

Afin de tester en grandeur réelle la faisabilité des recommandations du CORPEN, un programme régional "Nitrates-Centre" a été mis en place sur cinq années (Préfecture Région Centre, 1990). Dans le cadre de ce programme, plusieurs **sites expérimentaux** sont étudiés en Petite Beauce. Le choix de cette région naturelle réside dans le fait qu'elle constitue un milieu particulièrement **sensible** à ce type de pollution. La faible profondeur de l'aquifère (nappe des

calcaires de Beauce), la faible épaisseur des sols, le caractère intensif des cultures et l'irrigation quasi généralisée font de cette partie de la Beauce un terrain d'expérimentation adéquat.

Dans ce contexte, **l'objectif de cette étude est de discuter de l'importance qu'il faut attacher aux variations d'épaisseur de la couverture de sol et ainsi qu'à celles de son état hydrique au début de l'hiver pour l'étude de la recharge hivernale de la nappe phréatique des calcaires de Beauce.** Un secteur d'étude de 100 ha a par conséquent été choisi en Petite Beauce. Le choix d'un tel secteur réside dans le fait qu'il se situe dans une zone de Petite Beauce particulièrement sensible aux problèmes de gestion quantitative et qualitative de l'eau et que, tout en présentant des caractères qui sont ceux de la Petite Beauce, d'autres lui sont **spécifiques**.

Pour mener à terme cette étude, nous avons procédé en **trois parties**. Dans une première partie, nous avons étudié de façon détaillée les **sols du secteur d'étude** préalablement délimité et décrit. Nous montrerons qu'il est alors possible de caractériser les **grands types de matériaux** qui constituent les sols. Lors d'une deuxième partie, nous nous sommes attachés à évaluer le plus précisément possible **l'épaisseur des différentes formations** rencontrées sur le secteur d'étude. Plusieurs méthodes de mesure de l'épaisseur ont été employées puis comparées, la variabilité de cette épaisseur a été analysée et sa spatialisation a été réalisée en utilisant des méthodes d'interpolation non probabiliste et probabiliste. Enfin, dans d'une troisième partie, **nous avons calculé la lame d'eau drainée par le sol dans le secteur d'étude** et ceci en prenant en compte différentes variables de type pédologique, climatique, agronomique et hydrologique qui ont été intégrées au sein d'un Système d'Information Géographique (S.I.G.).

Première Partie

**Le secteur d'étude
de Liconcy-Machelainville**

Après avoir, dans un premier chapitre, précisé le cadre général de la région d'étude, le deuxième chapitre présente les caractéristiques du site d'étude qui a été choisi. L'étude de fosses pédologiques qui est ensuite présentée permet de préciser la nature des sols qui sont rencontrés en Petite Beauce et de mettre en évidence les caractéristiques qu'il est nécessaire de prendre en compte pour décrire le drainage hivernal des sols.

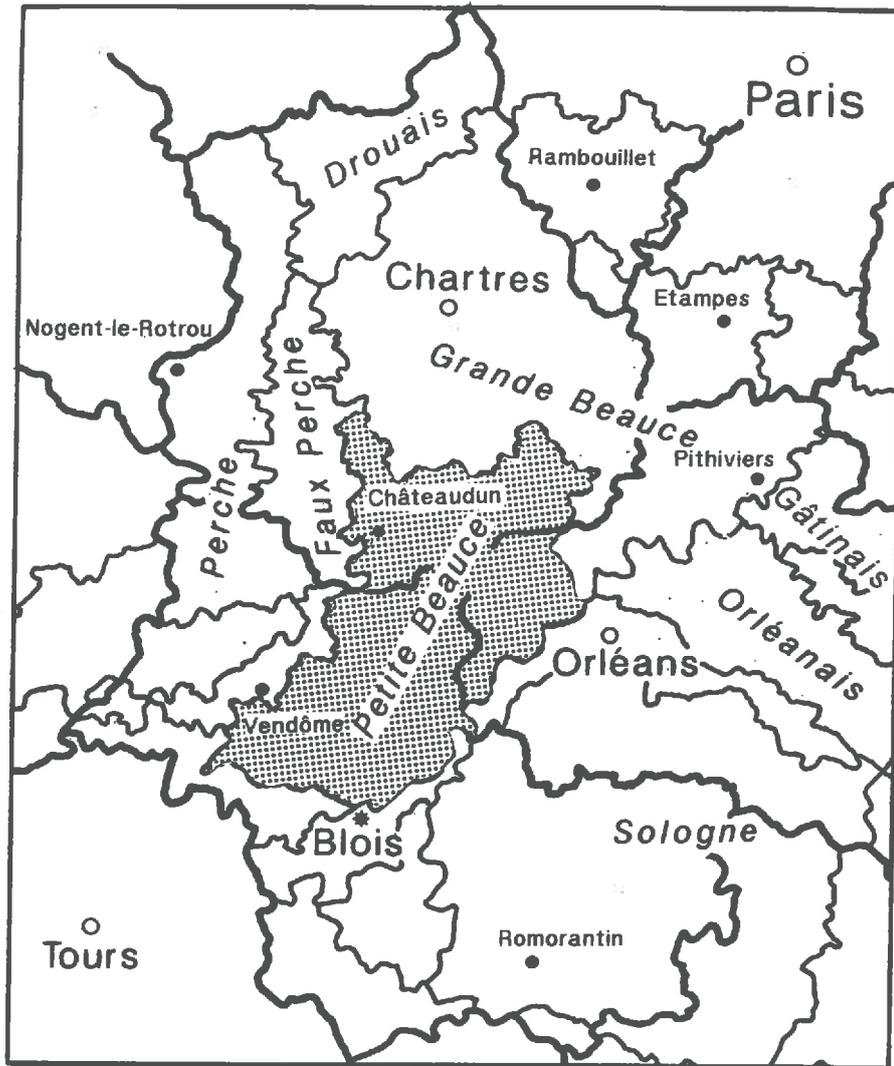


Figure 1.1 : Situation générale de la Petite Beauce.

CADRE GENERAL : LA "PETITE BEAUCE"

I. INTRODUCTION

La région naturelle "**Beauce**" est délimitée au Nord par les forêts de Rambouillet (Nord-Ouest) et de Fontainebleau (Nord-Est), à l'Est par le Gâtinais beauceron dont elle est séparée par une cuesta abrupte d'orientation Nord-Sud. Au Sud, la Beauce est délimitée par la forêt d'Orléans et le Val de Loire. A l'Ouest enfin, la vallée du Loir et le Faux-Perche délimitent le plateau calcaire de Beauce seulement entaillé dans sa partie septentrionale par des cours d'eau importants, en particulier par la vallée de l'Essonne.

La région naturelle "**Petite Beauce**" ou "Beauce de Patay" appartient à la Beauce. Elle se situe essentiellement sur la partie occidentale de l'entablement du plateau beauceron (figure 1.1). Elle est délimitée à l'Ouest par la vallée du Loir, au Sud par le Val de Loire et la forêt d'Orléans. Les limites Est et Nord ne sont pas définies de façon bien distincte.

Le paysage de champs ouverts est caractérisé par un relief faiblement ondulé. Les parcelles sont de grande taille. Les cultures intensives sont le plus souvent irriguées. L'habitat est regroupé en de nombreux hameaux de fermes de 100 hectares en moyenne et quelques bourgs importants (Ouzouer-le-Marché, Marchenoir, Patay).

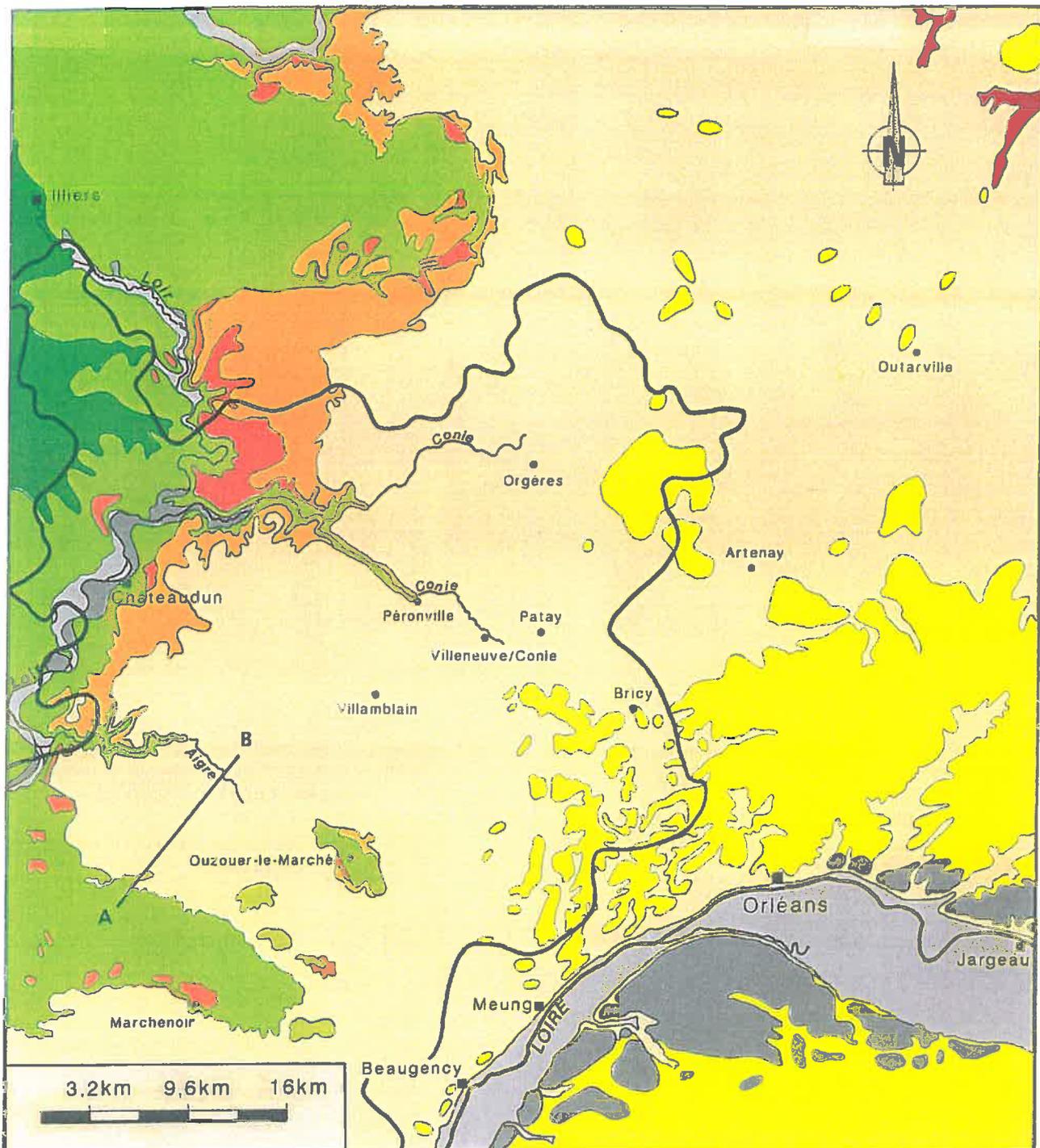
II. PRINCIPALES FORMATIONS GEOLOGIQUES

De nombreux auteurs ont étudié les formations calcaires de Beauce et de Petite Beauce. Citons parmi eux Desprez et Mégnien (1965), Macaire (1971), Gigot (1973), Gigout (1973), Lorain (1973), Mégnien (1976 et 1980) et Ménillet (1980).

De ces études, il se dégage que la craie campanienne n'est jamais affleurante en Petite Beauce (figure 1.2 et 1.3). Les terrains rencontrés sont constitués par de la craie blanche à silex liée à la grande transgression marine du Crétacé supérieur. Cette transgression a recouvert entièrement le Sud du bassin de Paris du Cénomaniens au Campanien supérieur (Gigot, 1973). A l'Eocène, cette craie a été altérée sous influence continentale pour donner des argiles à silex. Cette formation affleure au niveau de l'anticlinal d'Ouzouer-le-Marché (figure 1.3). De couleur brun ocre à rouille, elle contient des passées ferrugineuses rouges sombres ou charbonneuses noires et de nombreux silex anguleux ou peu émoussés. Son épaisseur varie entre 15 et 25 mètres. L'argile à silex est surmontée par un niveau calcaire d'âge lutétien (le calcaire de Morancez) qui affleure au niveau de l'anticlinal d'Ouzouer-le-Marché (Godonville, Ourcis, Ouzouer). Son épaisseur est de l'ordre de 10 mètres. D'aspect marneux, de couleur blanche à ocre, pulvérulent, farineux, il est totalement azoïque et aphytique. De ce fait, ce calcaire est considéré comme le résultat d'une précipitation chimique dans une eau saturée après dissolution de la craie voisine.

La formation aquitanienne est représentée par les calcaires de Beauce qui constituent le soubassement de l'ensemble de la Petite Beauce. Ces calcaires sont d'origine principalement lacustre parfois laguno-lacustre voire palustre (Lorain, 1973). Alors que l'épaisseur des calcaires de Beauce peut aller jusqu'à une centaine de mètres au centre du Bassin (à la verticale de la Ferté St-Aubin), elle n'est que d'une cinquantaine de mètres en Petite Beauce (Lorain, 1973). Les calcaires de Beauce désignent au sens large l'ensemble des assises carbonatées surmontant dans le Nord les sables de Fontainebleau. L'ensemble est hétérogène du fait des différents faciès qui le constituent. Cette hétérogénéité se manifeste aussi bien verticalement que horizontalement. La terminologie décrivant cette diversité est abondante (Mégnien, 1980 ; Lorain, 1973). Elle mentionne des calcaires crayeux, sub-lithographiques, grumeleux, travertineux, graveleux, pseudo-bréchiques et vermiculés à grande échelle (Macaire, 1971). Elle mentionne aussi des calcaires compacts à grains fins (calcaires vermiculés ou vacuolaires à limnées et planorbes), calcaires caverneux et calcaires lithographiques à sub-lithographiques, de calcaires pulvérulents et/ou farineux, et de calcaires hétéromorphes bréchiques, rubanés ou pseudo-oolithiques (Lorain, 1973). A petite échelle, le calcaire ne montre pas d'organisation bien définie. Il se présente en masse plus ou moins cohérente sans bancs définis ou en bancs lenticulaires.

Surmontant la formation aquitanienne, des formations burdigaliennes sableuses et non calcaires (sables de l'Orléanais) sont aussi présentes localement en Petite Beauce (figure



- | | |
|---|--|
|  a ₂ : alluvions modernes et récentes |  g ₂ : Stampien : sables et grès de Fontainebleau |
|  a ₁ : alluvions anciennes |  e ₅ : Lutétien : calcaire de Morancez |
|  m ₂ : Vindobonien : sables de Beaugency |  e ₂ : Eocène inférieur détritique : argiles plastiques, sables et cailloutis à silex roulés |
|  m _{1b} : Burdigalien : sables et argiles de Sologne |  c _s : formations d'altération du crétacé : argile à silex |
|  m _{1a} : Aquitainien : calcaires lacustres de Beauce |  C ₄₋₆ : Craie sénonienne |

Figure 1.2 : Carte géologique de la Petite Beauce.
(d'après les cartes géologiques au 1/320.000^{ème} de Bourges et Paris).

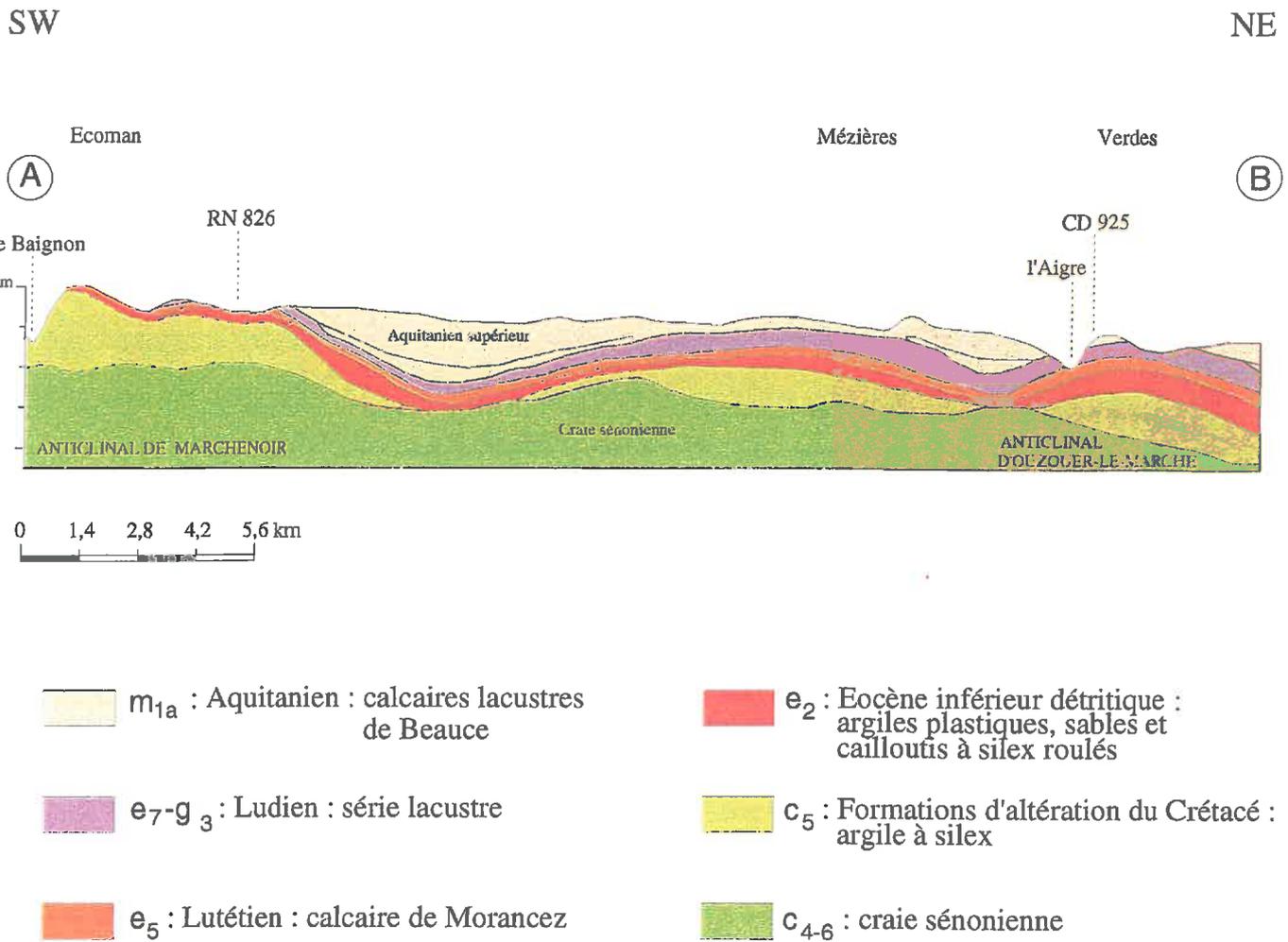


Figure 1.3 : Coupe géologique au niveau de l'anticlinal d'Ouzouer-le-Marché
(d'après la carte géologique au 1/50.000ème de Cloyes-sur-le-Loir)

1.2). Ces formations ne sont pas visibles sur la coupe (figure 1.3). Selon Gigot (1973), ces formations, d'origine fluviatile, ravinent le calcaire aquitain et suivent des chenaux orientés Est-Ouest. Elles peuvent être traversées localement par des argiles vertes, grises, bleues ou blanches. Deux faciès ont été identifiés : argile sableuse bleue ou ocre et sable fin jaune plus ou moins pur. Vers Bricy, ces formations atteignent 22 mètres d'épaisseur, mais elles s'amincissent rapidement vers l'Est jusqu'à atteindre 1 à 2 mètres pour disparaître (Gigot, 1973).

Des **formations limono-argileuses à argilo-limoneuses quaternaires** recouvrent de façon quasi 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 (Arrouays *et al.*, 1989). Ces formations, qui ne sont pas visibles sur les documents présentés, sont limono-argileuses à argilo-limoneuses en surface, de couleur brun-jaune à brun-rouge et peu à non calcaire. Sous ces formations, les calcaires de Beauce sont **altérés** de diverses façons (Gigot, 1973). L'altération se fait soit par **dissolution superficielle**, cas fréquent sur les calcaires durs, soit par **cryoclastie**. Le calcaire est alors fragmenté dans sa partie superficielle en éléments anguleux (cailloux ou blocs) restés sur place ou peu déplacés.

III. HYDROGEOLOGIE

III-1 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique actif de la Petite Beauce est **très limité** (figure 1.4). Les cours d'eau beaucerons sont pour la plupart des **niveaux de débordement** de l'aquifère. De ce fait, ils évacuent le débit de l'aquifère en ses limites et il n'existe que peu ou pas d'eau de ruissellement en raison de la perméabilité élevée des sols (Mégnyen, 1976 ; Mégnyen et Desprez, 1973). La largeur des vallées est relativement importante, mais elles sont **très peu marquées** (la Conie, les Mauves). Le fond est plat et marécageux, d'où le développement de formations tourbeuses. En amont, les cours d'eau sont prolongés par les vallées sèches fossiles (Mégnyen, 1976). Elles sont nombreuses en Petite Beauce et les écoulements temporaires qui les suivent s'infiltrent le plus souvent dans le thalweg avant d'atteindre le cours d'eau permanent. Elles sont peu profondes, aux flancs arrondis et au fond caillouteux. Ces vallées souvent dissymétriques ont été façonnées pendant les périodes froides du quaternaire (Serre, 1980), périodes pendant lesquelles le réseau hydrographique aurait été plus important.

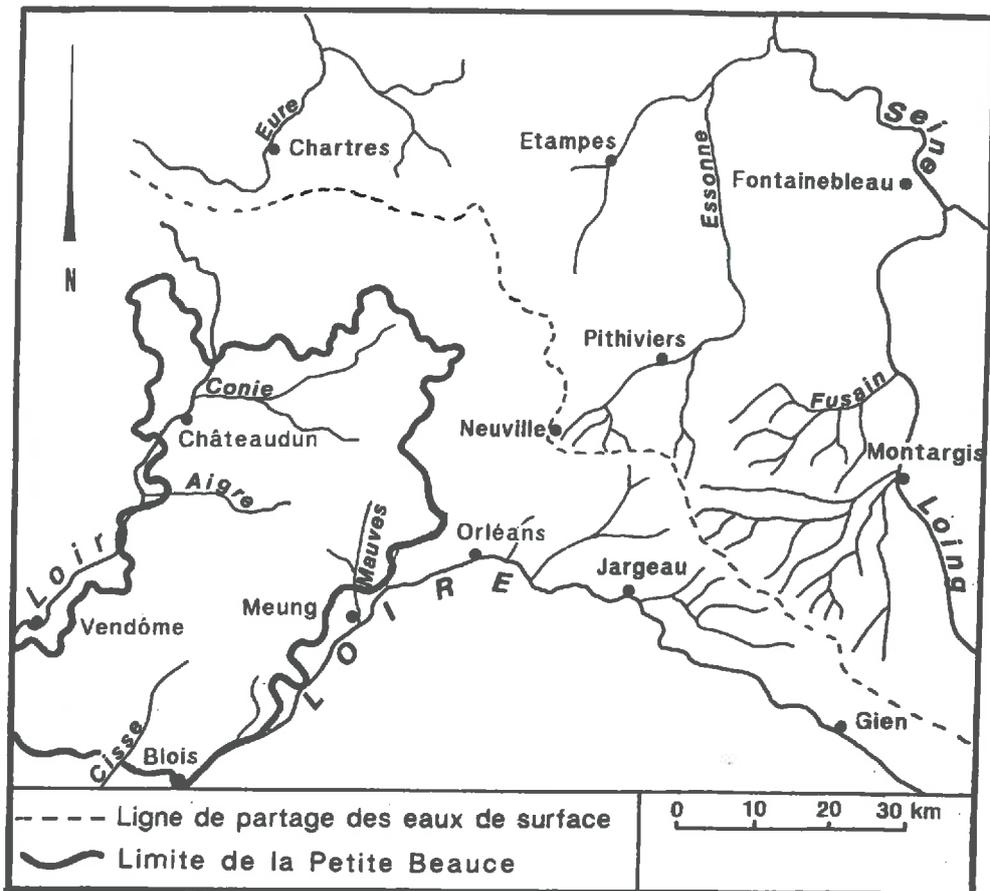


Figure 1.4 : Représentation du réseau hydrographique de la Petite Beauce.

III-2 Karstification

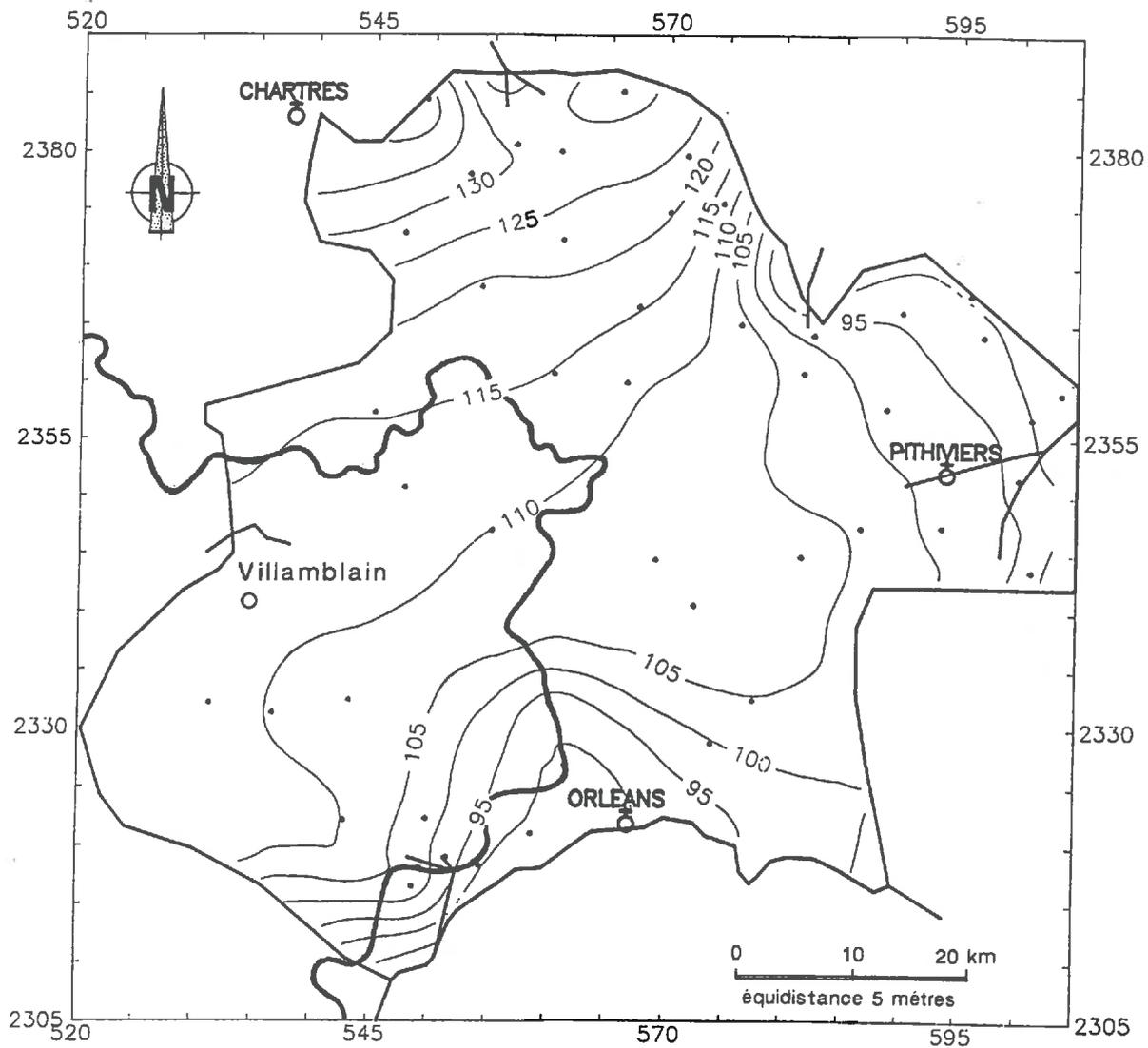
En Petite Beauce, les dépressions sont liées au réseau hydrographique ou aux phénomènes karstiques. Le calcaire de Beauce au sens large est **très karstifié** et présente de nombreuses morphologies de dissolution (dolines, cuvettes, cavités, gouffres...) notamment en bordure de la formation burdigalienne (Lorain, 1973). Ceci donne au calcaire de Beauce un caractère **très perméable**. Les gouffres restent généralement, par leur fond, en liaison avec le réseau hydrographique souterrain (Serre, 1980). Les dolines sont de dimensions variables, entre 10 et 50 m de diamètre et parfois davantage. A noter que des argiles brun-rouge à gros grains de quartz, tapisseraient presque toujours les dépressions d'origine karstique (Fedoroff *in* Gigot, 1973).

III-3 Hydrologie

A l'échelle régionale, le réservoir aquifère correspond aux dépôts compris entre l'**Eocène moyen** et l'**Aquitainien supérieur** (Desprez, 1973). La nappe des calcaires de Beauce est un aquifère **libre** et **non alluvial**. Seules la région du Gâtinais (partie Est de la formation) et la forêt d'Orléans présentent une **nappe captive** en relation avec des formations imperméables sus-jacentes. Son épaisseur moyenne est de 60 mètres (Lorain, 1973). C'est un des **plus important** aquifère de France. Le drainage de cet aquifère se fait essentiellement par les vallées périphériques et localement par déversement dans d'autres aquifères (Mégnyen, 1976).

En Petite Beauce, la surface piézométrique de l'aquifère est comprise entre 12 et 20 mètres de profondeur (cote NGF comprise entre 105 et 115 m) (figure 1.5). La **fissuration** joue un rôle primordial sur les qualités productives de l'aquifère (Manivit, 1982). En zones très fissurées, les forages peuvent fournir des débits de 150 m³/h à 200 m³/h. L'analyse des variations piézométriques de l'aquifère montre un **déphasage** entre l'occurrence des événements pluvieux importants et la remontée de la nappe et ceci proportionnellement à sa profondeur. De plus, l'amplitude annuelle de l'aquifère est **amortie** avec la profondeur (Mégnyen, 1976). Les variations pluriannuelles étudiées à Toury (forage de la sucrerie) par Mégnyen (1976) pour la période 1890-1972 ont été complétées par des données fournies par la DIREN Centre pour la période 1972-1993. Le graphique présenté (figure 1.6) montre des variations de **périodicité différentes**. Une variation **cinquantenaire** dont l'amplitude est de l'ordre de **8 m** (1906-1952). Une série de variations dont la période varie de **10 à 15 ans** avec une amplitude de **1 à 3 m**. Au vu de ces résultats, le faible niveau piézométrique de l'aquifère pour la période actuelle correspondraient à un faible niveau cinquantenaire, les pompages abondants ne feraient qu'accentuer cette tendance.

Les analyses chimiques et isotopiques ont montré que la nappe est **stratifiée**, le comportement hydrodynamique étant différent en fonction de la profondeur (Jordana, 1992).



**Figure 1.5 : Surface piézométrique de l'aquifère des calcaires de Beauce.
(en gras : délimitation de la Petite Beauce) (d'après Jordana, 1992).**

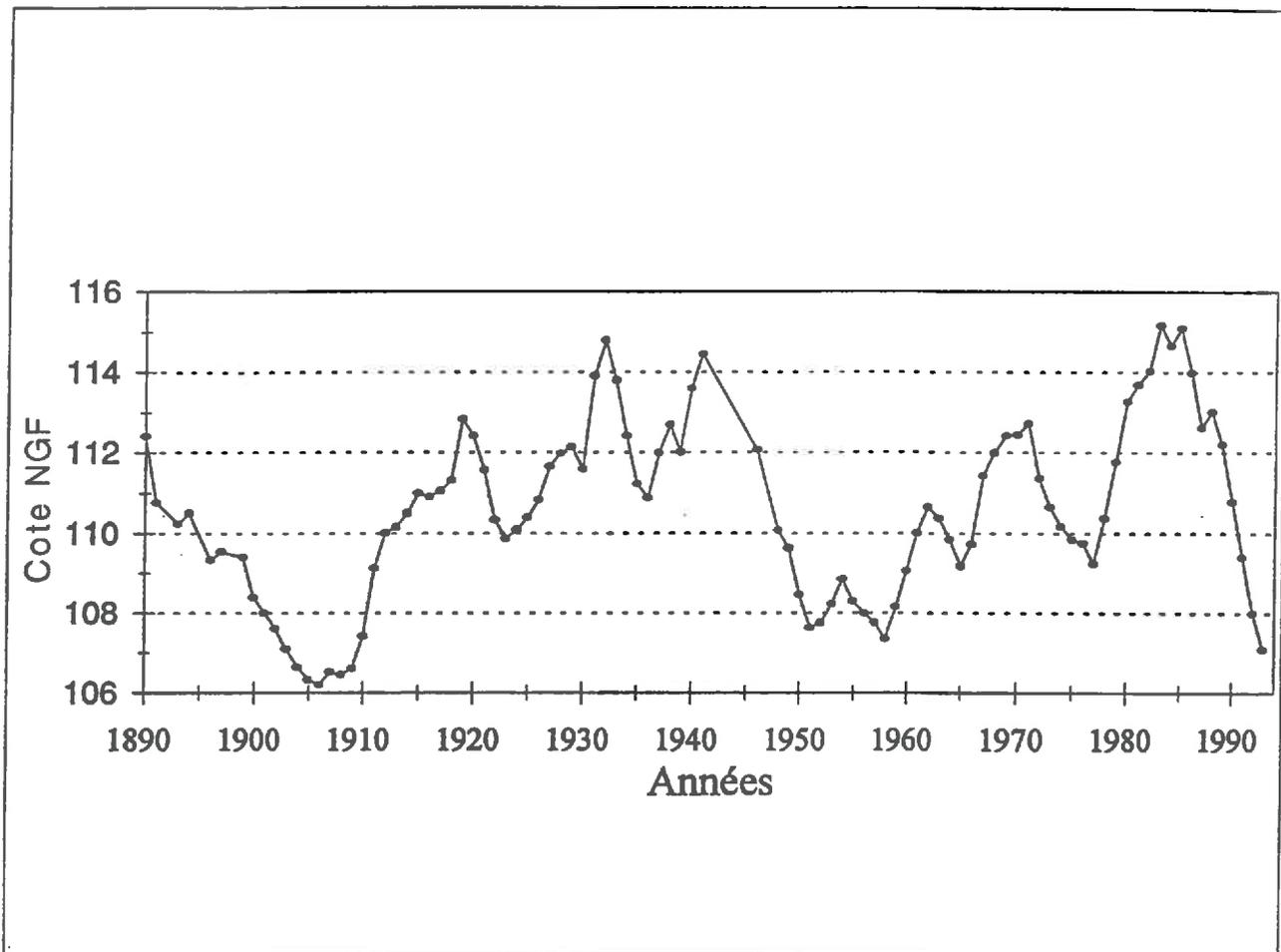


Figure 1.6 : Variations de la cote NGF de la nappe des calcaires de Beauce à Toury entre 1890 et 1893.

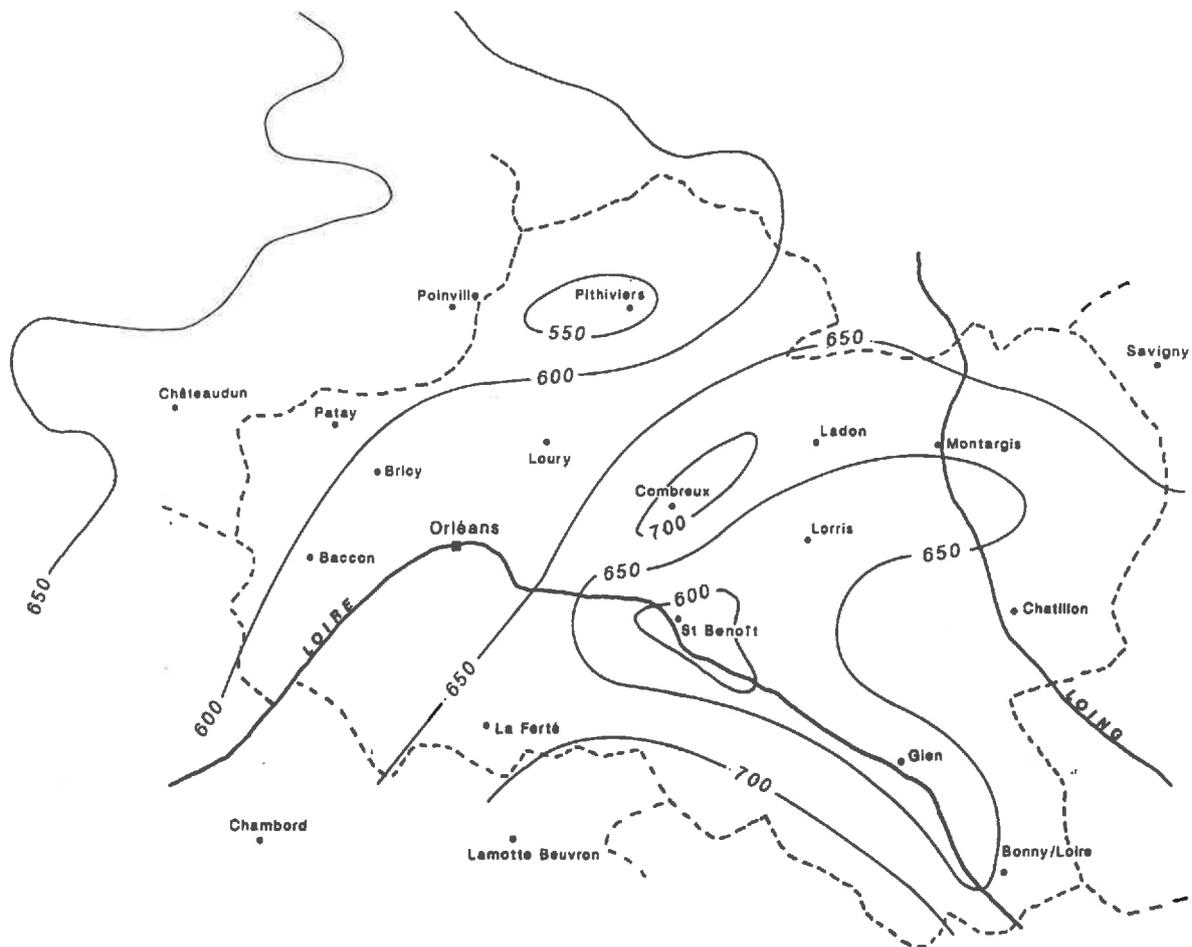


Figure 1.7 : Carte des isohyètes de la Petite Beauce et du Loiret.
(Normales annuelles entre 1946 et 1986 ; équidistance : 50 mm)

Mois	Normale mensuelle (mm)	Minimum		Maximum	
		Valeur (mm)	Année	Valeur (mm)	Année
Janvier	52	10	1976	115	1955
Février	48	1	1959	119	1958
Mars	49	1	1953	110	1979
Avril	45	6	1955	121	1983
Mai	62	10	1959	148	1985
Juin	51	1	1976	108	1957
Juillet	48	2	1952	105	1958
Août	50	4	1961	111	1963
Septembre	51	8	59-57	143	1965
Octobre	54	8	69-85	181	1960
Novembre	59	10	1953	137	1969
Décembre	56	2	1971	111	1978
Année	625				
Hiver	318				

Tableau 1.1 : Précipitations à la station de Bricy.
Normales mensuelles et valeurs extrêmes en mm pour la période 1946-1986. (D'après R.Gonzalez, 1991)

Ces mêmes analyses ont montré que les eaux de l'aquifère ont localement des teneurs en nitrate **élevées**. Des teneurs comprises entre **60 et 80 mg/l** de NO_3^- sont **fréquentes**. Les nitrates actuellement présents dans l'aquifère résulteraient d'une accumulation sur une période de 5 à 30 ans (CORPEN, 1985).

IV. CLIMAT

La région est située dans une zone climatique **tempérée** mais où l'influence océanique est encore nette (Hubert, 1983). Toutes les données présentées dans cette étude sont extraites des bulletins de la station de la Météorologie Nationale d'Orléans-Bricy (X=552 km, Y=2337 km, Z=125 m en coordonnées Lambert II étendu) pour la chronique 1946-1986.

Le module pluviométrique moyen interannuel est estimé à **625 mm** (moyenne sur 41 ans de 1946 à 1986). Les précipitations sont faibles et réparties de façon homogène dans le temps (échelle annuelle) et l'espace. Les mois de Février à Avril puis de Juin à Septembre restent légèrement déficitaires (total moyen mensuel inférieur à la moyenne mensuelle annuelle) par rapport aux mois de Mai et d'Octobre jusqu'à Janvier qui présentent un **léger excédent** (Gonzalez, 1991). Mais les valeurs extrêmes nous rappellent que ces résultats ne sont que des moyennes statistiques. Les valeurs réelles mensuelles peuvent s'en écarter de manière excédentaire ou déficitaire avec des amplitudes importantes (tableau 1.1) (figure 1.7).

La température moyenne annuelle est de **10,5°C**. Le mois le plus froid est celui de Janvier. Le mois le plus chaud est Juillet. La période durant laquelle les températures mensuelles sont supérieures à la moyenne annuelle s'étend de Mai à Octobre.

L'ensoleillement est un facteur climatique essentiel qui intervient dans la plupart des méthodes de calcul de l'évapotranspiration. Il est en moyenne de **1800 heures par an**, soit une valeur moyenne mensuelle de **149 heures**. Les maxima d'ensoleillement sont enregistrés du mois d'Avril au mois de Septembre alors que les valeurs les plus faibles se situent entre les mois d'Octobre et de Mars.

La quantité d'eau moyenne perdue annuellement par évapotranspiration potentielle (ETP), calculée par la formule de Turc, est de **452 mm**. Cette valeur est inférieure à la moyenne annuelle en France qui est de 500 mm. La différence entre le module pluviométrique interannuel et l'ETP est par conséquent de **173 mm**.

V. LES SOLS

Les sols de Petite Beauce situés dans le département du Loiret ont été cartographiés à l'échelle de 1/250 000 lors de l'établissement de la Carte des Paysages Pédologiques du Loiret (Arrouays et *al.*, 1989). Par la suite, une zone de 3500 hectares a été l'objet d'une cartographie à l'échelle de 1/10 000 (Isambert et Duval, 1992). Parallèlement, des études détaillées ont été réalisées dans le cadre de mémoires de DEA (Ould-Mohamed, 1991 ; Bourennane, 1992).

Il ressort de ces différentes études que les sols de Petite Beauce sont développés dans une couverture **limono-argileuse à argilo-limoneuse** de 0,50 m à 1 m d'épaisseur et d'âge quaternaire. Les teneurs en argile de la formation limono-argileuse varient en surface de **27 à 33%**. Les observations sur fosses montrent :

- un profil calcaire nettement **différencié** avec une décarbonatation superficielle et des réprécipitations carbonatées en profondeur. Même lorsque le LA est totalement décarbonaté en surface, le complexe d'échange demeure **saturé**.

- une **faible variation** de la teneur en argile (après décarbonatation) avec la profondeur (de l'ordre de quelques %).

- à la base de la formation limono-argileuse, un **encroûtement calcaire** est localement présent. Il soulignerait une discontinuité pédogénétique avec les matériaux sous-jacents.

Les sols développés dans la couverture limono-argileuse sont des Calcisols (référence : RP, Baize et Girard, 1992), ou des Cambisols eutriques (référence FAO-Unesco, 1989).

Sous la formation limono-argileuse, on rencontre généralement des matériaux calcaires altérés par **cryoturbation**. Sur le site d'étude de la carrière des Sapins Dousset (Ould-Mohamed, 1991), les matériaux calcaires cryoturbés sont organisés en **poches**. Il existe plusieurs générations de poches calcaires, imbriquées les unes dans les autres de manière très hétérogène :

- des poches colorées ; soit d'apparence limoneuse, avec de nombreuses réprécipitations calcaires et un débit lamellaire ; soit de couleur plus vive, et situées en général sous les premières.

- des poches très calcaires, toujours chargées en cailloux calcaires, pouvant remonter jusqu'à la base du limon argileux.

A la base des matériaux cryoturbés, on retrouve les matériaux du **substratum calcaire**. Ils sont essentiellement représentés par deux faciès :

- un calcaire pulvérulent, plus ou moins gris, friable et d'aspect "marneux". Après décarbonatation, ces matériaux présentent une granulométrie essentiellement argileuse.

- un calcaire dur, fragmenté, blanc à jaunâtre, très difficilement pénétrable à la sonde.

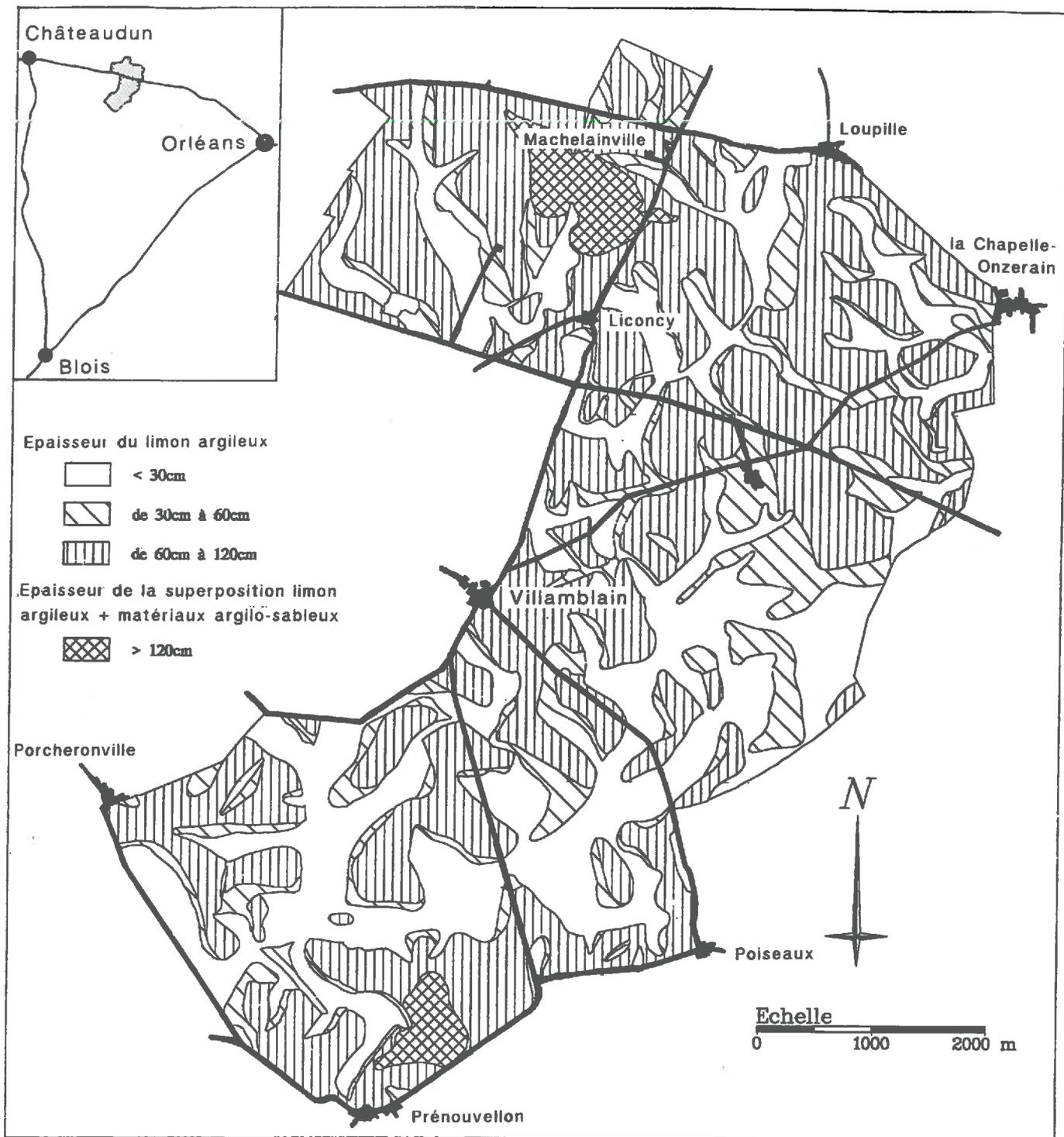


Figure 1.8 : Epaisseur des formations limono-argileuses évaluée lors de la cartographie au 1/10.000^{ème} sur 3500 ha. (d'après Isambert et Duval, 1992).

Les sols varient essentiellement par l'épaisseur des horizons limono-argileux à argilo-limoneux (figure 1.8) et secondairement par la teneur en éléments grossiers calcaires et l'épaisseur des matériaux cryoturbés sous-jacents. Devant la **faible différenciation** des sols et la topographie peu marquée de la Petite Beauce, un modèle de répartition des sols proposé par Isambert (Isambert et Duval, 1992) (figure 3.1) fait actuellement l'objet de travaux de recherche (Bourennane, 1992). Selon ce modèle, les sols se répartiraient suivant une toposéquence fréquemment rencontrée sur la carte pédologique à 1/100 000 de Châteaudun (Isambert, 1984) :

- sur les versants **Ouest et Sud**, de pente 1 à 2%, les sols sont majoritairement **calcaires** dès la surface. La présence de nombreux cailloux calcaires témoignent de la faible profondeur du substrat. Le travail du sol contribue à l'enrichissement de l'horizon superficiel en cailloux calcaires,

- en **haut** de ces mêmes pentes, de minces bandes (50 m environ) sont occupées par des sols développés dans des matériaux calcaires dont le complexe est **saturé en calcium**, mais très souvent **non calcaire**,

- sur les versants **Nord et Est**, les sols sont développés dans les formations limono-argileuses à argilo-limoneuses **non calcaires** avec généralement présence à leur base de matériaux cryoturbés.

D'une façon générale, les sols présentent des caractéristiques agronomiques très favorables. Le ressuyage naturel est rapide en Petite Beauce. Les sols calcaires et calciques possèdent une **stabilité structurale élevée** mais leur épaisseur limitée induit une **faible réserve hydrique** (Arrouays et *al.*, 1989). C'est pourquoi ces sols nécessitent une irrigation pour les cultures d'été. En fait, la sécheresse de ces dernières années et des objectifs de rendements élevés ont entraîné une **irrigation quasi généralisée** aussi bien au printemps pour les céréales, que durant l'été pour les maïs.

VI. CONTEXTE AGRONOMIQUE

Au cours des quarante dernières années, la Petite Beauce a connu une véritable révolution à la suite de nombreux **remembrements** et grâce au développement de la mécanisation et de l'irrigation. Les haies ont complètement disparu, ainsi que la plupart des bois. Seuls persistent aujourd'hui quelques petits bois de pins noirs d'Autriche.

On produit, par ordre de surface emblavée décroissante, du blé tendre, du blé dur, de l'orge (de plus en plus d'escourgeon), du maïs et en augmentation constante, du colza, du tournesol et des pois fourragés sans oublier la betterave à sucre (sucreries d'Artenay et de Toury).

Quatre communes de Petite Beauce (Villamblain, St Pérvy, Tournoisis et Villeneuve sur Conie) ont fait l'objet d'une enquête agronomique (Nicoullaud *et al.*, 1994). Il ressort de cette enquête que les cultures les plus fréquentes sur ces quatre communes sont essentiellement : le **maïs**, le **blé tendre** et le **blé dur**, puis secondairement le tournesol, le pois fourrager, l'orge et enfin la betterave (tableau 1.2). L'éloignement des communes étudiées aux sucreries (Toury et Artenay) explique la faible proportion de culture de betteraves. D'autres cultures, comme le colza ou le seigle ont été rencontrées mais elles n'occupent qu'un très faible pourcentage de la surface agricole utile (SAU).

La surface cultivée pour l'ensemble des quatre communes représente environ **90%** de la surface totale. La surface moyenne d'une exploitation est de l'ordre de **80 ha** avec les exploitations les plus petites sur la commune de Tournoisis (52 ha). La surface moyenne la plus élevée est enregistrée pour la commune de Villeneuve sur Conie (113 ha).

Pour le blé, quelles que soient les exploitations, les techniques de préparation du lit de semence restent très voisines. Les semis s'effectuent en général juste après le labour. Les dates de semis s'étalent de **mi-octobre** à **début novembre** (Terrasse, 1993). Les quantités d'azote apportées varient de **180 à 220 kg/ha** pour un objectif de rendement qui s'étend de **60 qx/ha** en sec à **90 qx/ha** en irrigué (résultats enquête Chambre d'Agriculture). L'irrigation est presque généralisée.

Pour le maïs, les labours sont effectués de novembre à la mi-décembre. Les reprises sont réalisées avant semis, la plupart du temps à l'aide de herse puis d'outils animés. Les semis se déroulent principalement **mi-avril**. La densité des semis varie de 100 000 à 110 000 plants par hectare (Terrasse, 1993). Les quantités d'azote apportées varient de **180 à 200 kg/ha** pour des objectifs de rendements voisins de **110 qx/ha** (résultats enquête Chambre d'Agriculture). Les autres apports sont en moyenne de l'ordre de 133 kg/ha pour les phosphates et de 107 kg/ha pour la potasse. L'irrigation est **toujours** employée, à titre d'exemple pour la période juin-juillet 1992, elle a été de **80 à 140 mm** d'eau.

VII. CONCLUSION DU CHAPITRE 1

Les caractéristiques du milieu physique font de la Petite Beauce un **milieu fragile**. Cette fragilité est essentiellement liée à une couverture de sol de faible épaisseur reposant sur un massif calcaire **très filtrant**. Le renouvellement de l'aquifère étant directement lié au **drainage hivernal des sols**, la qualité de l'eau est alors en dépendance étroite avec les **pratiques agricoles** en matière de fertilisation et de traitements phytosanitaires.

Le développement de l'irrigation ces dix dernières années a **considérablement**

modifié le bilan hydrique des sols et de l'aquifère. Il est d'ailleurs tout à fait probable que la date de drainage hivernal des sols varie très sensiblement en fonction de la conduite de l'irrigation, celle-ci pouvant induire des états hydriques des sols **très variables** au début de l'hiver.

Cultures	Communes								Total
	Villamblain		St Pérayv.		Villeneuve/C.		Tournois		
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	
Mais	912	38	406	20.7	607	38.3	568	35.5	2493
Blé tendre	686	28	630	32	449	28.3	586	36.6	2351
Blé dur	526	22	567	29	418	26.4	203	12.7	1714
Orge	38	1.5	46	2.3	63	4	38	2.4	185
Pois	110	4.6	51	2.6	46	2.9	68	4.2	275
Tournesol	113	4.7	256	13	0	0	106	6.6	475
Betterave	0	0	0	0	0	0	28	1.7	28
SAU Totale (ha)	2385	98.8	1956	99.6	1583	99.9	1597	99.7	7521
Superficie totale Commune (ha)	2600	-	2396	-	1797	-	1694	-	8487
Surface totale cultivée	91.7	-	81.6	-	88.1	-	94.3	-	<i>Moyenne</i> 88.6
Surface moyenne d'une exploitation	88.3	-	70	-	113	-	51.5	-	80.7
Surface irrigable	2229	93.5	1146	58	1408	89	1212	75	78.9
Nombre d'exploitation par commune	27	-	28	-	14	-	31	-	25

Tableau 1.2 : Occupation du sol de quatre communes de Petite Beauce

CARACTERISTIQUES DU SECTEUR D'ETUDE

I. INTRODUCTION

L'objectif de ce chapitre est de décrire brièvement les **principales caractéristiques** du secteur d'étude choisi. Nous pourrons ainsi mieux cerner la **représentativité** du secteur étudié par rapport à la région naturelle de la Petite Beauce. Nous aborderons successivement la situation géographique, le mode d'occupation des sols, la géologie et l'altimétrie du secteur d'étude. La présentation des **sols** du secteur sera abordée de façon détaillée dans le chapitre 3.

Le choix de ce secteur répond à un critère d'**échantillonnage représentatif** des différents types de **situations pédologiques** rencontrées dans la carte au 1/10 000^{ème} (Isambert et Duval, 1992) et des **pratiques culturelles** (cultures irriguées ou non).

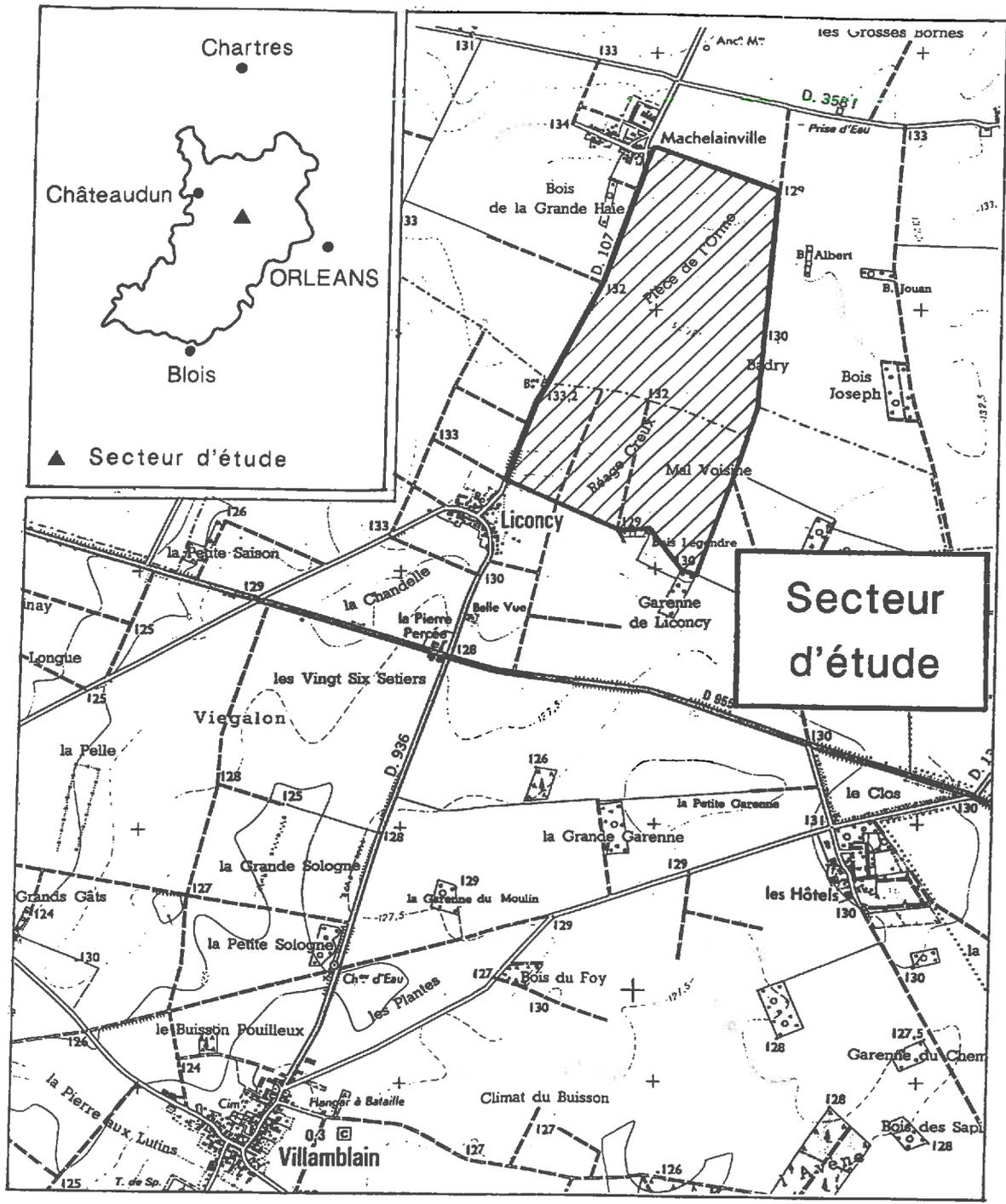


Figure 2.1 : Localisation du secteur d'étude.

II. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Le secteur d'étude est **localisé** aux limites des départements du Loiret et de l'Eure-et-Loir, à mi-chemin entre Orléans et Châteaudun, sur les communes de Villamblain et Péronville, aux lieux-dits Liconcy et Machelainville (Carte IGN au 1/25000 d'Ouzouer-le-Marché) (figure 2.1). Il couvre une **centaine d'hectares** et fait partie d'un autre secteur d'étude plus grand, d'environ 3000 ha, qui est actuellement l'objet d'un programme d'études agronomiques, hydrologiques et pédologiques menées conjointement par la DIREN Centre (Direction Régionale de l'ENvironnement), la Chambre d'Agriculture du Loiret, l'Université d'Orléans et l'INRA d'Orléans.

Les caractères morphologiques, agronomiques et pédologiques généraux sont ceux de la Petite Beauce. Le relief y est faiblement ondulé, les pentes des versants sont faibles (0,5 à 2%) (Bourennane, 1992). L'altitude varie sur le secteur de **127 à 133 m**. Le paysage de champs ouverts s'organise autour de structures peu marquées (thalwegs orientés nord-est sud-ouest). Le secteur étudié est totalement couvert par la carte géologique de Patay au 1/50 000 (Gigot et Fedoroff, 1973).

III. MODE D'OCCUPATION DES SOLS

Le secteur d'étude est d'une superficie totale de **101 ha**. Il est divisé en **13 parcelles**. La parcelle la plus grande (environ 20 ha) se situe dans la moitié Nord du secteur. La plus petite (environ 0,85 ha) se situe au Sud du secteur.

L'occupation du sol pour les années 1991, 92 et 93 fait apparaître une très nette **dominance** des cultures de **céréales** (Blé, Orge, Seigle) (figure 2.2). La rotation classique des cultures est représentée par la succession "**céréales-légumineuses**" (figure 2.2). Les autres cultures sont assez variées et sont représentatives de celles rencontrées en Petite Beauce. Notons aussi la présence d'une parcelle occupée par une culture d'arbustes horticoles dans le Sud du secteur. Une seule parcelle a été mise en jachère sur les trois années d'étude. La proportion des cultures de maïs sur le secteur d'étude est différente de celle rencontrée sur les quatre communes précédemment étudiées (maïs prédominant). Ceci s'explique par le **faible** pourcentage de **surface irrigable** sur le secteur (environ 23%). Seules quatre parcelles le sont et la culture de maïs, nécessitant une irrigation importante, n'est rencontrée que sur ces parcelles (figure 2.2). Cette faible proportion de surface irrigable est liée à la nature des sols sur le secteur. La proportion des différents types de sols est en effet, comme nous le verrons plus loin, **différente** de celle rencontrée en Petite Beauce. Les quantités d'eau apportées par irrigation sont proches des valeurs rencontrées sur les quatre communes de référence. Elles

sont en moyenne de **90 mm** pour les céréales et de **150 à 200 mm** pour le maïs (Verbèque, Communication orale).

IV. GEOLOGIE

Un sondage de **30 m** de profondeur a été réalisé dans la partie centrale du secteur d'étude dans le calcaire de Beauce aquitainien. Une **coupe géologique** a été établie par la DIREN (Jordana, 1992). Elle met en évidence une alternance de **bancs calcaires** de dureté et de compacité variable et la présence de niveaux plus **argileux** (figure 2.3).

Une diagraphie gamma-ray a été réalisée sur ce sondage. La radioactivité naturelle des formations est essentiellement liée à la concentration en ^{40}K présent dans les minéraux argileux en position interfoliaire. La diagraphie gamma-ray réalisée corrobore la coupe géologique en révélant la présence d'un premier niveau calcaire plus argileux à environ 10 mètres de profondeur et d'un second plus profond, entre 21 et 28 mètres. Ces **deux niveaux plus argileux** sont séparés par un calcaire blanc. Toutefois, ces niveaux plus argileux qui n'atteignent jamais des taux d'argile très élevés, seraient moins perméables que les autres niveaux calcaires et possèderaient une **micro-porosité** pouvant retenir en **plus grande quantité** l'eau et les solutés. Ce type de situation est fréquemment observé en Petite Beauce. Des forages identiques, effectués sur la commune de Villamblain et les communes avoisinantes, ont montré une succession similaire (Jordana, 1992). Enfin, lors de la réalisation du sondage, la surface piézométrique était à **21 m** c'est-à-dire au premier niveau des calcaires argileux ocre.

V. ALTIMETRIE

Les données altimétriques sont issues de mesures effectuées lors du repérage topographique en x,y,z du secteur d'étude. La centaine de valeurs recueillies nous a permis d'en étudier la distribution. La valeur maximale est de **132,3 m** et la valeur minimale de **127,5 m**. La moyenne est de **130 m** et l'écart-type de **1,2 m**. L'analyse de l'histogramme de fréquence montre que la distribution est **unimodale**. La moyenne, la médiane et le mode ont sensiblement les mêmes valeurs (figure 2.4) : ceci caractérise une distribution symétrique. Un test de Khi2 permet de **rejeter** l'hypothèse d'ajustement à une loi normale au seuil de 5% pour les données altimétriques. Le jeu de données a été utilisé pour établir une **carte des altitudes** en isovaleurs.

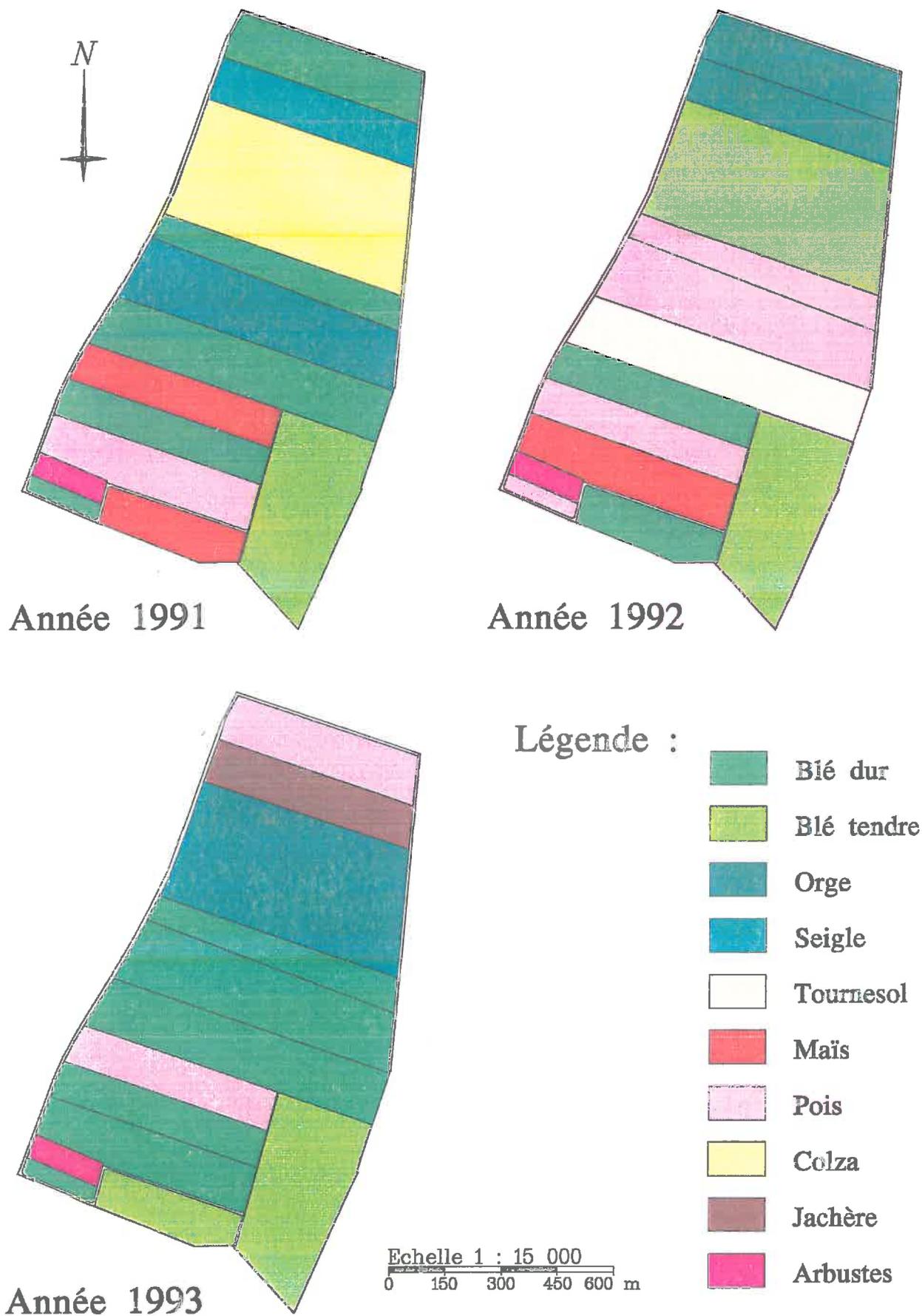


Figure 2.2 : Occupation du sol en 1991, 1992 et 1993.

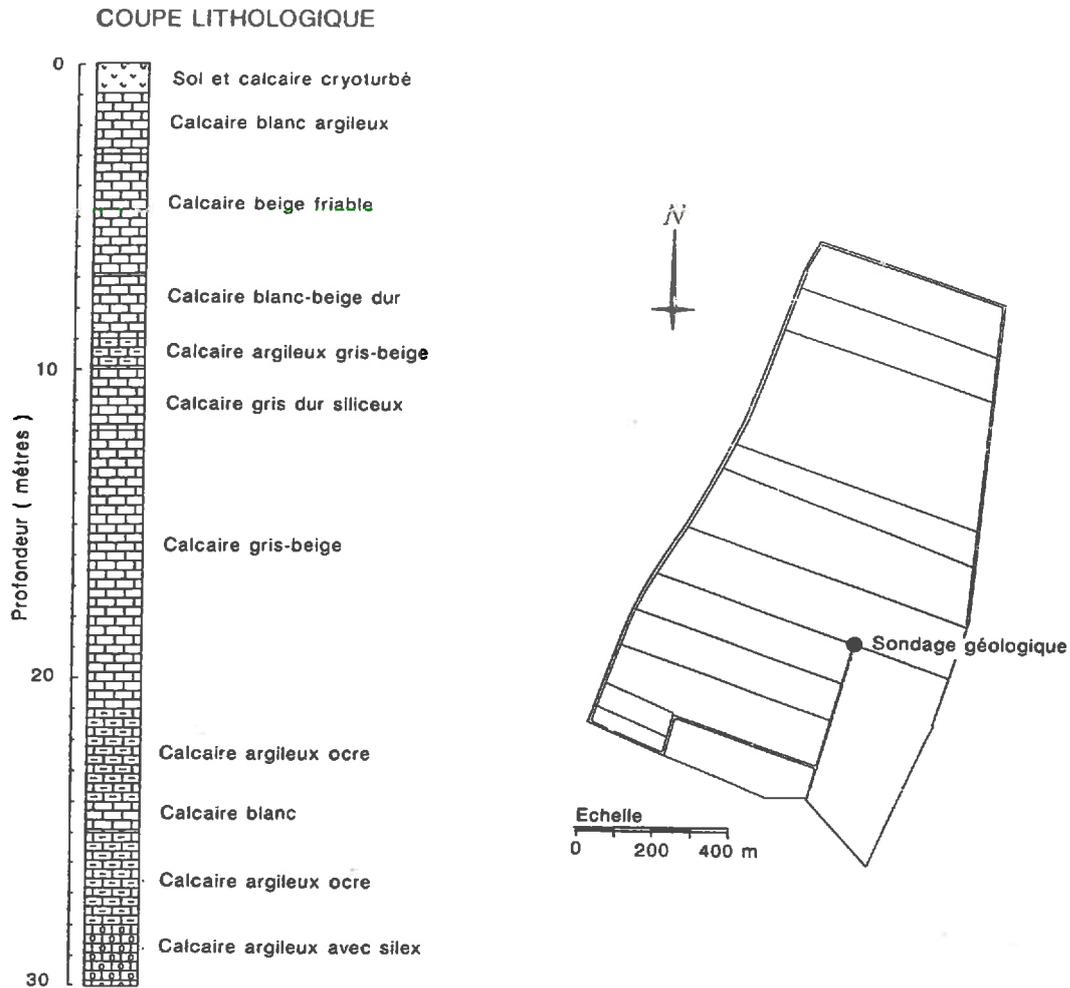


Figure 2.3 : Localisation et description du sondage géologique profond (30 m).

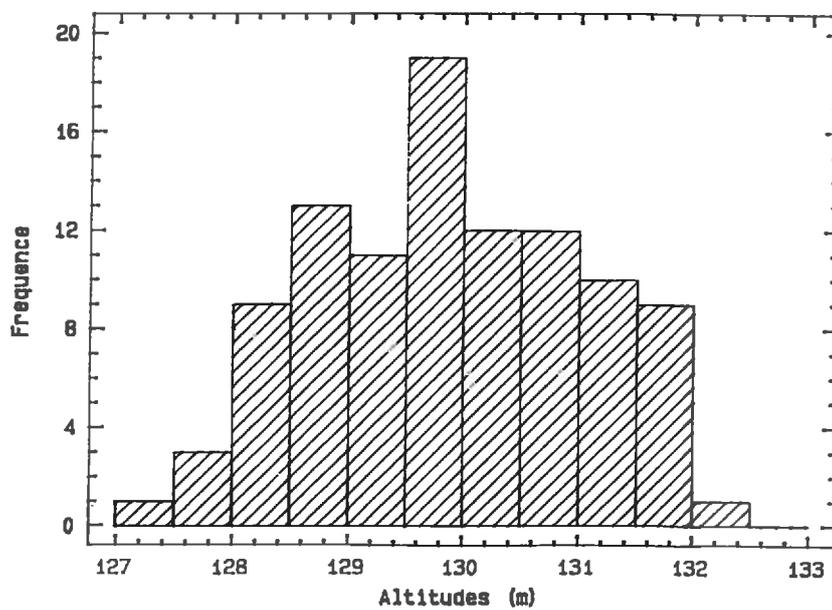


Figure 2.4 : Histogramme de fréquence des valeurs d'altitude du secteur d'étude.

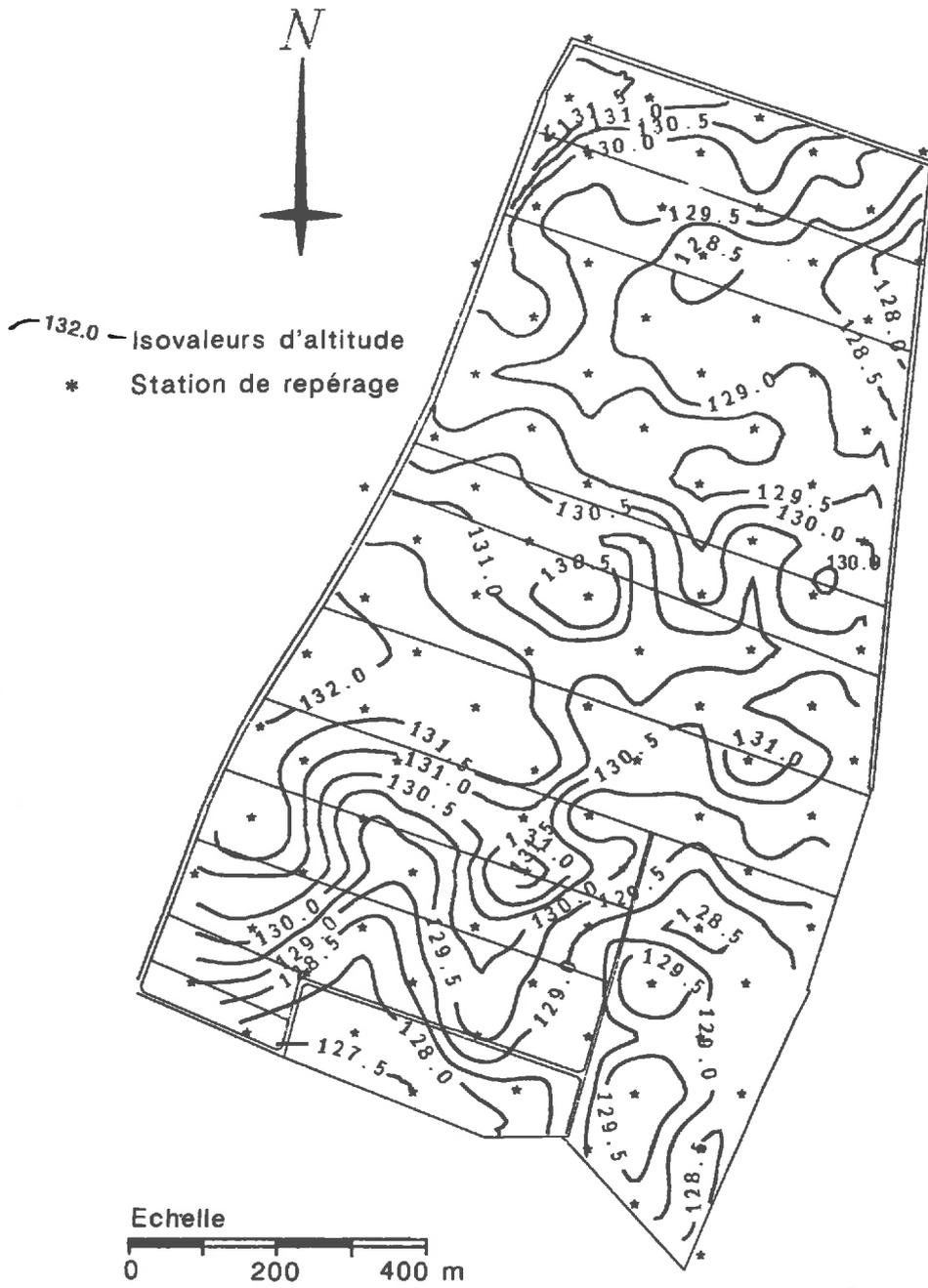


Figure 2.5 : Carte des isovaleurs d'altitude du secteur d'étude.
 (équidistance : 0,5 m)

Les mesures d'altitude ont été réalisées à l'aide d'un théodolithe de chantier autoréducteur (Wild RDS). La mesure d'altitude en un point s'effectue en visant ce point à partir d'une station d'altitude connue. Puis, de manière à réduire les erreurs, on procède à une mesure inverse, c'est-à-dire que l'on vise la station à partir de point à mesurer. Cette technique est appelée " le double retournement". Par la suite, après un nombre de mesure que l'opérateur juge nécessaire et qui dépend surtout de la position des points à mesurer sur le terrain, on vise, à partir du dernier point à mesurer, une borne de cote connue, de manière à comparer l'altitude obtenue lors de cette dernière visée à l'altitude connue de la borne. L'erreur de mesure relative à l'altitude que nous nommerons "erreur de fermeture" est de l'ordre de 20 cm.

Une carte d'altitude en isovaleurs a été obtenue en interpolant les valeurs expérimentales d'altitude mesurées sur le secteur. Cette interpolation a été réalisée par la méthode TIN (cf. chapitre 4) (figure 2.5). Les altitudes varient entre 133 m, au niveau de la borne IGN à l'Ouest du secteur, et 127,5 m à l'extrême Sud. La carte montre la présence d'une **dépression** assez étendue au **Sud** avec une orientation du vallon Sud-Sud-Ouest Nord-Nord-Est. Une autre dépression **moins marquée** se situe au **Nord** du secteur avec une orientation plutôt Est-Ouest. Le reste de la topographie présente une alternance de micro-dépressions et de zones convexes de faible importance en notant toutefois que la zone Nord du secteur est généralement plus élevée que la partie Sud. La morphologie générale du secteur d'étude est analogue à celle rencontrée en Petite Beauce où l'on observe un **modelé modéré** et une **orientation** générale des vallons **Nord-Est Sud-Ouest** (Isambert et Duval, 1992 ; Bourennane, 1992).

VI. PLUIE ET ETP

Les caractéristiques météorologiques du secteur d'étude ont été considérées comme **similaires** à celles mesurées à la station d'**Orléans-Bricy** située en Petite Beauce à une dizaine de kilomètres du secteur. Pour les années 1990 à 1993, les mesures de **pluie** et d'**ETP** sont présentées dans la figure 2.6.

L'ETP est une grandeur climatique qui définit le **pouvoir évaporant de l'atmosphère**. "On la définit comme l'évapotranspiration d'un couvert végétal bas, continu et homogène dont l'alimentation en eau n'est pas limitante et qui n'est soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique" (Pérarnaud et Raynal, 1991). L'ETP ne dépend que des **conditions météorologiques observées**. Elle est donc reliée de façon étroite aux éléments du climat : température, humidité, vent, rayonnement. De nombreux auteurs ont cherché à établir des expressions reliant l'ETP à ces éléments. Plusieurs méthodes peuvent être ainsi utilisées pour son calcul, citons notamment Thornthwaite (1948) et Turc (1961) qui proposent des formules résultant d'ajustements statistiques et Penman (1948), Bouchet (1964) et Brochet-Gerbier (1974 et 1977) dont les formalismes résultent d'un raisonnement physique basé sur le bilan énergétique sous certaines hypothèses.

Les valeurs d'ETP données par la station d'**Orléans-Bricy** (en mm) sont calculées par la formule de **Penman** dont le formalisme ne sera pas développé ici. L'avantage de cette formule est qu'elle est bien adaptée aux régions tempérées et sur des intervalles de temps de l'ordre de la **décade**.

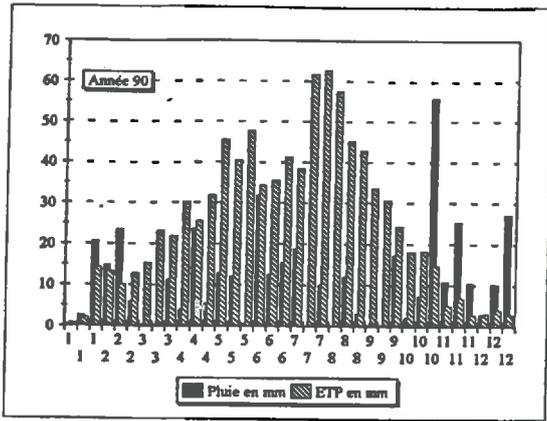


Figure 2.6a : Précipitations et ETP Penman pour l'année 1990

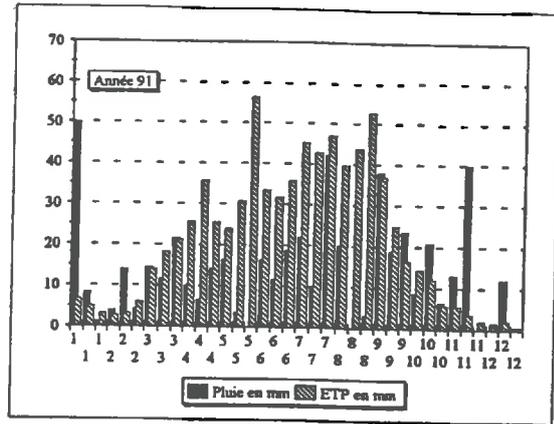


Figure 2.6b : Précipitations et ETP Penman pour l'année 1991

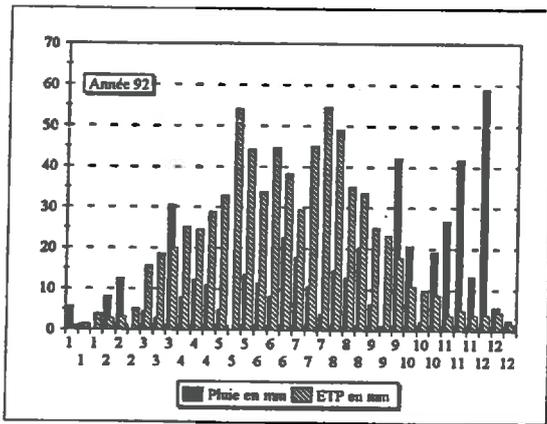


Figure 2.6c : Précipitations et ETP Penman pour l'année 1992

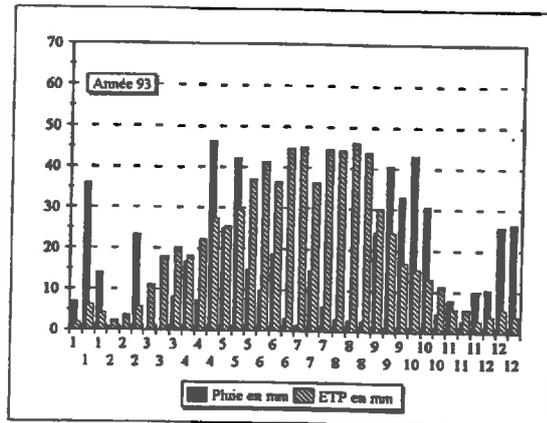


Figure 2.6d : Précipitations et ETP Penman pour l'année 1993

Figures 2.6 : Valeurs des pluies et de l'ETP (Penman) pour les années 1990 à 1993.

Les précipitations moyennes annuelles sont de **625 mm** (moyenne sur 41 ans). On constate que, pour toutes les années étudiées, les précipitations sont **inférieures** à la normale. Les années 1990 et 1992 montrent des **déficits importants** avec respectivement **413** et **479 mm**. Les années 1991 et surtout 1993 sont nettement **moins déficitaires** avec respectivement **507** et **563 mm** de pluie. D'une manière générale, les années considérées sont pluviométriquement déficitaires.

Les valeurs d'ETP Penman sont en moyenne de **763 mm** pour les années 1991, 1992 et 1993 (respectivement 776, 762 et 752 mm). Pour l'année 1990, l'ETP est nettement **plus élevée**, elle est de **918 mm**. Ces valeurs sont nettement plus élevées que l'ETP moyenne sur 41 ans calculée par la formule de Turc (452 mm).

Les forts déficits pluviométriques (jusqu'à **212 mm** en 1990) et les valeurs élevées d'ETP expliquent les **déficits systématiques** pour la période considérée des valeurs de Pluie-ETP. La période d'étude constitue donc une **période particulièrement déficitaire** en eau réellement infiltrée.

VII. CONCLUSION DU CHAPITRE 2

Le secteur d'étude présente des caractères qui sont **ceux** de la Petite Beauce (topographie, taille des parcelles, géologie de la zone non saturée et proximité de la nappe) alors que d'autres lui sont **spécifiques** (faible proportion de surface irrigable, et par voie de conséquence des surfaces occupées par le maïs). L'étude des caractéristiques pédologiques du secteur d'étude sera abordée de façon détaillée dans le chapitre suivant.

LES SOLS DU SECTEUR D'ETUDE

I. INTRODUCTION

L'étude effectuée par Ould-Mohamed (1991) à environ 2 km au sud-ouest du secteur a montré que l'on pouvait distinguer **trois ensembles de matériaux superposés**, le sol actuel se développant essentiellement dans un **matériau argilo-limoneux supérieur**. Ces trois ensembles ont déjà été évoqués plus haut (cf. chapitre 1) ; outre l'ensemble supérieur constitué par un matériau argilo-limoneux, on distingue un ensemble **intermédiaire** constitué de **matériaux calcaires cryoturbés** très hétérogènes dont la nature varie avec celle des calcaires qui ont été remaniés et, enfin, un ensemble **inférieur** qui correspond aux premiers **niveaux calcaires** non ou peu affectés par la cryoturbation.

Lors d'une étude cartographique au 1/10 000 (Isambert et Duval, 1992), il a été montré que les sols rencontrés sur le secteur d'étude correspondaient effectivement à la succession verticale décrite par Ould-Mohamed (1991) avec néanmoins deux situations **particulières** (figure 3.1) :

- en certaines zones du secteur d'étude et plus particulièrement au sud, les sols sont

peu épais et caillouteux et l'on n'observe pas les matériaux cryoturbés décrits par Ould-Mohamed (1991).

- au nord du secteur d'étude, les sols sont effectivement développés dans un matériau argilo-limoneux mais on rencontre en profondeur des **matériaux argileux à sables grossiers**.

Une prospection détaillée par sondages à la tarière a **confirmé** les observations effectuées lors de la cartographie au 1/10 000 et a permis de préciser la nature de la couverture pédologique du secteur. Des fosses ont été ouvertes en plusieurs endroits pour décrire et analyser les différentes successions verticales rencontrées sur le secteur. Des analyses effectuées sur les sondages à la tarière ont aussi été utilisées pour préciser la nature des **variations latérales** au sein du matériau argilo-limoneux recouvrant l'ensemble du secteur d'étude et au sein des matériaux argilo-sableux à sables grossiers mis en évidence localement lors de la cartographie au 1/10 000.

II. METHODES D'ETUDE

Les **descriptions** des fosses ont été réalisées en utilisant la terminologie DONESOL (Gaultier *et al.*, 1993) et le Référentiel Pédologique (Baize *et al.*, 1992). Les analyses granulométriques et physico-chimiques ont été interprétées à partir du guide des analyses courantes en pédologie (Baize, 1989).

II-1 Analyses granulométriques et physico-chimiques

Les analyses **granulométriques** et **physico-chimiques** ont été effectuées au Laboratoire d'analyses des sols de l'INRA d'Arras. La méthode utilisée pour la détermination de la CEC est celle de Metson (1956) employant l'acétate d'ammonium normal comme solution d'échange à pH = 7.

Le rapport **Fer libre / Fer total** est calculé à partir de la teneur en fer libre obtenu par la méthode de Mehra-Jackson (1960) et de la teneur en fer total obtenu par dissolution à chaud dans HF et dosée par absorption atomique.

Le rapport **Manganèse Facilement Réductible (MnFR) / Manganèse total (MnT)** est obtenu à partir de la teneur en manganèse facilement réductible (extraction à l'acétate d'ammonium à pH = 7 en présence de chlorhydrate d'hydroxylamine comme réducteur) et de la teneur en manganèse total dosé par absorption atomique après extraction par HF à chaud.

- Sols dominants sur les plateaux et les pentes nord et est

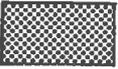


Sols de limon très argileux, bruns, sains, épais de 80 cm environ, reposant sur un matériau calcaire complexe (limon plus ou moins graveleux en poches dans un calcaire dur ou pulvérulent, remanié et cryoturbé).

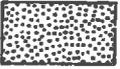


Sols de limon très argileux, bruns, épais de 80 cm environ, légèrement tachés de rouille en profondeur, reposant sur une argile ocre, plus ou moins sableuse et/ou graveleuse et d'épaisseur variable (50 à 100 cm en moyenne).

- Sols dominants sur les pentes sud et ouest

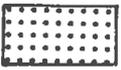


Sols argilo-limoneux, brun foncé, peu ou pas calcaires, à cailloux calcaires peu abondants, situés en haut de pentes très faibles.



Sols limono-argileux, brun-jaunes 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.

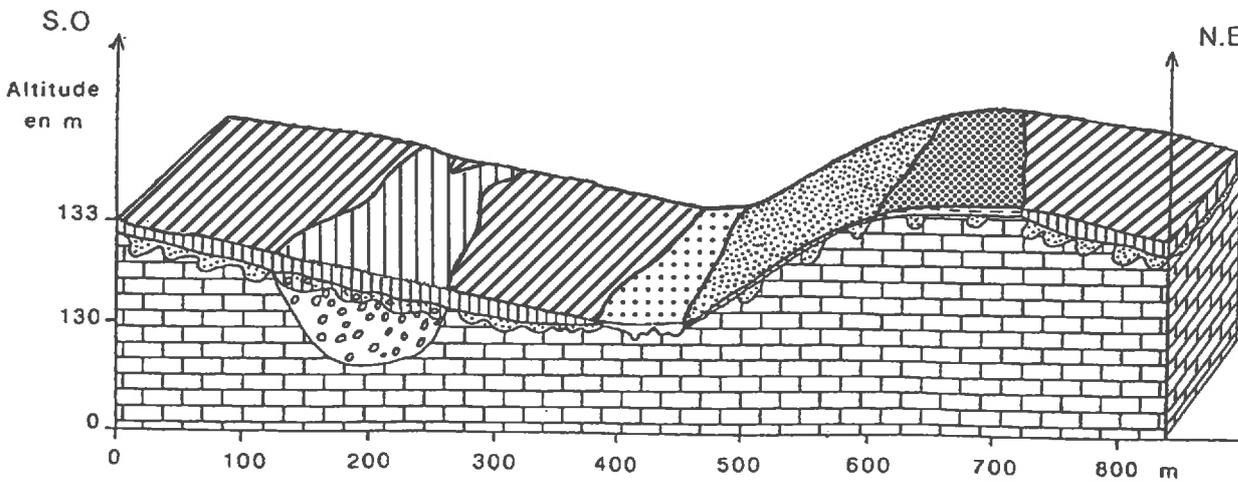
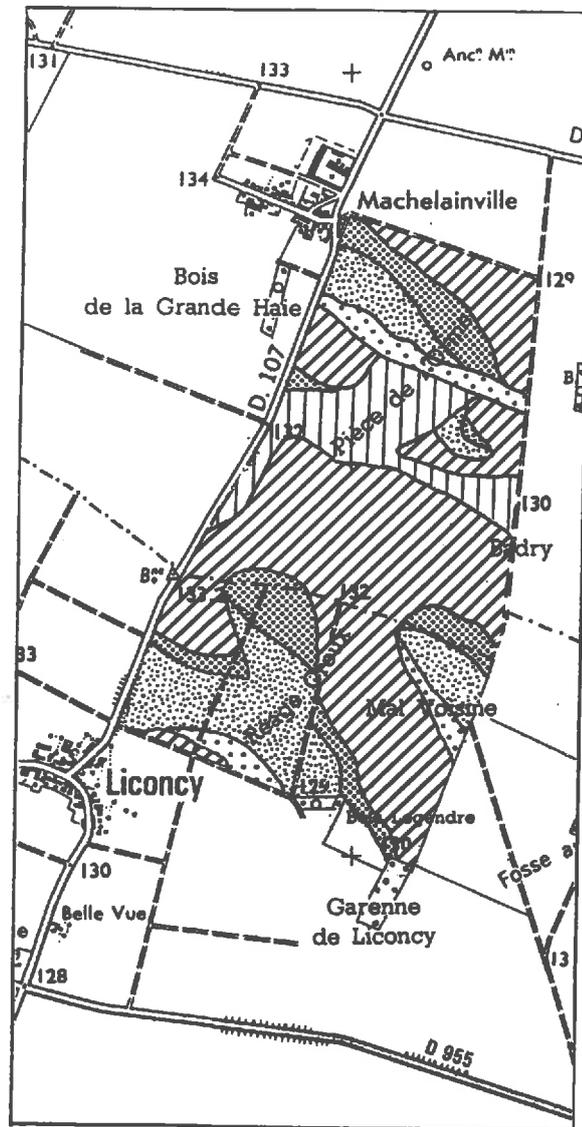


Figure 3.1 : Carte des sols du secteur d'étude.
(d'après Isambert et Duval, 1992)

II-2 Minéralogie de la fraction argileuse

Les **analyses minéralogiques qualitatives** de la fraction argileuse ont été réalisées au **laboratoire de minéralogie de l'INRA d'Orléans**. Le protocole suivi s'inspire de celui proposé par Robert et Tessier (1974). Les échantillons ont été préalablement décarbonatés lorsque c'était nécessaire et la matière organique a été détruite par traitement à l'eau oxygénée 30%. La fraction $< 2\mu\text{m}$ décarbonatée a été extraite après dispersion par agitation mécanique pendant 12 h et ajustement à pH 9 avec NaOH. Puis la fraction $< 2\mu\text{m}$ a été saturée par Mg^{2+} en utilisant une solution de MgCl_2 Normale. Les échantillons ainsi traités ont été ensuite lavés plusieurs fois de manière à enlever l'excès de chlorure puis centrifugés.

La fraction $< 2\mu\text{m}$ a été étudiée sous la forme de **dépôt orienté** sur lame de verre. Le **diffractomètre** utilisé (Philips PW1730) est équipé d'une anticathode au cobalt ($\lambda_{\text{K}\alpha} = 0,1789 \text{ nm}$). Les échantillons ont tout d'abord été étudiés en équilibre avec l'humidité relative du laboratoire (voisine de 50-60%). Puis les échantillons ont été traités à l'éthylène glycol (EG) pour révéler la présence éventuelle de minéraux de type smectite (augmentation de la distance interfolaire et développement d'une raie caractéristique à 1,7 nm). Enfin, les échantillons ont été chauffés successivement à 200, 400 et 550°C pour éliminer progressivement l'eau interfolaire puis l'eau de constitution. Le chauffage de 200 à 400°C permet de discuter la présence de vermiculites (diminution de la distance interfolaire) et celui à 550°C provoque la destruction de la kaolinite.

II-3 Mesure de la densité apparente

La mesure de la **densité apparente** a été effectuée à l'aide d'une **double sonde gamma** du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Brevet LCPC-INRA). Cette sonde utilise une source de Césium 137 (^{137}Cs) dont l'activité est de 185 mBq. Cette méthode est fondée sur la loi générale d'atténuation d'un rayonnement gamma traversant un matériau absorbant (Stengel *et al.*, 1986).

III. ETUDE DES FOSSES

Cinq fosses ont été creusées sur le secteur d'étude pour permettre d'étudier les différents types de sols rencontrés sur le secteur. L'emplacement de ces fosses a été choisi à partir des sondages à la tarière effectués pour établir la carte pédologique au 1/10 000^{ème} de la zone de Villamblain (Isambert et Duval, 1992).

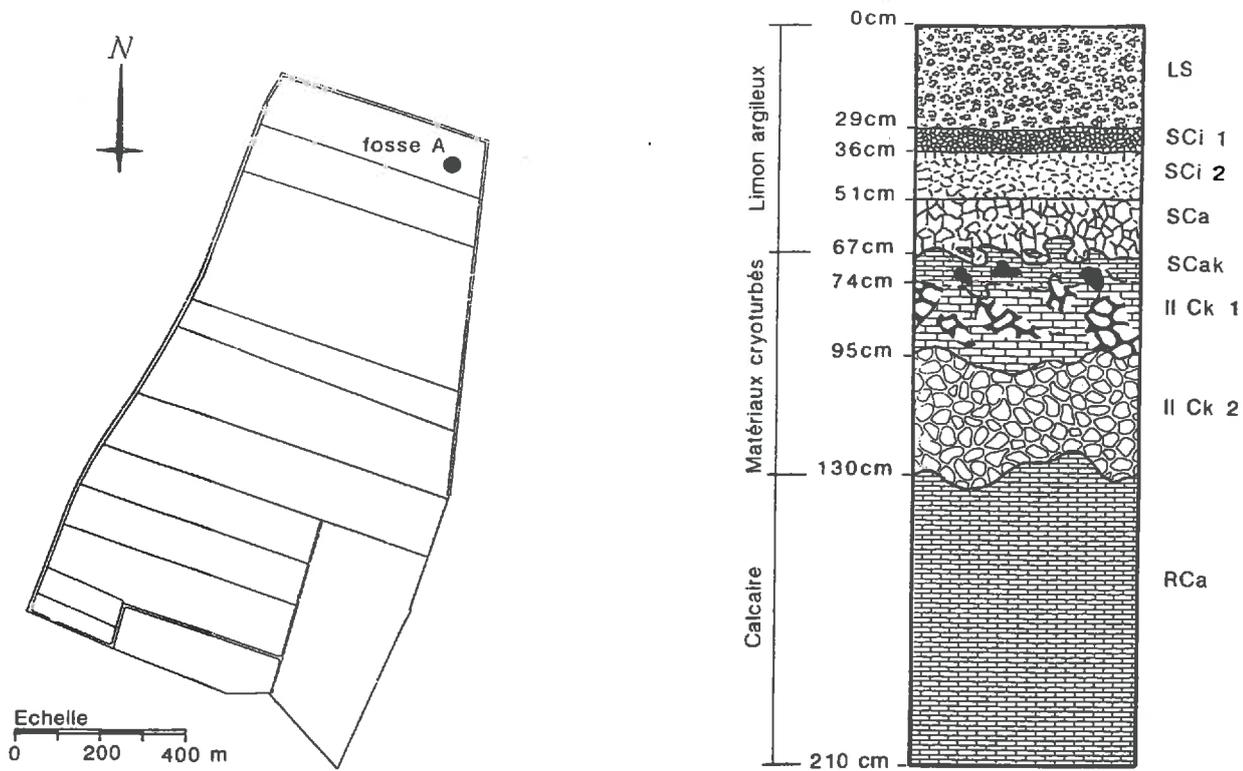


Figure 3.2 : Localisation et description de la fosse A.

Prof. en cm	Horizon	pH eau	C.Org. g/100g	N.Tot. g/100g	C.E.C cmol/kg	Ca ²⁺ cmol/kg	Na ⁺ cmol/kg	Mg ²⁺ cmol/kg	K ⁺ cmol/kg	Sbase cmol/kg	FeL g/100g	FeL FeT en %	MnFR g/100g	MnEB MnT en %
00-29	LS	7.5	1.31	0.15	21.1	22.35	0.07	0.89	0.53	23.8	1.30	45	-	-
29-36	SCi1	8.0	0.90	0.11	20.8	25.05	0.05	0.80	0.39	26.3	1.33	44	0.05	60
36-51	SCi2	8.3	0.68	0.08	16.8	-	0.06	0.87	0.34	-	1.33	44	-	-
51-67	SCa	8.3	0.61	0.07	15.7	-	0.06	0.79	0.33	-	1.27	44	-	-
67-74	SCak	8.4	0.60	0.07	14.1	-	0.06	0.70	0.30	-	1.16	43	0.04	55
98-108	K	8.8	0.19	-	2.2	-	0.04	0.30	0.02	-	0.17	57	-	-
74-95	IICk1	8.6	0.28	-	5.1	-	0.04	0.37	0.08	-	0.43	49	-	-
95-130	IICk2	8.6	0.25	-	6.0	-	0.04	0.48	0.08	-	0.40	53	-	-
130-155	RCa	8.7	0.22	-	4.7	-	0.03	0.45	0.63	-	0.51	67	-	-

Prof. en cm	Horizon	CaCO ₃ g/100g (terre fine)	E.G g/100g (terre tot.)	(1) Granulométrie après décarbonatation en pourcent de terre fine totale						(2) Granulométrie après décarbonatation en pourcent de terre fine non calcaire				
				A en %	LF en %	LG en %	SF en %	SG en %	Total en %	A en %	LF en %	LG en %	SF en %	SG en %
00-29	LS	0	0	32.2	30.9	34.4	1.6	0.9	100	32.2	30.9	34.4	1.6	0.9
29-36	SCi1	0	0	32.2	30.6	35.0	1.5	0.7	100	32.2	30.6	35.0	1.5	0.7
36-51	SCi2	2.8	0	29.9	29.9	35.5	1.5	0.4	97.2	30.8	30.8	36.5	1.5	0.4
51-67	SCa	6.1	0	27.3	30.3	34.7	1.3	0.3	93.9	29.1	32.3	37.0	1.4	0.3
67-74	SCak	14.7	3.8	17.6	33.4	32.7	1.2	0.4	85.3	20.6	39.2	38.3	1.4	0.5
98-108	K	96.2	27.4	0.7	0.0	0.0	0.1	0.0	0.8	87.5	0.0	0.0	12.5	0.0
74-95	IICk1	76.3	24.6	9.3	4.3	7.4	1.8	1.0	23.8	39.1	18.1	31.1	7.6	4.2
95-130	IICk2	87.3	29.8	10.9	0.3	0.6	0.7	0.2	12.7	85.8	2.4	4.7	5.5	1.6
130-155	RCa	91.5	42.5	0.1	0.0	0.0	0.4	0.0	0.5	20.0	0.0	0.0	80.0	0.0

Tableau 3.1 : Résultats des analyses physico-chimiques de la fosse A

III-1 Sol développé dans des matériaux limono-argileux sus-jacents à des matériaux cryoturbés (Fosses A et B).

Cette situation est la **plus fréquente** sur le secteur puisqu'elle représente les 3/4 des sondages à la tarière. Les fosses A et B ouvertes respectivement dans le Nord et le Sud du secteur sont représentatives de ce type de situation.

III-1.1 Description morphologique

Le sol observé dans la fosse A est développé dans des **matériaux limono-argileux** à argilo-limoneux d'environ **70 cm** d'épaisseur. Le profil de sol est **peu différencié** ; seules de légères différences de couleurs et de structure, ainsi que la réaction à HCl permettent de distinguer des horizons. Plus en profondeur, à la base des matériaux limono-argileux à argilo-limoneux, on observe un **encroûtement calcaire discontinu**, puis des **matériaux calcaires cryoturbés**. Ce sol est un Calcisol selon la référence RP (1992) ou un Cambisol eutrique selon la référence FAO-Unesco (1989).

Description détaillée de la Fosse A (figure 3.2) :

00-29cm : (LS) Horizon brun foncé (10YR3/3) ; limono-argileux à argilo-limoneux ; cultivé ; effervescence nulle ; très nombreuses racines ; meuble ; structures juxtaposées grumeleuse (1 mm) peu nette et polyédrique sub-anguleuse (10 mm) nette ; limite régulière avec l'horizon suivant.

29-36cm : (SCi1) Horizon brun foncé (10YR3/3) ; limono-argileux à argilo-limoneux ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; peu compact ; structure polyédrique (10 mm) nette ; limite régulière avec l'horizon suivant.

36-51cm : (SCi2) Horizon brun jaune foncé (10YR4/4) ; limono-argileux ; effervescence localisée aux fins granules calcaires peu nombreux ; nombreuses racines ; peu compact ; structure polyédrique (30 mm) peu nette ; limite régulière avec l'horizon suivant.

51-67cm : (SCa) Horizon brun jaune foncé (10YR4/4) ; limono-argileux ; effervescence généralisée ; nombreuses racines ; peu compact ; structure prismatique (40 mm) peu nette et sous-structure polyédrique sub-anguleuse (25 mm) nette ; limite ondulée avec l'horizon suivant.

67-74cm : (SCak) Horizon brun jaune (10YR5/4) ; limono-argileux ; effervescence généralisée ; nombreuses racines ; peu compact ; structure polyédrique (12 mm) nette ; présence de quelques petits nodules calcimagnésiques durs et d'un pseudo-mycélium calcaire très abondant ; limite irrégulière avec l'horizon suivant.

74-95cm : (IIck1) Horizon brun jaune clair (10YR6/6) ; calcaire ; nombreux cailloux et graviers calcaires ; racines peu nombreuses ; compact ; structure polyédrique sub-anguleuse peu nette ; présence de petits nodules calcimagnésiques durs et peu abondants et d'un pseudo-mycélium calcaire très abondant ; limite ondulée avec l'horizon suivant.

98-108cm : (K) (*Encroûtement*) Horizon beige pâle à blanc se situant à la base du limon argileux (LA) sur la face opposée à la face décrite ; se situerait, s'il existait, entre les horizons 67-74cm et 74-95cm de la face décrite ; calcaire presque pur (96%) ; pseudo-mycélium calcaire très abondant ; nombreux cailloux calcaires durs ; structure litée ; Pas de racines et pas de traces d'activités ; bloque le passage des racines quand il est présent ; limite nette à peu nette avec l'horizon suivant.

95-130cm : (IIck2) Horizon jaune pâle (2,5YR7/4) ; très calcaire ; racines très peu nombreuses ; très compact et très friable ; structure micro-grenue ; présence de cailloux et graviers calcaires et de quelques

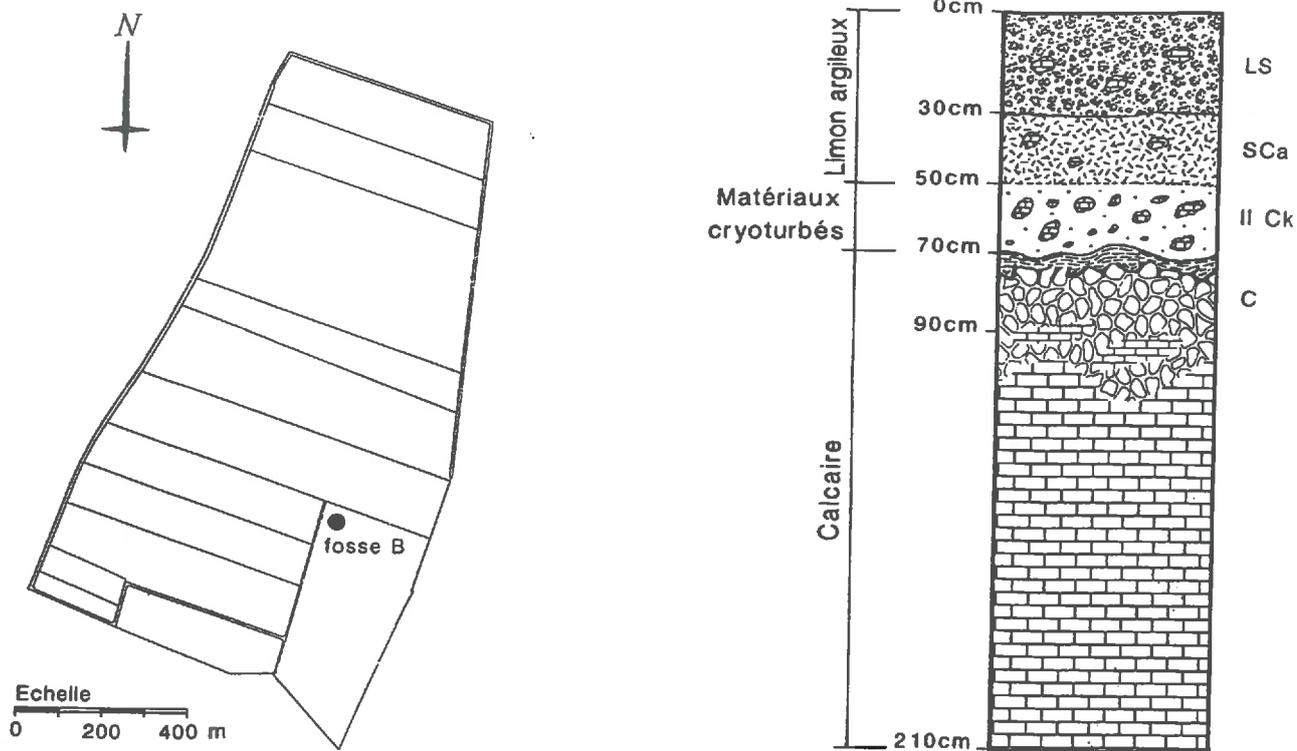


Figure 3.3 : Localisation et description de la fosse B.

Prof. en cm	Horizon	pH eau	C.Org. g/100g	N.Tot. g/100g	C.E.C cmol/kg	Ca ²⁺ cmol/kg	Na ⁺ cmol/kg	Mg ²⁺ cmol/kg	K ⁺ cmol/kg	Sbase cmol/kg	FeL g/100g	FeL FeT en %	MnFR g/100g	MnFR MnT en %
00-30	LS	6.9	1.4	0.15	20.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30-50	SCa	8.2	0.9	0.12	16.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50-70	IICk	8.2	0.7	0.09	15.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Prof. en cm	Horizon	CaCO ₃ g/100g (terre fine)	E.G g/100g (terre tot.)	(1) Granulométrie après décarbonatation en pourcent de terre fine totale						(2) Granulométrie après décarbonatation en pourcent de terre fine non calcaire				
				A en %	LF en %	LG en %	SF en %	SG en %	Total en %	A en %	LF en %	LG en %	SF en %	SG en %
00-30	LS	0.0	0.0	32.2	31.4	34.4	1.5	0.5	100.0	32.2	31.4	34.4	1.5	0.5
30-50	SCa	4.0	8.2	31.7	27.7	31.0	1.0	0.4	91.8	34.5	30.2	33.8	1.1	0.4
50-70	IICk	6.0	14.5	28.4	26.0	30.0	1.0	0.2	85.6	33.2	30.4	35.0	1.2	0.2

Tableau 3.2 : Résultats des analyses physico-chimiques de la fosse B

nodules calcimagnésiques durs ; pseudo-mycélium calcaire très abondant ; limite ondulée avec l'horizon suivant.

130-155cm : (RCa) Horizon jaune pâle (2,5YR7/4) et blanc ; très calcaire ; pas de racines ; compact et très friable ; structure grenue ; présence de cailloux et gros blocs calcaires et de quelques nodules calcimagnésiques durs ; pseudo-mycélium calcaire très abondant ; taches ocre d'oxydation assez nombreuses.

Description détaillée de la Fosse B (figure 3.3):

00-30cm : (LS) Horizon brun foncé (10YR4/3) ; limono-argileux à argilo-limoneux ; cultivé ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; meuble ; présence de quelques cailloux calcaires en surface ; structures polyédrique sub-anguleuse nette ; limite nette et faiblement ondulée avec l'horizon suivant.

30-50cm : (SCa) Horizon brun jaune foncé (10YR4/4) ; argilo-limoneux ; effervescence légère ; nombreux granules calcaires ; nombreuses racines et terriers de lombrics ; présence d'éléments grossiers calcaires en faible quantité ; structures polyédrique plus continue (15 mm) et sous-structure polyédrique moins nette ; limite peu nette et ondulée avec l'horizon suivant.

50-70cm : (IICk) Horizon beige foncé (10YR6/4) ; argilo-limoneux ; calcaire ; nombreuses racines ; présence de nombreux éléments grossiers calcaires et de granules ; structure polyédrique (10 mm) ; limite nette et très ondulée avec l'horizon suivant.

70-90cm : (RCa) Horizon beige clair à jaune pâle (2,5YR8/2) et blanc ; très calcaire ; pas de racines ; structure micro-grenue ; présence de très nombreux éléments grossiers (cailloux et graviers) calcaires ; pseudo-mycélium calcaire très abondant ; présence au sommet d'un encroûtement calcaire discontinue très blanc et très friable à structure litée.

III-1.2 Résultats des analyses physico-chimiques

Les résultats montrent clairement une **faible variation** de composition granulométrique de la phase minérale non calcaire dans les horizons limono-argileux à argilo-limoneux (de 29,1 à 32,2% de teneur en argile pour la fosse A et de 32,2 à 34,5% de teneur en argile pour la fosse B) (tableaux 3.1 et 3.2). La teneur en sable non calcaire (sables fins et grossiers) est inférieure à 2,5% (figures 3.4a et 3.4b). En revanche, dans l'encroûtement et les matériaux calcaires cryoturbés, la composition granulométrique de la fraction non calcaire est **beaucoup plus variable**, mais les résultats ont été obtenus à partir d'une très faible proportion de l'échantillon (teneur élevée en CaCO_3). Ces derniers résultats doivent par conséquent être considérés avec prudence.

La capacité d'échange cationique (CEC) rapportée à l'argile après décarbonatation est voisine de **65 cmol/kg** en surface (horizons LS et SCi1), **55 cmol/kg** dans les horizons limono-argileux à argilo-limoneux plus profonds (horizons SCi et SCa) et les matériaux cryoturbés (figures 3.4c et 3.4d). La différence enregistrée entre les horizons limono-argileux de surface et ceux plus profonds est vraisemblablement à attribuer à la **différence** de teneur en **matière organique**.

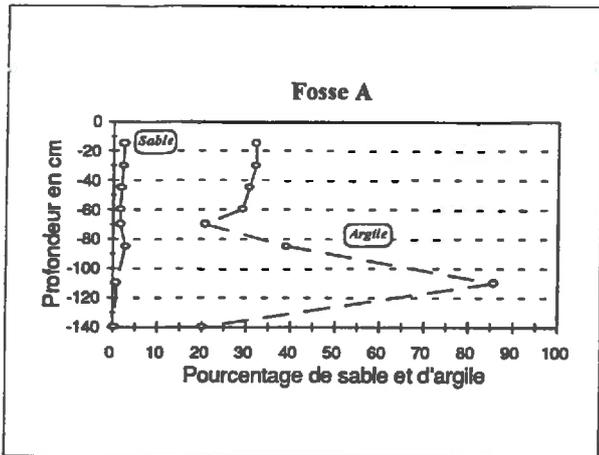


Figure 3.4a : Teneurs en sable et argile de la fosse A

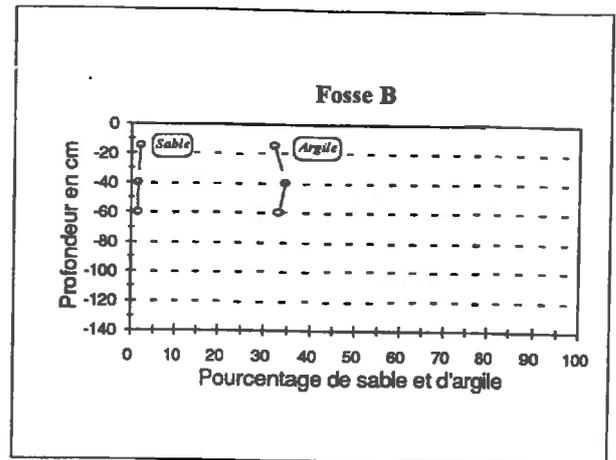


Figure 3.4b : Teneurs en sable et argile de la fosse B

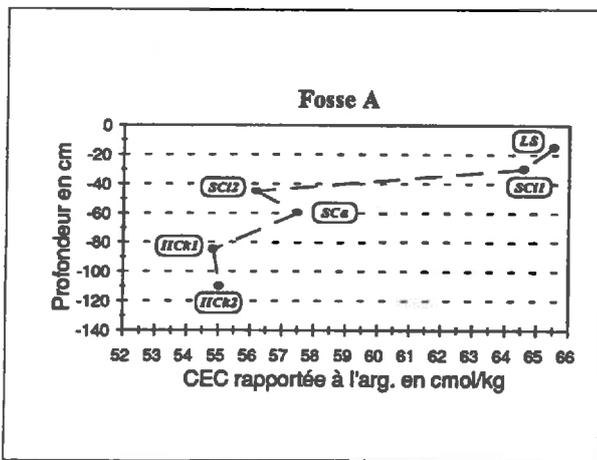


Figure 3.4c : CEC rapportée à l'argile de la fosse A

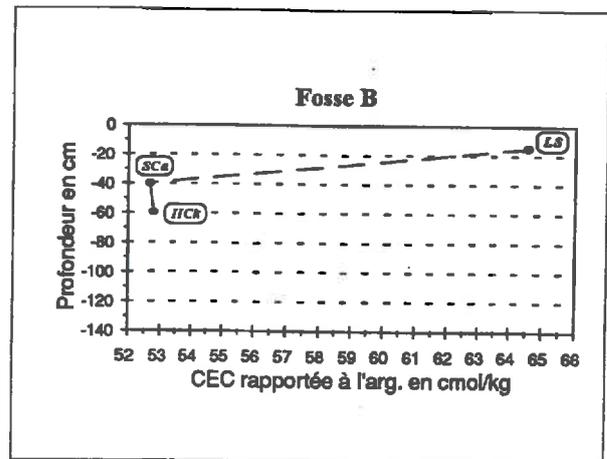


Figure 3.4d : CEC rapportée à l'argile de la fosse B

Figure 3.4 : Caractéristiques physico-chimiques des principaux horizons des fosses A et B

III-1.3 Minéralogie de la fraction argileuse

Les **diffractogrammes** effectués sur dépôts orientés (figure 3.5) (échantillons provenant de l'horizon SCi1 de la fosse A) montrent la présence de minéraux argileux de type **smectite** (raie 001 à 1,45 nm à l'humidité relative du laboratoire et à 1,75 nm après traitement à l'éthylène-glycol et à 1,0 nm), de type **illite** (raie 001 à 1,0 nm quel que soit le traitement), de type **kaolinite** (raie 001 à 0,72 nm à l'humidité relative du laboratoire, pas de gonflement après traitement à l'éthylène-glycol et disparition par destruction entre 400 et 550°C) (Robert, 1975) et de minéraux tels que le **quartz** (raies 101 à 0,333 nm et 100 à 0,426 nm) et des **feldspaths potassiques** (raie à 0,325 nm).

Si l'on admet que la surface de chaque raie 001 est liée à la proportion relative de chaque type de minéral argileux, les diffractogrammes indiqueraient une **diminution** de la proportion de kaolinite en profondeur au profit des minéraux 2:1.

Les variations de **CEC/Argile** dans la fosse A sont **cohérentes** avec les résultats des analyses minéralogiques (figure 3.4c et 3.4d). Dans l'ensemble, le rapport CEC/Argile est **plus élevé** dans les horizons LS que dans les horizons plus profonds, mais cette différence est à attribuer vraisemblablement à une teneur en **matière organique plus élevée** en surface. Pour les horizons SCi, SCa et IICk, l'éventuelle variation de teneur en kaolinite n'apparaît pas au niveau des valeurs de CEC/Arg.

III-1.4 Densité apparente

Les mesures de **densité apparente** n'ont concerné que la fosse A (figure 3.6). Ces mesures mettent en évidence l'**horizon cultivé** (LS : 00-30 cm) avec une densité comprise entre **1,35** et **1,45**. La densité apparente augmente ensuite jusqu'à **1,5** ce qui signale la présence d'une **semelle de labour** en dessous de l'horizon cultivé. La densité apparente est voisine de **1,45** pour les horizons argilo-limoneux **plus profonds**. L'**encroûtement calcaire**, mentionné sur la face opposée à celle décrite (horizon 98-108 cm), montre des valeurs de densité apparente plus élevées de l'ordre de **1,55**.

Les matériaux **cryoturbés** intermédiaires ont des valeurs de densité apparente comprises entre **1,6** et **1,8**. Cette gamme de variation s'explique par l'hétérogénéité de ces matériaux.

Les matériaux du **substrat calcaire** possèdent une densité apparente comprise entre **1,5** et **1,6**.

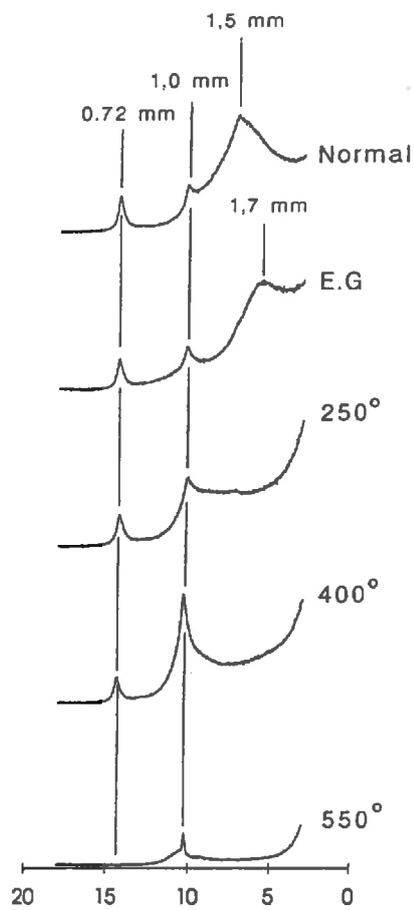


Figure 3.5 : Diffractogrammes RX obtenus à partir de dépôts orientés de la fraction $< 2\mu\text{m}$ décarbonatée (horizon SCi1 de la fosse A).

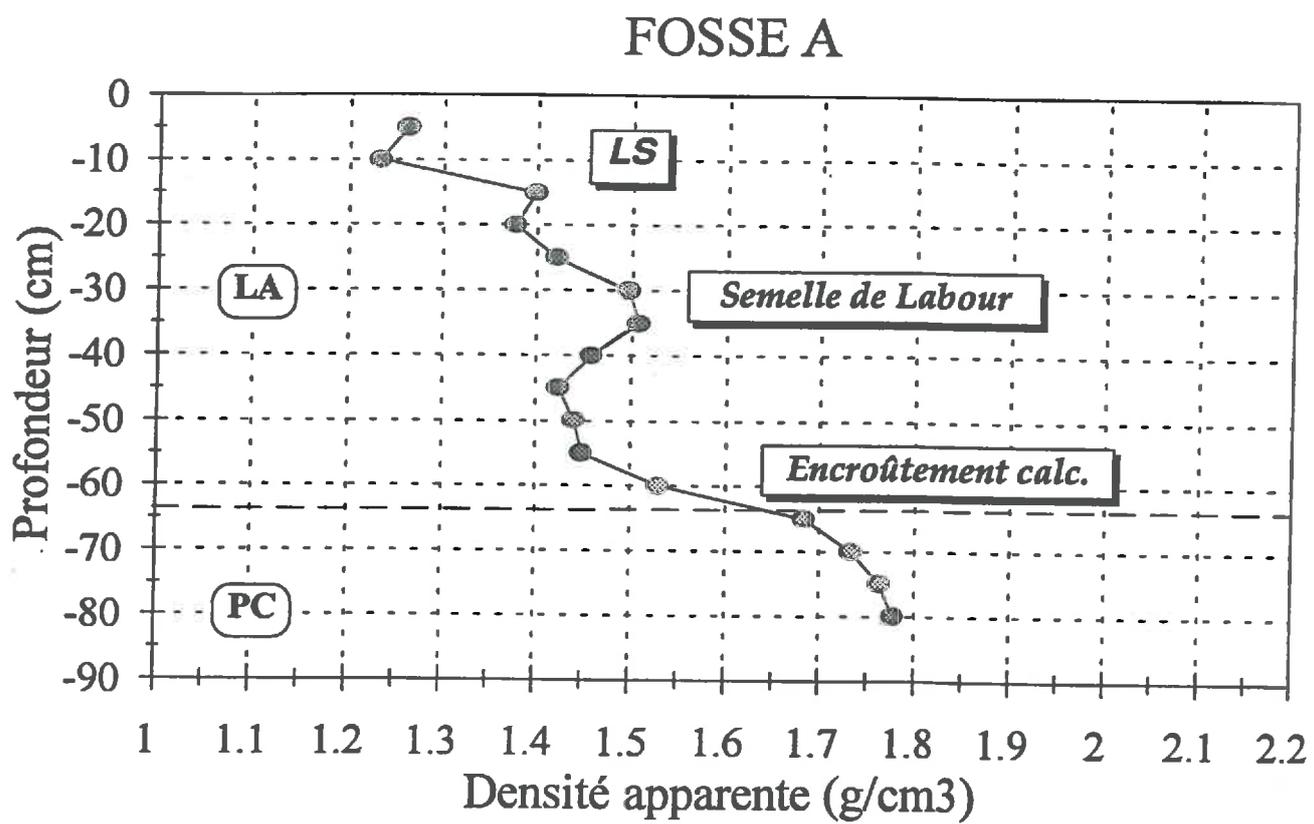


Figure 3.6 : Profil de densité apparente (fosse A).

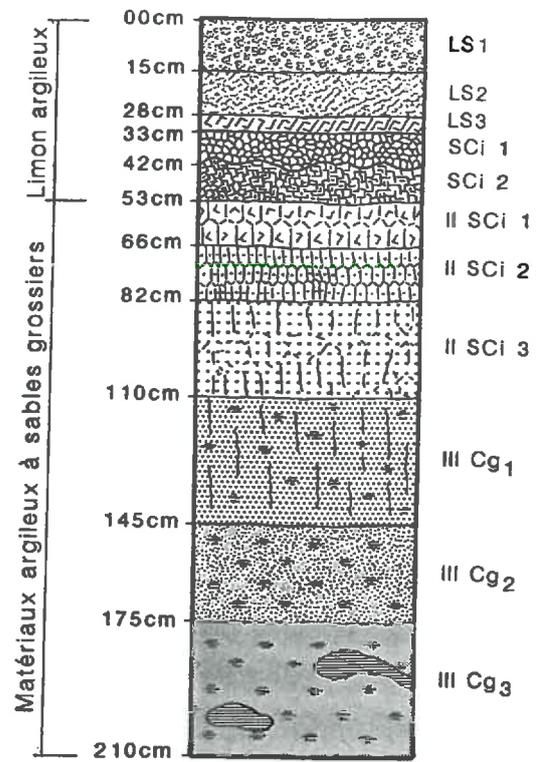
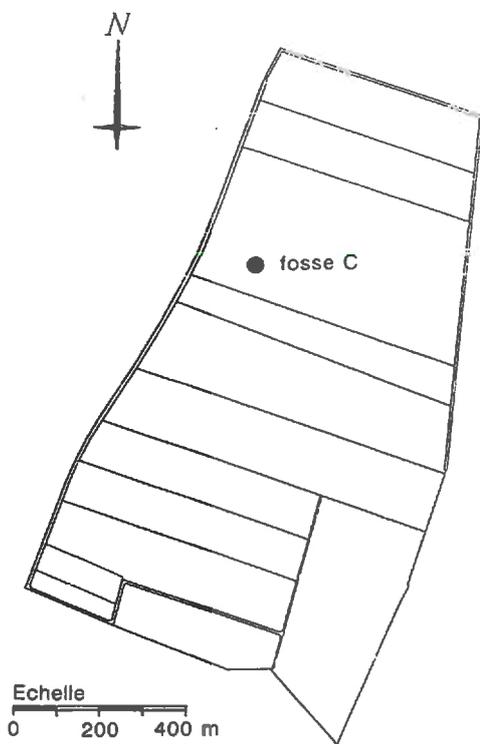


Figure 3.7 : Localisation et description de la fosse C.

Prof. en cm	Horizon	pH eau	C.Org. g/100g	N.Tot. g/100g	C.E.C cmol/kg	Ca ²⁺ cmol/kg	Na ⁺ cmol/kg	Mg ²⁺ cmol/kg	K ⁺ cmol/kg	Sbase cmol/kg	FeL g/100g	FeT en %	MnFR g/100g	MnT en %
00-15	LS1	6.1	1.10	0.12	17.4	14.7	0.05	1.35	0.57	16.7	1.39	48	0.05	48
15-28	LS2	6.2	1.17	0.12	17.2	14.7	0.05	1.35	0.49	16.6	1.37	48	0.05	54
28-33	LS3	6.4	0.86	0.10	17.2	15.3	0.06	1.33	0.36	17.1	1.39	47	0.05	57
33-42	SCi1	6.8	0.63	0.08	17.0	16.5	0.06	1.33	0.35	-	1.45	47	0.04	53
42-53	SCi2	7.0	0.48	0.06	20.2	20.4	0.09	1.47	0.38	-	1.84	49	0.03	46
53-66	IISCi1	7.2	0.38	0.05	21.9	22.5	0.09	1.52	0.38	-	2.01	50	0.04	47
66-82	IISCi2	7.4	0.32	-	23.0	23.5	0.09	1.52	0.36	-	2.10	53	0.05	56
82-110	IISCi3	7.6	0.29	-	24.0	24.6	0.11	1.60	0.33	-	2.03	51	0.07	61
110-145	IIICg1	7.7	0.20	-	22.1	22.8	0.13	1.49	0.26	-	1.74	52	0.08	68
145-175	IIICg2	7.7	0.11	-	14.5	14.2	0.08	0.99	0.19	-	1.28	56	0.09	77
175-190	IIICg3	7.7	0.04	-	13.3	12.9	0.08	0.94	0.20	-	0.59	39	0.01	77

Prof. en cm	Horizon	CaCO3 g/100g (terre fine)	E.G g/100g (terre tot.)	(1) Granulométrie après décarbonatation en pourcent de terre fine totale						(2) Granulométrie après décarbonatation en pourcent de terre fine non calcaire				
				A en %	LF en %	LG en %	SF en %	SG en %	Total en %	A en %	LF en %	LG en %	SF en %	SG en %
00-15	LS1	0	0	30.6	29.3	35.8	1.8	2.5	100	-	-	-	-	-
15-28	LS2	0	0	33.0	31.6	31.1	1.9	2.4	100	-	-	-	-	-
28-33	LS3	0	0	31.1	30.3	34.4	2.0	2.2	100	-	-	-	-	-
33-42	SCi1	0	0.8	32.4	30.4	33.2	1.9	2.1	100	-	-	-	-	-
42-53	SCi2	0	0.4	39.2	28.9	28.3	1.7	1.9	100	-	-	-	-	-
53-66	IISCi1	0	1.0	41.0	28.3	25.2	1.9	3.6	100	-	-	-	-	-
66-82	IISCi2	0	4.9	42.8	25.5	21.4	2.3	8.0	100	-	-	-	-	-
82-110	IISCi3	0	6.3	43.3	22.1	16.6	2.8	15.2	100	-	-	-	-	-
110-145	IIICg1	0	6.7	39.3	17.1	11.8	3.8	28.0	100	-	-	-	-	-
145-175	IIICg2	0	4.5	26.7	9.3	4.4	3.9	55.7	100	-	-	-	-	-
175-190	IIICg3	0	2.6	29.1	5.6	3.5	4.3	57.5	100	-	-	-	-	-

Tableau 3.3 : Résultats des analyses physico-chimiques de la fosse C

III-1.5 Conclusion

Les observations et les déterminations analytiques effectuées sur les fosses A et B **confirment** celles effectuées par Ould-Mohamed (1991) non loin du secteur d'étude. L'identification des principaux ensembles de matériaux sur le terrain se fait aisément.

Les analyses physico-chimiques et minéralogiques **corroborent** l'analyse morphologique réalisée sur le terrain. Elles montrent de façon générale une **faible variation** de la constitution des horizons qui composent le sol qui s'est développé dans la couverture limono-argileuse supérieure. Seuls la teneur en matière organique et en carbonates **varient sensiblement** avec la profondeur. L'encroûtement calcaire **n'est pas systématiquement présent** et a été rattaché à l'ensemble limono-argileux. Les matériaux cryoturbés sont de constitution et d'organisation **très variable** verticalement et latéralement. La limite entre l'ensemble limono-argileux supérieur et l'ensemble cryoturbé intermédiaire est généralement **ondulée**.

III.2 Sol développé dans des matériaux limono-argileux sus-jacents à des matériaux argileux à sables grossiers (Fosses C et D).

Cette situation est **peu fréquente** dans le secteur d'étude (1/8 des sondages à la tarière). Les fosses C et D se situent dans la moitié Nord du secteur de Liconcy et sont distantes d'une cinquantaine de mètres.

III-2.1 Description morphologique

Le sol observé dans les fosses C et D est développé dans un **matériau limono-argileux** ayant **40 à 60 cm** d'épaisseur avec à sa base un matériau nettement **plus argileux** contenant une proportion variable de **grains de quartz** sub-automorphes. Sous-jacent à ces deux matériaux, on distingue des **matériaux sableux** contenant fréquemment des **passées argileuses** grises ou jaunes. Une différenciation morphologique **stricte** entre le matériau limono-argileux supérieur et les matériaux argilo-limoneux est **difficile** à réaliser sur le terrain. Ce sol est un Calcisol bilithique (RP, 1995) ou un Cambisol (FAO-Unesco, 1989).

Description détaillée de la fosse C (figure 3.7) :

00-15cm : (LS1) Horizon brun foncé (10YR4/3) ; limono-argileux ; cultivé ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; peu compact ; structures juxtaposées polyédrique (30mm) très nette et polyédrique sub-anguleuse (1mm) nette ; limite régulière avec l'horizon suivant.

15-28cm : (LS2) Horizon brun foncé (10YR4/3) ; limono-argileux à argilo-limoneux ; cultivé ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; plus compact ; structure polyédrique (30mm) très nette et sous

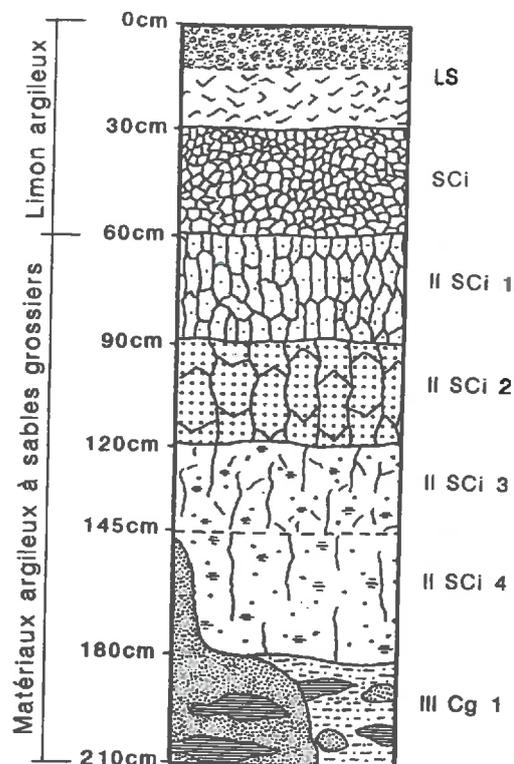
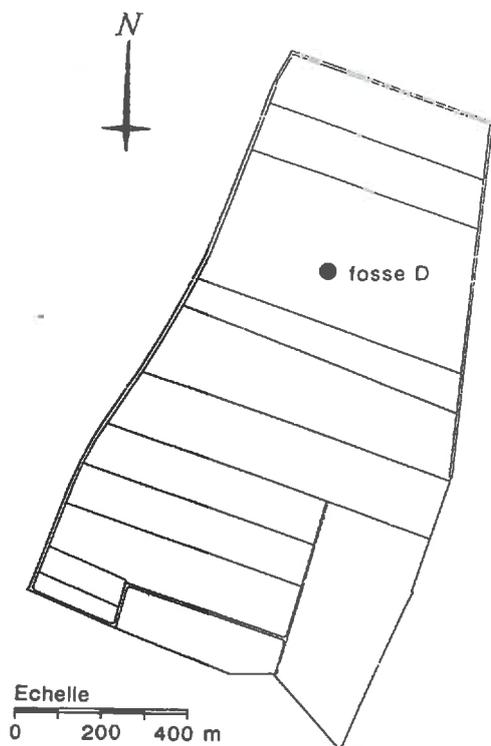


Figure 3.8 : Localisation et description de la fosse D.

Prof en cm	Horizon	pH eau	C.Org. g/100g	N.Tot. g/100g	C.E.C cmol/kg	Ca ²⁺ cmol/kg	Na ⁺ cmol/kg	Mg ²⁺ cmol/kg	K ⁺ cmol/kg	Sbase cmol/kg	FeL g/100g	FeL FeT en %	MnFR g/100g	MnEB MnT en %
00-30	LS	5.8	1.30	-	15.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30-60	SCi	7.1	0.60	-	17.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60-90	II SCi1	-	-	-	21.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90-120	II SCi2	-	-	-	24.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120-145	II SCi3	-	-	-	24.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
145-180	II SCi4	-	-	-	25.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180-210	III Cg1	-	-	-	23.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
190	III Cg2	-	-	-	20.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Prof en cm	Horizon	CaCO ₃ g/100g (terre fine)	E.G g/100g (terre tot.)	(1) Granulométrie après décarbonatation en pourcent de terre fine totale						(2) Granulométrie après décarbonatation en pourcent de terre fine non calcaire				
				A en %	LF en %	LG en %	SF en %	SG en %	Total en %	A en %	LF en %	LG en %	SF en %	SG en %
00-30	LS	0	0	31.1	31.6	33.7	1.8	1.8	100	-	-	-	-	-
30-60	SCi	0	0	38.6	29.6	28.7	1.6	1.5	100	-	-	-	-	-
60-90	II SCi1	0	0	41.0	27.9	26.7	1.7	2.7	100	-	-	-	-	-
90-120	II SCi2	0	-	45.1	26.1	21.7	2.5	4.6	100	-	-	-	-	-
120-145	II SCi3	0	-	46.8	24.6	20.7	2.8	5.1	100	-	-	-	-	-
145-180	II SCi4	0	-	46.0	26.2	21.5	2.8	3.5	100	-	-	-	-	-
180-210	III Cg1	0	-	58.8	10.8	7.1	4.2	19.1	100	-	-	-	-	-
190	III Cg2	0	2	40.5	10.3	8.6	3.8	36.8	100	-	-	-	-	-

Tableau 3.4 : Résultats des analyses physico-chimiques de la fosse D

structure continue peu nette ; limite régulière avec l'horizon suivant.

28-33cm : (LS3) Horizon brun foncé (10YR4/3) ; argilo-limoneux à limono-argileux ; cultivé ; effervescence nulle ; racines peu nombreuses ; plus compact ; structure polyédrique sub-anguleuse (20mm) nette ; limite régulière avec l'horizon suivant.

33-42cm : (SCi1) Horizon brun jaune foncé (10YR4/4) ; argilo-limoneux à limono-argileux ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; structure polyédrique (10 à 20mm) très nette ; quelques revêtements minces sur agrégats ; limite ondulée avec l'horizon suivant.

42-53cm : (SCi2) Horizon brun jaune foncé (10YR4/4) ; argilo-limoneux ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; structure polyédrique (20mm) très nette ; présence de revêtements minces sur agrégats ; limite régulière avec l'horizon suivant.

53-66cm : (IISCI1) Horizon brun jaune (10YR5/4) ; argilo-limoneux avec présence de quelques grains de quartz (env.1%) et de sables grossiers (env.4%) ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; structure prismatique (30mm) peu nette et sous-structure polyédrique sub-anguleuse nette (10mm) ; présence de revêtements minces sur agrégats et de quelques taches noires de FeO, MnO ; limite régulière avec l'horizon suivant.

66-82cm : (IISCI2) Horizon brun jaune (10YR5/5) ; argilo-limoneux avec présence de grains de quartz (env.5%) et de sables grossiers (env.8%) ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; structure prismatique (20mm) peu nette et sous-structure polyédrique sub-anguleuse nette (10mm) ; présence de revêtements minces sur les grandes faces et de quelques taches noires de FeO, MnO ; limite régulière avec l'horizon suivant.

82-110cm : (IISCI3) Horizon brun jaune (10YR5/5) ; argilo-limoneux avec présence de nombreux grains de quartz et de sables grossiers (env.15%) ; effervescence nulle ; peu de racines ; structure prismatique (20mm) peu nette avec présence de revêtements minces sur les grandes faces verticales ; pas de taches d'oxydation ; limite régulière avec l'horizon suivant.

110-145cm : (IIICg1) Horizon brun rougeâtre (7,5YR4/4) ; limoneux moyen sableux à sables grossiers (env.30%) et présence de nombreux grains de quartz ; effervescence nulle ; très peu de racines ; structure continue ; quelques taches d'oxydation noires de FeO, MnO ; limite régulière avec l'horizon suivant.

145-175cm : (IIICg2) Horizon brun rougeâtre (7,5YR4/4) ; sablo-argileux à sables grossiers (env.50%) et quelques grains de quartz (env.5%) ; effervescence nulle ; pas de racines ; structure continue ; nombreuses taches d'oxydation noires de FeO, MnO ; limite régulière avec l'horizon suivant.

175-190cm : (IIICg3) Horizon brun franc rougeâtre (7,5YR5/6) ; argilo-sableux à sables grossiers (env.60%) et peu de grains de quartz (3%) ; effervescence nulle ; pas de racines ; structure continue ; nombreuses taches et concrétions noires de FeO, MnO.

Description détaillée de la fosse D (figure 3.8) :

00-30cm : (LS) Horizon brun foncé (10YR3/3) ; limono-argileux à argilo-limoneux ; cultivé ; effervescence nulle ; nombreuses racines ; meuble ; structure polyédrique sub-anguleuse nette ; limite nette et faiblement ondulée avec l'horizon suivant.

30-60cm : (SCi) Horizon brun rougeâtre (7,5YR4/4) ; argilo-limoneux ; effervescence nulle ; racines peu nombreuses ; compact ; structure polyédrique très nette avec quelques revêtements ; limite nette et faiblement ondulée avec l'horizon suivant.

60-90cm : (IISCI1) Horizon brun rougeâtre (7,5YR4/4) ; argilo-limoneux ; effervescence nulle ; racines très peu nombreuses ; compact ; structure prismatique très nette (50mm) et sous-structure polyédrique avec quelques revêtements et quelques graviers de quartz ; limite nette avec l'horizon suivant.

90-120cm : (IISCI2) Horizon brun franc rougeâtre (7,5YR5/6) ; argileux à argilo-limoneux ; effervescence nulle ; structure prismatique très nette avec quelques revêtements (7,5YR4/4) et de nombreux graviers de quartz (env.20%) ; quelques taches et concrétions de FeO, MnO ; limite nette avec l'horizon suivant.

120-145cm : (IISCI3) Horizon brun franc rougeâtre (7,5YR5/6) ; argileux ; effervescence nulle ; structure prismatique très nette avec des revêtements épais sur quelques grandes faces (7,5YR4/4) et des graviers de quartz (env.5%) ; nombreuses taches et concrétions de FeO, MnO ; colmatage des pores ; limite peu nette avec l'horizon suivant.

145-180cm : (IISCi4) Horizon brun franc rougeâtre (7,5YR5/6) ; argileux ; effervescence nulle ; structure prismatique moins nette avec des revêtements épais sur quelques grandes faces (7,5YR4/4) et des graviers de quartz (env.5%) ; nombreuses taches et concrétions de FeO, MnO ; colmatage des pores ; limite nette et très ondulée avec l'horizon suivant.

180-210cm : (IIICg1) Horizon très hétérogène de couleur dominante ocre à rouille avec des passées argileuses grises à jaunes et des poches sableuses (voir description suivante) ; argileux lourd très riche en sables grossiers et graviers de quartz ; effervescence nulle ; nombreuses taches de FeO, MnO.

190cm : (IIICg2) Description d'une poche sableuse : argileux à argilo-sableux ; nombreux grains de quartz ; effervescence nulle ; couleur très hétérogène variant de l'ocre au rouille orangé ; quelques taches de FeO, MnO.

Sur le terrain, les matériaux limono-argileux et argilo-limoneux se caractérisent par des teintes brunes **10YR** alors que les matériaux argilo-sableux ont des teintes brunes rougeâtre **7,5YR**. Cependant, le **rougissement** des matériaux n'est pas un critère suffisant pour une mise en évidence stricte, car elle est difficilement perceptible. D'autres critères vont être étudiés afin de rendre plus aisée la distinction de ces deux matériaux.

III-2.2 Résultats des analyses physico-chimiques

Dans la fosse C, la teneur en argile reste voisine de **32%** jusqu'à 40 cm de profondeur, puis elle est **nettement supérieure** entre 40 et 140 cm (39 à 43%), l'augmentation de teneur en argile se produisant sur quelques centimètres (tableau 3.3 et figure 3.9a). La teneur en sable demeure de l'ordre de 5% jusqu'à 60cm de profondeur, puis **augmente** régulièrement jusqu'à 2m de profondeur. Ces tendances sont similaires dans la fosse D (tableau 3.4 et figure 3.9b), surtout en ce qui concerne le profil sableux. La teneur en argile, quant à elle, **augmente** régulièrement avec la profondeur et on n'observe pas de diminution comme sur la fosse C. Cette différence entre les deux fosses est due à la **forte hétérogénéité** des matériaux argileux à sables grossiers. Les variations de composition granulométrique résulte d'**intercalations** de passées argileuses ou de poches plus sableuses dans le profil (cf. description ci-dessus).

L'analyse plus détaillée des variations de teneur en argile et sable avec la profondeur et la comparaison avec les descriptions permet de différencier les matériaux rencontrés sur ces fosses. L'**absence** ou la **faible variation** de la teneur en sable (voisin de 5%) et de teneur en argile (légèrement supérieure à 30%) tend à montrer que l'on reste dans l'ensemble argilo-limoneux supérieur omniprésent sur le secteur d'étude. L'**augmentation** de la teneur en sable en dessous de 50 cm **conjointement** à celle de la teneur en argile (augmentation de 30 à 40%) indiquerait que l'on passe d'un matériaux argilo-limoneux à des matériaux argileux à sables grossiers, l'horizon 42-53cm de la fosse C constituant un horizon de **transition** entre les deux ensembles de matériaux. Les variations de teneur en argile dans les matériaux argileux à sables grossiers mises en évidence en profondeur sont liées à une très forte hétérogénéité à l'échelle décimétrique (cf. figure 3.7).

Les valeurs de **CEC/Argile** sont comprises entre **50** et **60 cmol/kg** jusqu'à 1,60 m de

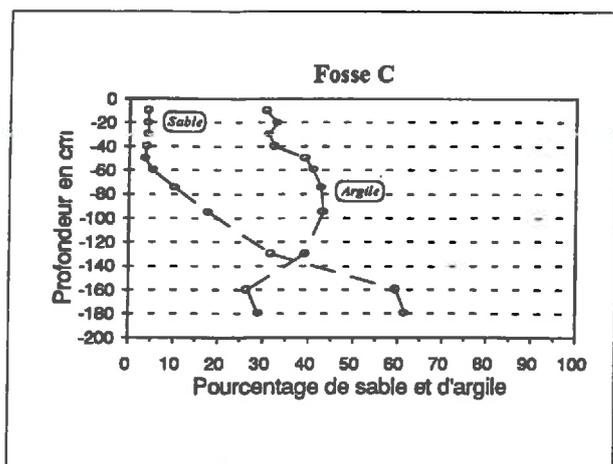


Figure 3.9a : Teneurs en sable et argile de la fosse C

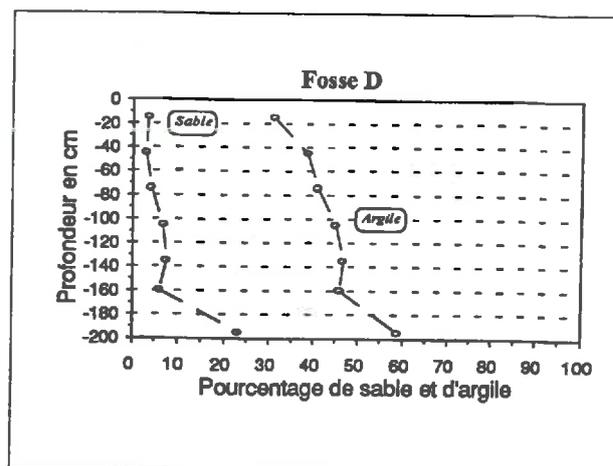


Figure 3.9b : Teneurs en sable et argile de la fosse D

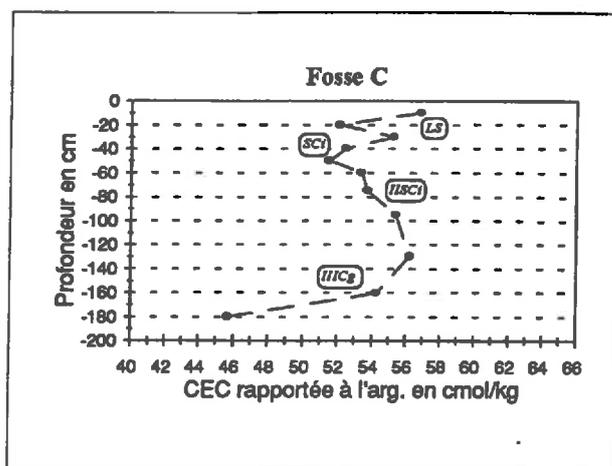


Figure 3.9c : CEC rapportée à l'argile de la fosse C

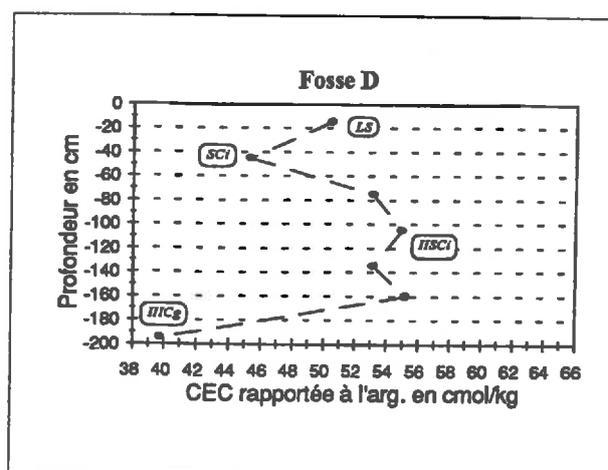


Figure 3.9d : CEC rapportée à l'argile de la fosse D

Figure 3.9 : Caractéristiques physico-chimiques des principaux horizons des fosses C et D

profondeur dans la fosse C. Seul le dernier horizon (175-190cm) possède une CEC/Argile plus faible de l'ordre de **46 cmol/kg** (figure 3.9c). On observe la même variation de CEC/Argile dans la fosse D (excepté pour l'horizon SCi) (figure 3.9d).

Le rapport **fer libre sur fer total** varie de **0,45 à 0,55** jusqu'à 1,60 m de profondeur dans la fosse C (tableau 3.3). Il est **nettement plus faible** (0,39) à 1,80 m de profondeur. L'augmentation de ce rapport jusqu'à 1,60 m de profondeur puis sa diminution est à mettre en relation avec les nombreuses **taches et nodules de FeO** qui apparaissent en profondeur et disparaissent à 1,80 m (cf. description détaillée).

Le rapport Manganèse facilement réductible sur Manganèse total (**MnFR**)/(**MnT**) est compris entre **0,45** et **0,57** dans l'ensemble argilo-limoneux supérieur. Le rapport augmente ensuite progressivement avec la profondeur pour atteindre **0,77** dans les deux derniers horizons (145-175cm et 175-190cm) (tableau 3.3). Cette **augmentation** du rapport MnFR/MnT est à relier à des conditions plus réductrices traduisant un **engorgement temporaire**.

Des matériaux **similaires** ont été mis en évidence lors du tracé de l'autoroute A10 entre Artenay et Meung-sur-Loire (Macaire, 1972a). Il ressort des coupes réalisées alors, qu'il existe sur le substratum des calcaires de Beauce, des **placages sablo-argileux** appartenant à la formation des sables et argiles de la Sologne et de l'Orléanais. On peut trouver des matériaux limono-argileux sur ces placages sablo-argileux et le passage entre ces deux formations se fait de façon **progressive**, les couleurs passant des teintes **10 Y/R** aux teintes **7,5 Y/R**. Selon Macaire (1972a), "les profils sont alors **complètement décarbonatés** et ils présentent un "ventre" d'accumulation d'argile". Sur le calcaire de Beauce, le matériau argilo-limoneux est **pauvre en sable** alors que sur les formations sablo-argileuses, la teneur en sable grossier des matériaux argilo-limoneux **augmente** en profondeur (Macaire, 1972b).

III-2.3 Minéralogie de la fraction argileuse

Ces analyses ont été réalisées sur **cinq** échantillons de la fosse C répartis selon la profondeur : horizons 28-33cm, 42-53cm, 66-82cm, 110-145cm et 175-190cm. La préparation des échantillons est identique à celle de la fosse A. Les **diffractogrammes** effectués sur dépôts orientés montrent la présence de minéraux argileux de type **smectite** (raie 001 à 1,45 nm à l'humidité relative du laboratoire, à 1,75 nm après traitement à l'éthylène-glycol et à 1,0 nm après chauffage à 400°C), **illite** (raie 001 à 1 nm et 002 à 0,5 nm), **kaolinite** (raie 001 à 0,72 nm à l'humidité relative du laboratoire, pas de gonflement après traitement à l'éthylène-glycol et disparition par destruction entre 400 et 550°C) (figures 3.10a, b, c, et d) et la présence de **quartz** (raie 101 à 0,333 nm et 100 à 0,426 nm), de **goethite** (raie 101 à 0,416 nm) et de **feldspath potassique** (raie à 0,325 nm).

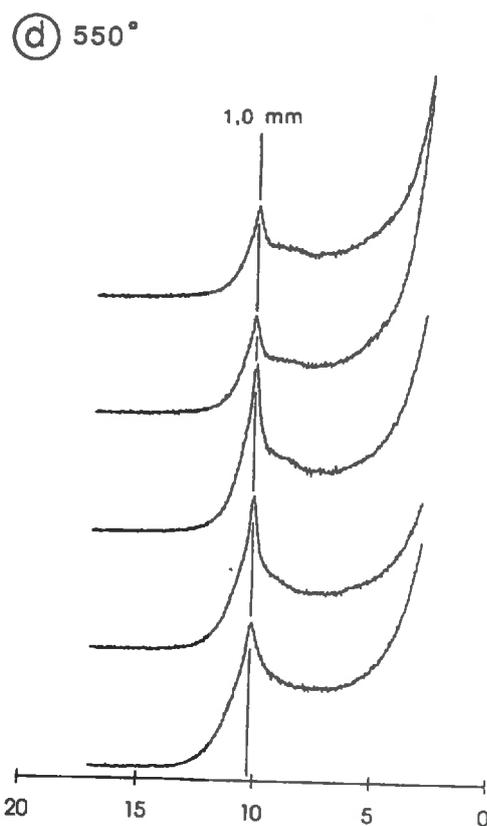
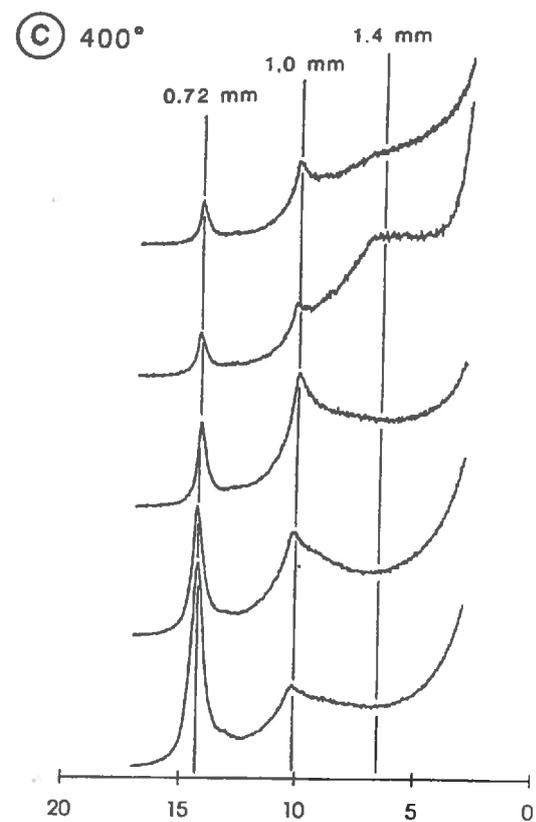
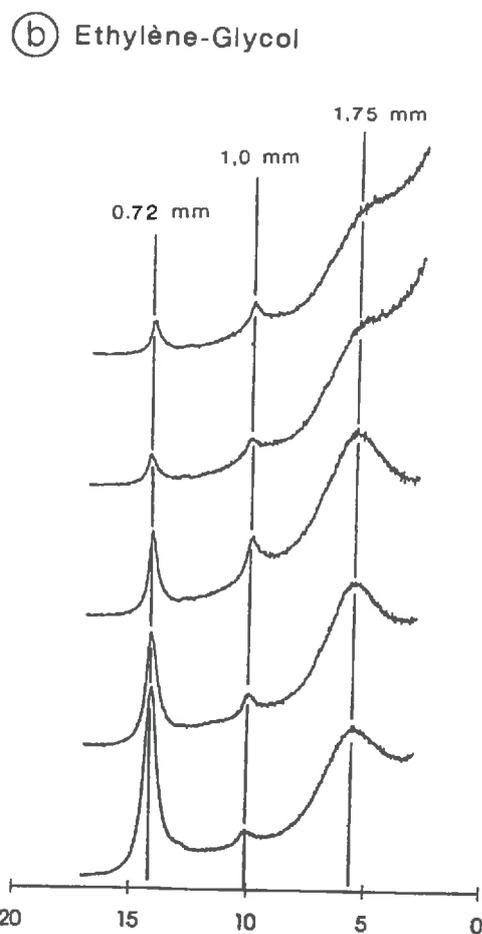
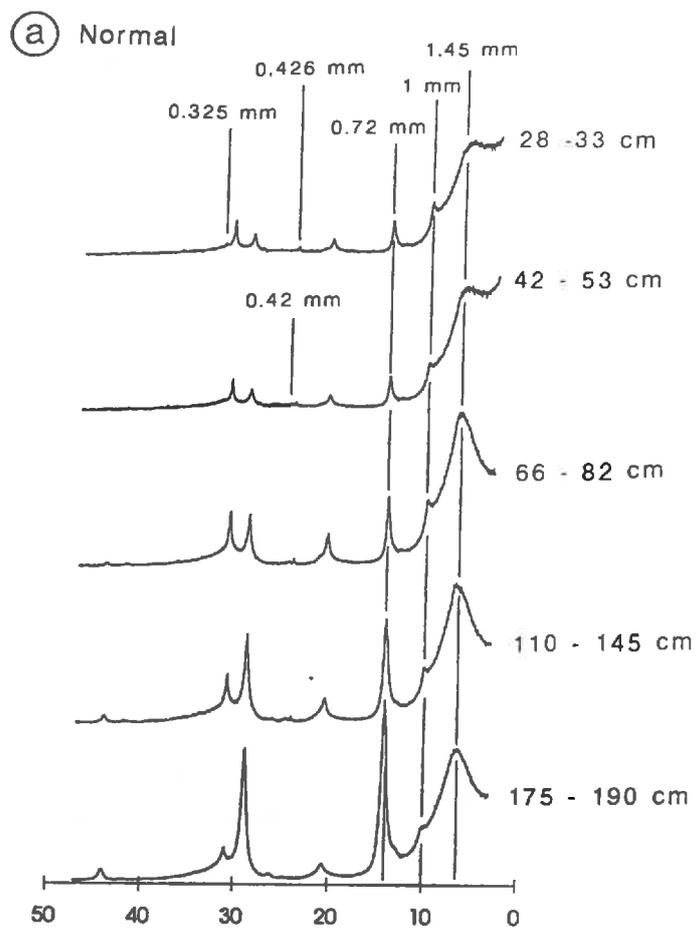


Figure 3.10 : Diffractogrammes RX obtenus à partir de dépôts orientés de la fraction $< 2\mu\text{m}$ décarbonatée (horizons LS3, SCi2, IISci2, IIICg₁ et IIICg₃ de la fosse C).

FOSSE C

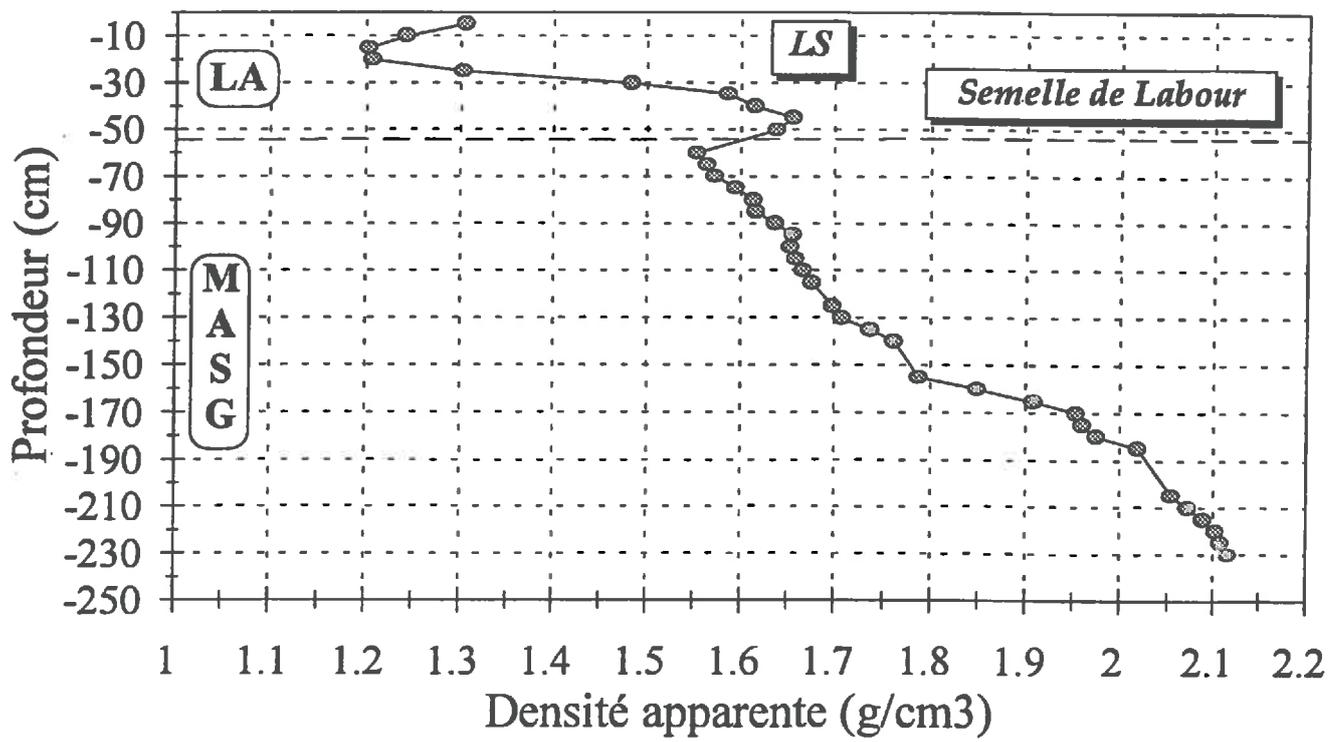


Figure 3.11 : Profil de densité apparente (fosse C).

Les minéraux argileux mis en évidence par les analyses minéralogiques sur la fosse C sont les **mêmes** que ceux rencontrés sur la fosse A. Les minéraux non argileux sont représentés par le quartz et les feldspaths potassiques qui sont présents dans **tous** les échantillons **excepté** pour l'échantillon 66-82 cm pour lequel on a d'ailleurs mis en évidence la présence de **goethite**. L'intensité des raies caractéristiques des minéraux argileux indiquerait une **augmentation** du rapport kaolinite sur minéraux argileux de type 2:1 avec la profondeur et la proportion de kaolinite deviendrait **très élevée** dans l'horizon 175-190 cm.

Le rapport **CEC/Argile** de la fosse C est cohérent avec les résultats de l'analyse minéralogique mais **ne permet pas** de confirmer une éventuelle évolution de la proportion entre les différents minéraux avec la profondeur comme le suggère l'allure des diffractogrammes X. La faible valeur du rapport CEC/Argile mise en évidence pour l'horizon 175-190 cm est à mettre en relation avec l'**augmentation** très nette d'intensité des raies de la **kaolinite** sur les diffractogrammes.

III-2.4 Densité apparente

Le profil de **densité apparente** réalisé sur la fosse C (figure 3.11) montre que la densité apparente dans l'horizon **cultivé (LS)**, est comprise entre **1,2 et 1,3** et entre **1,5 et 1,6** à la **base** de cet horizon (semelle de labour). Le reste du profil présente une **augmentation constante** de la densité apparente avec la profondeur pour atteindre des valeurs de l'ordre de 2,1 à 2,3 m de profondeur. Ces valeurs élevées sont à mettre en relation avec une teneur en **sable grossier élevée** au sein d'une matrice argileuse **compacte**.

III-2.5 Conclusion

Les observations réalisées sur les fosses C et D mettent en évidence, comme pour les fosses A et B, la présence d'un **matériau limono-argileux supérieur**. En revanche, à la différence des fosses A et B, le matériau limono-argileux **ne repose pas** sur des matériaux calcaires cryoturbés mais sur un ensemble de **matériaux argilo-sableux** à sablo-argileux très hétérogène à **sables grossiers**. Les critères de différenciation sont d'ordre **morphologiques** (passage des teintes 10YR à 7,5YR) et **granulométriques** avec l'apparition d'éléments grossiers de 2 à 5 mm sous forme de gros grains de quartz sub-automorphes et l'absence presque totale (< 2,5%) de sables grossiers quartzeux jusqu'à 60 cm de profondeur puis leur teneur croissante avec la profondeur. Les matériaux argilo-sableux à sablo-argileux sont à rapprocher de ceux étudiés par Macaire (1972a et 1972b).

A noter la présence, à la base des horizons limono-argileux, d'un horizon de teneur en argile nettement plus élevée (**36 à 39%**) que pour les horizons constituant l'ensemble limono-argileux (**30 à 33%**), mais en revanche de teneur en sables grossiers voisine de celle

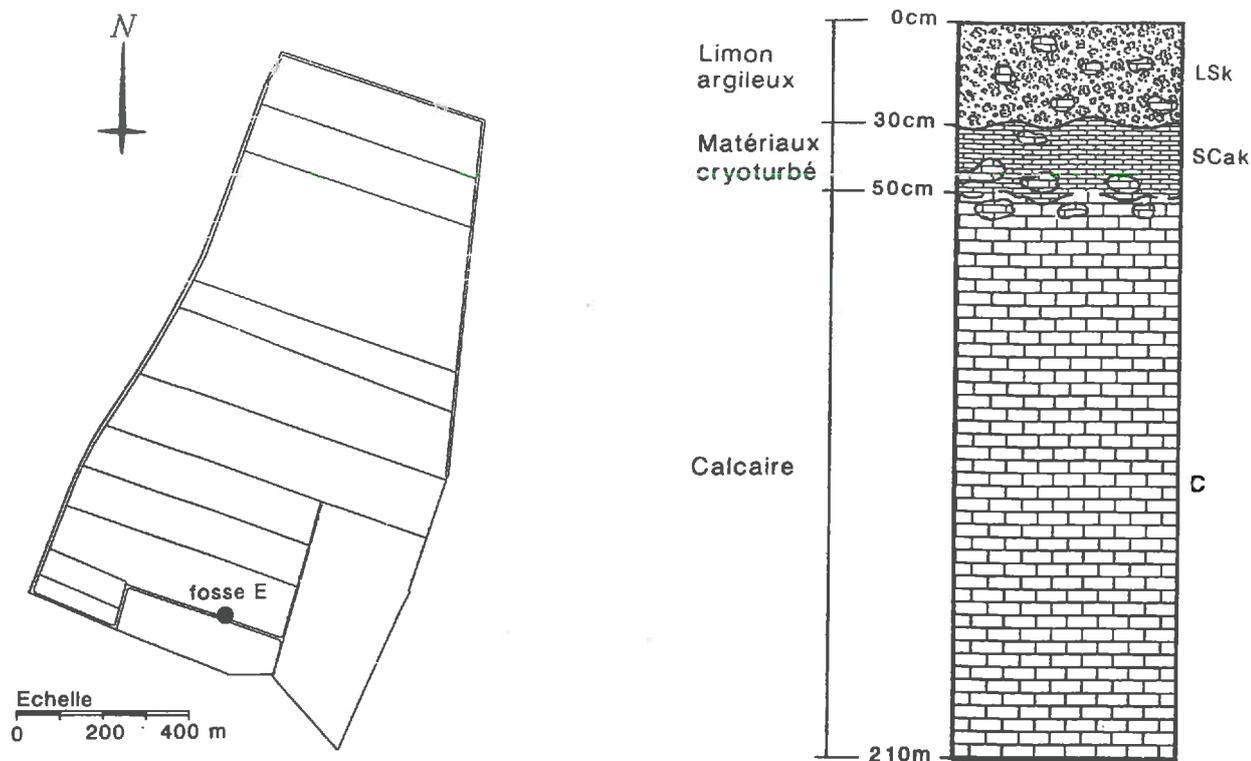


Figure 3.12 : Localisation et description de la fosse E.

Prof. en cm	Horizon	pH eau	C.Org. g/100g	N.Tot. g/100g	C.E.C cmol/kg	Ca ²⁺ cmol/kg	Na ⁺ cmol/kg	Mg ²⁺ cmol/kg	K ⁺ cmol/kg	Sbase cmol/kg	FeL g/100g	FeL FeT en %	MnFR g/100g	MnER MnT en %
00-30	LSk	-	-	-	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30-50	SCak	-	-	-	14.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Prof. en cm	Horizon	CaCO ₃ g/100g (terre fine)	E.G g/100g (terre tot.)	(1) Granulométrie après décarbonatation en pourcent de terre fine totale					(2) Granulométrie après décarbonatation en pourcent de terre fine non calcaire					
				A en %	LF en %	LG en %	SF en %	SG en %	Total en %	A en %	LF en %	LG en %	SF en %	SG en %
00-30	LSk	2.7	1.5	32.7	30.8	30.9	1.8	1.2	97.3	33.8	31.6	31.7	1.8	1.2
30-50	SCak	28.4	16.2	24.1	23.7	21.1	1.6	1.3	71.8	33.6	33.0	29.4	2.2	1.8

Tableau 3.5: Résultats des analyses physico-chimiques de la fosse E

rencontrée pour ces derniers (1,5 à 2,5%). La présence de cet horizon sera discutée ultérieurement à partir de données complémentaires.

III.3 Sol peu épais développé dans des matériaux limono-argileux sus-jacents à un substrat calcaire dur (Fosse E).

Cette situation est **peu fréquente** sur le secteur d'étude puisqu'elle n'a été rencontrée que pour environ **7%** des sondages à la tarière. Ces sondages sont localisés essentiellement aux limites Nord et Sud du secteur. La fosse E a été ouverte dans ce type de situation (figure 3.1).

III-3.1 Description morphologique

Le sol observé dans la fosse E est développé dans des matériaux limono-argileux **très peu épais** (environ 30 cm), riches en **cailloux et graviers calcaires** (effervescence généralisée à HCl). Le substrat calcaire dur limite toute pénétration mécanique. Ce type de sol est un Calcosol (référence RP, 1992) ou un Cambisol calcaire à phase lithique (FAO-Unesco, 1989).

Description détaillée de la fosse E (figure 3.12) :

00-30cm : (LSk) Horizon brun jaune foncé (10YR4/4) ; limono-argileux à argilo-limoneux ; effervescence généralisée ; nombreuses racines ; peu compact ; structure polyédrique sub-anguleuse (10mm) nette ; présence de quelques cailloux et graviers calcaires (env.3%) ; limite ondulée avec l'horizon suivant.

30-50cm : (SCak) Horizon brun jaune (10YR5/4) et beige foncé (10YR6/4) ; limono-argileux à argilo-limoneux ; nombreuses racines ; effervescence généralisée ; présence d'éléments grossiers calcaires (graviers et cailloux, env. 20%) ; structure polyédrique nette (12mm) ; présence de petits nodules calcimagnésiques durs et d'un pseudo-mycélium calcaire abondant ; limite irrégulière avec l'horizon suivant.

50-60cm : (RCa) Horizon beige et blanc ; très calcaire ; pas de racines ; très compact et difficilement pénétrable.

III-3.2 Résultats des analyses physico-chimiques

Les analyses granulométriques effectuées font apparaître une **similitude** de composition de la fraction minérale **non carbonatée** pour les deux horizons étudiés (Tableau 3.5). La teneur en argile est voisine de 34% et celle en sable est comprise entre 3 et 4%. La différenciation essentielle est liée à la teneur en CaCO_3 et la charge en **cailloux**. La capacité d'échange cationique (CEC) rapportée à l'argile après décarbonatation est voisine de **57**

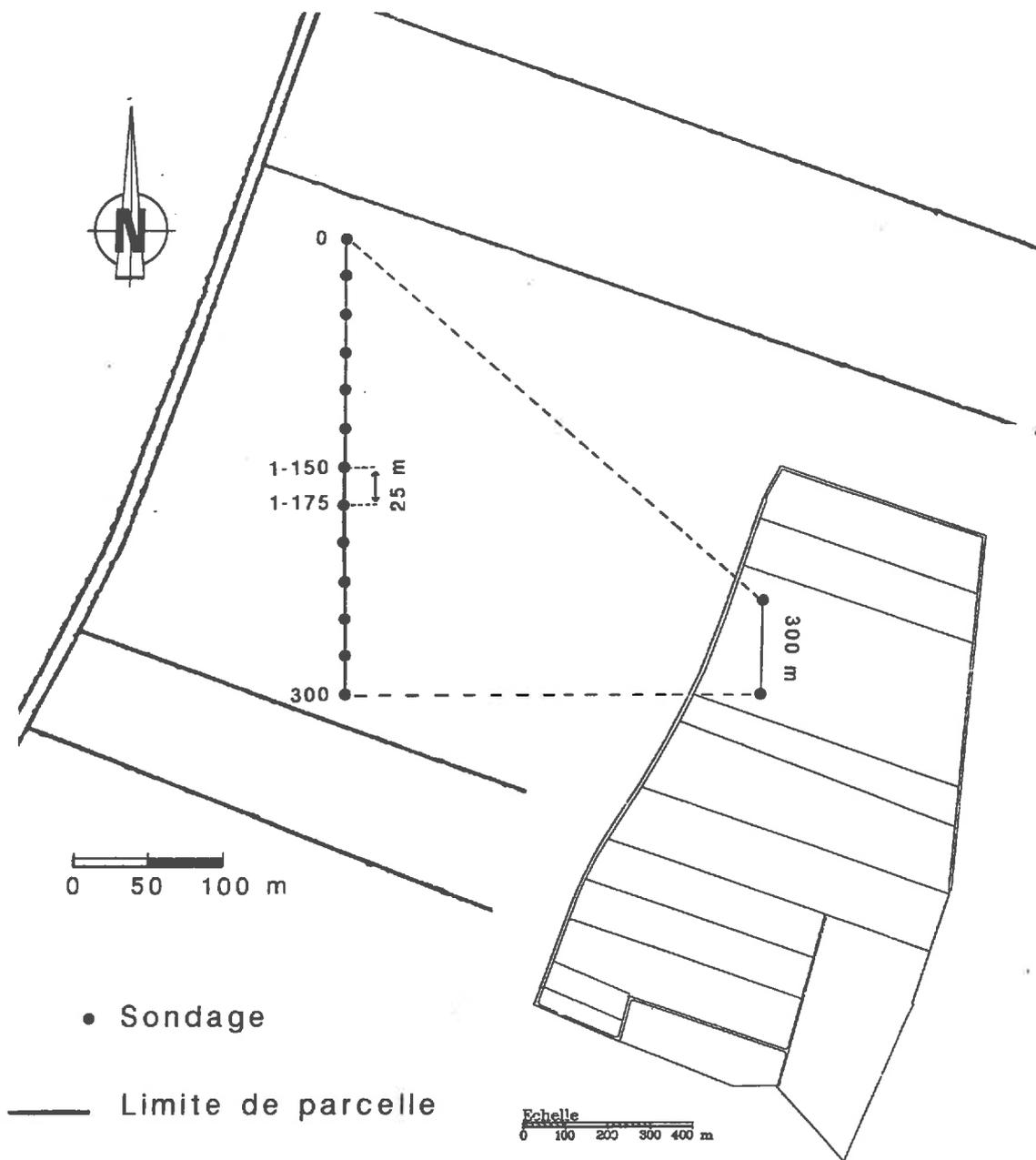


Figure 3.13 : Situation des sondages réalisés dans les matériaux argilo-sableux.

cmol/kg pour les deux horizons (Tableau 3.5).

III-3.3 Conclusion

La phase minérale non carbonatée de la fosse E présente une **composition proche** (granulométrie, CEC/Argile) de celle enregistrée pour les horizons limono-argileux et argilo-limoneux (horizons S_{Ca} et S_{Cak}) des fosses A, B, C et D. Les différences sont **essentiellement** liées à la **charge en cailloux** (très influencée par le travail du sol) et la teneur en **carbonates** de la terre fine. La fosse E correspondrait alors à un sol développé dans un matériau limono-argileux très peu épais (< 30 cm), et enrichie en graviers et cailloux calcaires par le travail du sol.

IV. VARIABILITE DE CONSTITUTION GRANULOMETRIQUE DES MATERIAUX LIMONO-ARGILEUX ET ARGILO-SABLEUX

L'objectif de ce paragraphe est de prendre en compte des analyses granulométriques **complémentaires** concernant le matériau limono-argileux omniprésent sur le secteur d'étude et les matériaux argilo-sableux à sablo-argileux de manière à **vérifier l'homogénéité** de constitution du matériau limono-argileux supérieur et à **préciser les caractéristiques** des matériaux argilo-sableux à sablo-argileux qui lui sont sous-jacents en certains points du secteur. Ces analyses complémentaires rendront plus aisée la **distinction** entre ces deux types de matériaux lors de l'étude des variations d'épaisseur de la couverture limono-argileuse.

IV-1 Constitution granulométrique des matériaux argilo-sableux à sablo-argileux

Des sondages profonds à la tarière ont été réalisés de manière à décrire la **succession verticale** précise et la nature des matériaux argilo-sableux rencontrés dans la partie centrale du secteur d'étude. Ces sondages ont été effectués **tous les 25 m**, le long d'une ligne orientée Nord-Sud qui recoupe perpendiculairement cette zone centrale (figure 3.13).

IV-1.1 Description de la coupe

La coupe obtenue (figure 3.14) permet de retrouver la **succession** des matériaux que nous avons déjà définis dans ce chapitre. Cette succession est définie par un matériau argilo-limoneux sus-jacent au calcaire de Beauce avec, par endroits, des **intercalations** de matériaux argilo-sableux à sablo-argileux. Ces matériaux argilo-sableux sont très **hétérogènes**, mais il

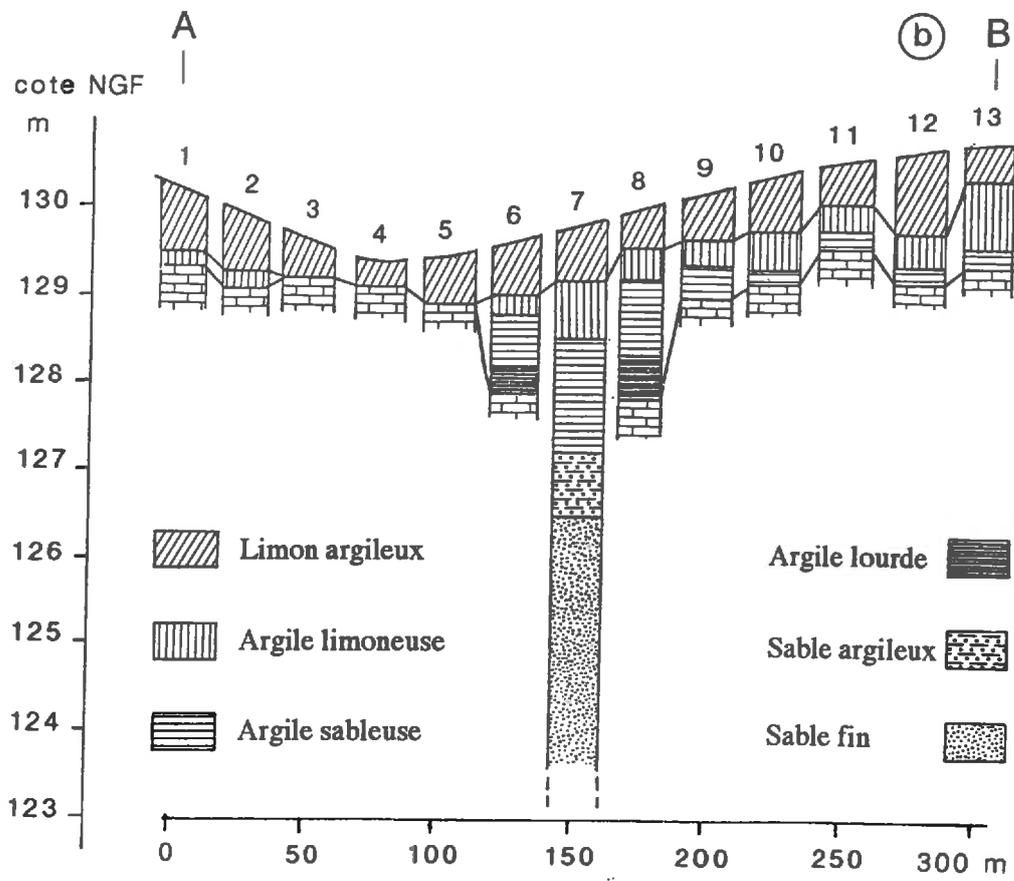


Figure 3.14 : Description des sondages réalisés dans les matériaux argilo-sableux

est possible de les décrire par une succession de types de matériaux, c'est-à-dire, par profondeur croissante :

- des matériaux argileux à sables grossiers
- des argiles sableuses
- des sables argileux
- du sable fin gris ou jaune clair avec localement des passées d'argile lourde grise ou jaune.

Ces différents matériaux apparaissent à des profondeurs **variables** entre 40 cm et 1 m. Notons l'**absence** de ces matériaux sur les sondages réalisés à 50, 75 et 100 m où l'on retrouve la succession matériaux limono-argileux sur calcaire. La transition entre le matériau limono-argileux supérieur et les matériaux argilo-sableux à sablo-argileux est, comme pour les fosses C et D, caractérisé par le **passage** des teintes **10 Y/R** aux teintes **7,5 Y/R**.

IV-1.2 Analyses granulométriques

Des **analyses granulométriques** ont été réalisées sur les sondages effectués à 150 m (noté 1-150) et 175 m (noté 1-175). Ces analyses **confirment** les résultats déjà obtenus sur les fosses C et D et en particulier l'**augmentation** avec la profondeur de la teneur en **éléments grossiers quartzeux** (entre 2 et 5 mm) qui marque la **transition** entre le matériau limono-argileux supérieur et les matériaux argilo-sableux à sablo-argileux (figures 3.15).

On constate pour le sondage 1-150 (figure 3.15a), une **augmentation** de la teneur en argile avec la profondeur jusqu'à -150 cm puis une **diminution progressive**. Conjointement, à partir de -150 cm, la teneur en sable **augmente** régulièrement avec la profondeur (figure 3.15a). En deçà de -150 cm, la teneur en sable **reste comprise** entre **5 et 15%**. Ces profils se comportent de la même façon que ceux réalisés sur la fosse C.

En ce qui concerne le sondage 1-175 (figure 3.15b), les profils argileux et sableux sont **nettement différents**. La teneur en argile **augmente** de façon régulière tout au long du profil (excepté à -70 cm) et se **stabilise** vers 90% à partir de -200 cm. Conjointement, la teneur en sable **diminue légèrement** entre 0 et -70 cm, atteint un **maximum** (4,4%) à -90 cm pour **diminuer** ensuite progressivement jusqu'à -240 cm et atteindre 0,7% (figure 3.15b).

IV-1.3 Conclusion

Nous avons, dans ce paragraphe, **caractérisé** de façon plus précise les matériaux AS présents dans la partie centrale du secteur. Une série de sondages à la tarière espacés de 25 m a été réalisée, sur une ligne de 300 m, pour établir une coupe verticale montrant la **succession** des différents matériaux. Les analyses granulométriques effectuées sur deux sondages de cette

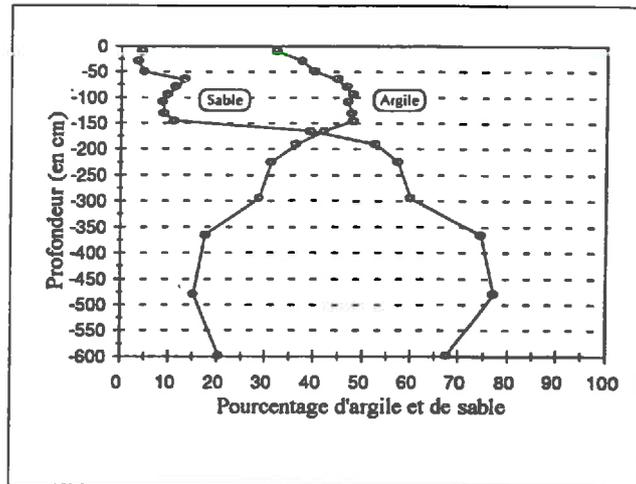


Figure 3.15a : Teneurs en sable et argile du sondage 1-150

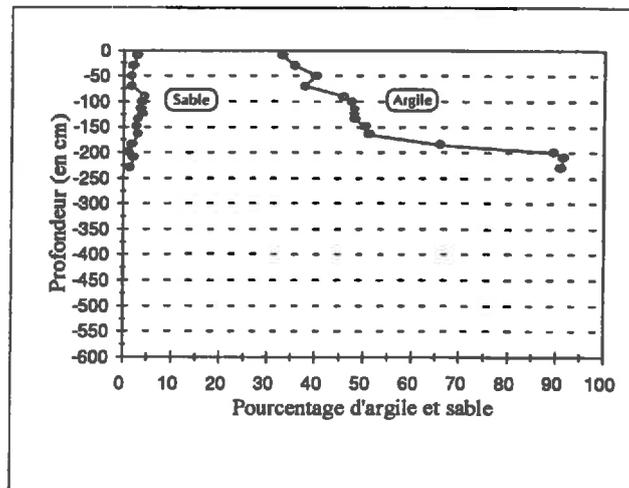


Figure 3.15b : Teneurs en sable et argile du sondage 1-175

Figure 3.15 : Teneurs en sable et argile des sondages 1-150 et 1-175

coupe confirme l'**analogie**, déjà relevée lors de l'étude des fosses C et D, entre les matériaux argilo-sableux à sablo-argileux et les matériaux burdigaliens décrits par Macaire (1971 et 1972) et Gigot (1973) et qui sont contemporains des sables et argiles de Sologne et de l'Orléanais. De même sont confirmés la **transition progressive** et les critères de **différenciation** entre le matériau limono-argileux et les matériaux argilo-sableux à sablo-argileux à savoir : augmentation de la teneur en sables grossiers et en éléments grossiers quartzeux et le passage des teintes 10 Y/R aux teintes 7,5 Y/R. Par contre, le transect réalisé permet de préciser la **variabilité horizontale et verticale** des matériaux argilo-sableux à sablo-argileux.

IV-2 Constitution granulométrique de la couverture limono-argileuse

La présence à la base des horizons limono-argileux d'un horizon de teneur en argile nettement **plus élevée** (36 à 39%) que nous avons mis en évidence lors de l'étude des fosses, est discuté dans ce paragraphe à partir d'un jeu de données plus important qui permettra de mieux cerner cette **variabilité**.

Pour évaluer la teneur moyenne en argile de la couche limono-argileuse superficielle (généralement non calcaire) sur notre secteur d'étude, nous avons utilisé les **analyses granulométriques** déjà accomplies sur les prélèvements issus des différentes fosses ouvertes sur le secteur. Mais le jeu de données ainsi obtenu était insuffisant pour dégager des tendances générales sur la teneur moyenne en argile du LA. A partir de prélèvements accomplis sur 14 sondages à la tarière **uniformément répartis** sur le secteur d'étude (figure 3.16) et des analyses déjà existantes, notre jeu de données comporte **75 analyses granulométriques** réalisées à des profondeurs comprises entre 10 et 90 cm.

IV-2.1 Résultats

Les **résultats** des analyses sont représentés sous forme de tableaux (annexe 1 : tableau I.1 pour les analyses déjà réalisées et tableau I.2 pour les analyses complémentaires). Un histogramme de fréquence des teneurs en argile du limon argileux montre une distribution **bimodale** de cette teneur (figure 3.17). Le premier mode se situe entre **32 et 33%** d'argile et le second entre **36 et 37%**. Cette distribution bimodale laisse supposer **deux populations** distinctes dans le LA.

Nous avons comparé cette teneur en argile avec la profondeur d'échantillonnage (tableaux I.1 et I.2 annexe 1). De manière générale, la teneur en argile a tendance à **augmenter** avec la profondeur. Cependant, la **dispersion** de la première population (A%<34%) est plus importante que la première.

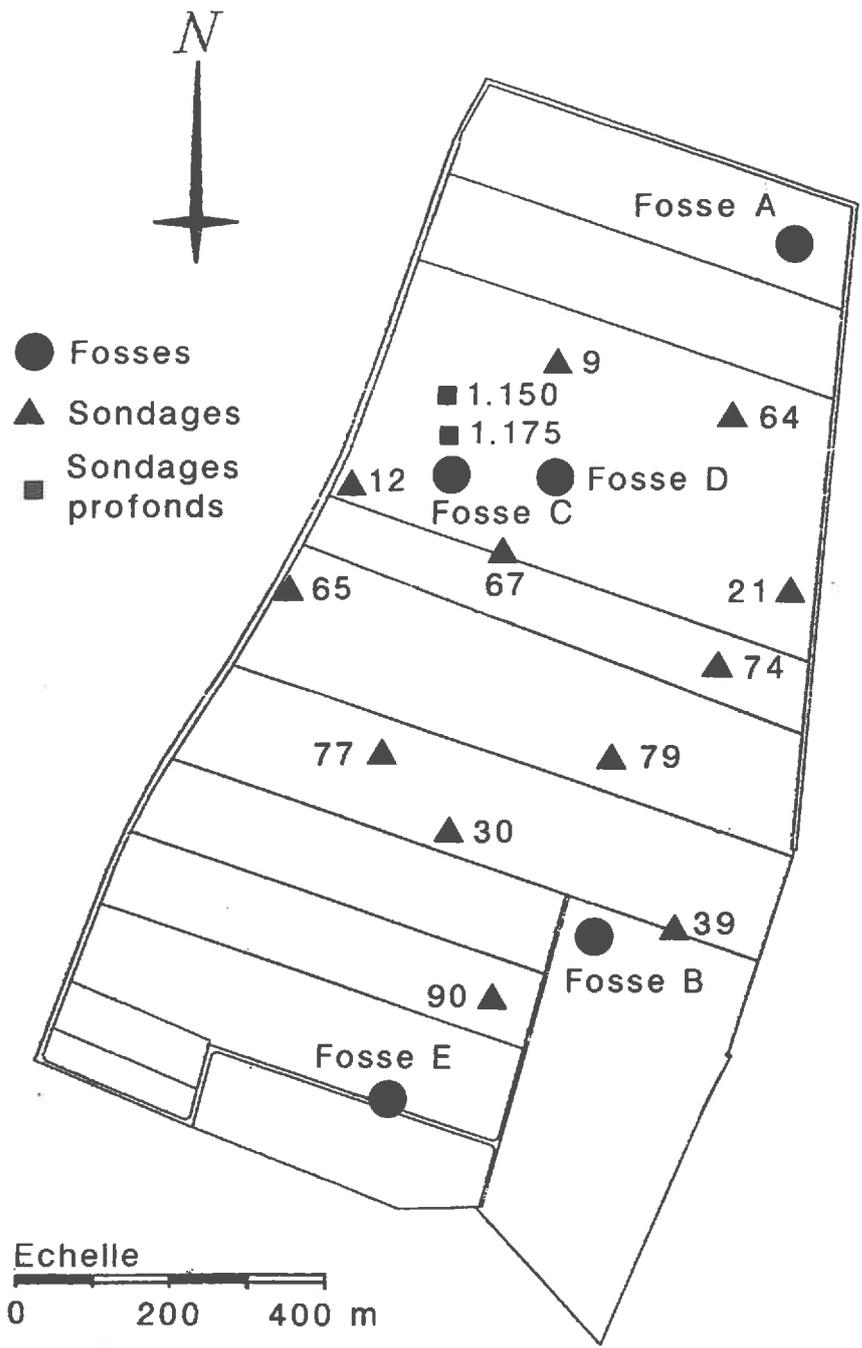


Figure 3.16 : Localisation des prélèvements pour les analyses granulométriques complémentaires.

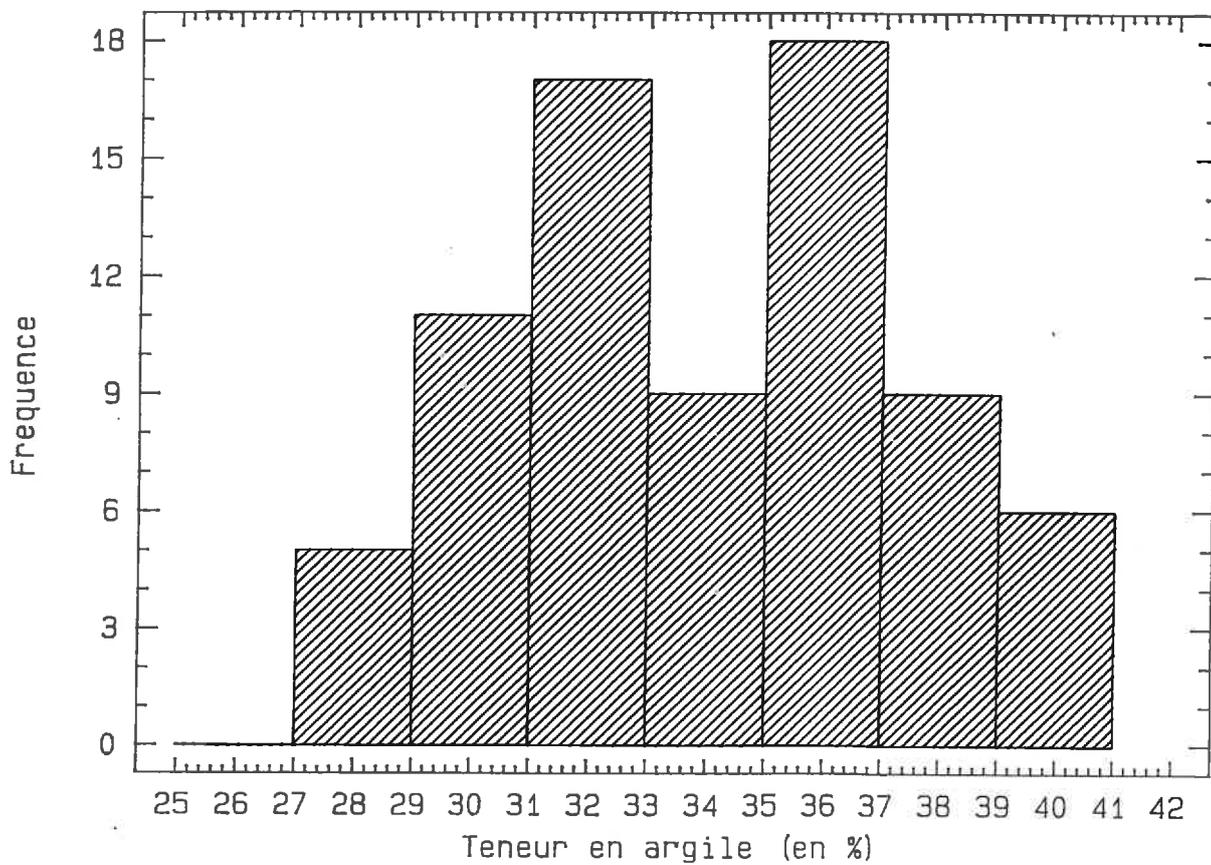


Figure 3.17 : Histogramme de fréquence des teneurs en argile du LA.

Le tableau 3.6 précise cette constatation. On constate qu'en séparant la population initiale par la valeur 34%, on obtient deux populations **distinctes** pour lesquelles moyenne, médiane et mode sont **semblables**. D'autre part, les écarts-types de ces populations sont **similaires** et sont respectivement de 1,8 cm (A%<34%) et de 1,7 cm (A%>34%). De la même manière, nous avons séparé en deux populations les profondeurs d'échantillonnage correspondant aux teneurs en argile inférieures et supérieures à 34%. Pour des teneurs en argile inférieure à 34%, la profondeur moyenne est de -28 cm ± 19,5cm. Pour des teneurs en argile supérieure à 34%, la profondeur moyenne d'échantillonnage est de -54 cm ± 18 cm (tableau 3.6).

	Argile en %	Prof. (cm)	Argile < 34%	Argile > 34%	Prof. pour (A%<34%)	Prof. pour (A%>34%)
N	75	75	37	38	37	38
Moyenne	34	-42	31,1	36,9	-28	-54
Minimum	27,3	-95	27,3	34,1	-95	-95
Maximum	40,2	-10	33,8	40,2	-10	-15
Médiane	34	-40	31,1	36,6	-20	-50
Mode	-	-	30,2	36,6	-15	-50
Ecart-type	3,4	23,9	1,8	1,7	19,5	18

Tableau 3.6 : Statistiques usuelles sur la teneur en argile des horizons LA et la profondeur d'échantillonnage.

IV-2.2 Conclusion

La présence à la base des horizons limono-argileux d'un horizon de teneur en argile **nettement plus élevée** (36 à 39%) que pour les horizons constituant l'ensemble limono-argileux (30 à 33%), mais en revanche de teneur en sables grossiers voisine de celle rencontrée pour ces derniers (1,5 à 2,5%) peut être interprétée de **deux façons**.

Il pourrait s'agir d'un horizon d'**accumulation** d'argile à la suite d'un processus d'illuviation au sein d'une couverture de matériaux limono-argileux discontinue sur les matériaux argileux à sablo-argileux (Macaire, 1972). L'état **saturé** du complexe d'échange dans les horizons sus-jacents ainsi que la **non** mise en évidence de zones appauvries en argile dans ces horizons sus-jacents ne sont toutefois guère en faveur de cette hypothèse.

L'autre hypothèse consiste à **rattacher** cet horizon à teneur en argile plus élevée mais à faible teneur en sables grossiers à l'ensemble de matériaux sablo-argileux qui se caractérise par une teneur en sable grossier nettement supérieure. Aucun argument **décisif** ne peut être avancé en faveur de cette seconde hypothèse, si ce n'est que l'**extrême variabilité** de

composition granulométrique des matériaux sablo-argileux la rend tout à fait envisageable.

Nous avons choisi de rattacher cet horizon à l'ensemble limono-argileux en prenant comme critère de différenciation la **teneur en sable grossier**, critère qui est le plus caractéristique et le plus facile à appréhender tant sur le terrain qu'après les analyses. D'autre part, le **squelette granulométrique** de cet horizon est du **même type** que celui de l'horizon limono-argileux supérieur ce qui conforte l'hypothèse précédente.

Quelle que soit son origine, l'existence de cet horizon intermédiaire rend **délicate** l'identification sur le terrain de la limite entre l'ensemble limono-argileux et l'ensemble de matériaux argilo-sableux à sablo-argileux.

V. DISCUSSION

L'étude de fosses a montré la **faiblesse** des différenciations verticales au sein du LA, seul le profil vertical des teneurs en carbonate est très nettement **différencié**. En revanche, cette étude nous a permis de caractériser les différents matériaux rencontrés sur le secteur d'étude. Ces matériaux ont été regroupés en **quatre grands types** qui vont être présentés au cours de cette discussion.

V-1 Matériaux limono-argileux (LA)

Ce matériau, d'épaisseur **variable** (exceptionnellement 130 cm, généralement de 50 à 60 cm) recouvre l'ensemble du secteur. C'est au sein de ce matériau que ce différencie le sol actuel. Ce matériau est constitué d'horizons limono-argileux, avec une **variation significative** de la teneur en argile avec la profondeur dans la fraction non carbonatée. La **couleur** varie du brun foncé au brun jaune foncé en fonction de la profondeur. Cette variation de couleur est vraisemblablement à mettre en relation avec celle de la teneur en **matière organique**. Les analyses granulométriques montrent que la teneur en argile de la fraction non carbonatée est comprise entre **30 et 33%** pour une profondeur moyenne de 30 cm et entre **35 et 39%** pour une profondeur moyenne de 55 cm. La fraction sableuse (sables fins et grossiers) varie entre 1 et 4%. Il existe néanmoins une faible différence entre les fosses A et B (1 à 2,5% de sable) et les fosses C et D (env. 4% de sable). Les horizons présents en surface sont généralement **décarbonatés** lorsque le substrat calcaire est suffisamment profond (> 30 cm). Les carbonates apparaissent ensuite en profondeur sous formes de sables grossiers et graviers carbonatés et de pseudo-mycélium.

A la base de l'ensemble limono-argileux, on observe fréquemment la présence d'un

encroûtement calcaire comme sur la fosse A. Un tel encroûtement calcaire a aussi été observé par Ould-Mohamed (1991) au niveau de la carrière des Sapins Dousset et lors des travaux de cartographie par Isambert et Duval (1992). Il faut par ailleurs noter que cet encroûtement n'est que **très difficilement** identifiable lors de sondages à la tarière. De couleur blanche et peu épais (5 à 10 cm), cet encroûtement présente un aspect soit tuffeux, soit lité et constitue un **obstacle** pour la propagation des racines (Nicoullaud, 1993, communication personnelle). Lorsque le substrat calcaire est **proche** de la surface (< 30 cm), les horizons limono-argileux sont carbonatés dès la surface comme pour la fosse E. Il s'agit très vraisemblablement d'une **recarbonatation secondaire** à la suite de la mise en culture. Ainsi rien ne semble s'opposer à une **origine commune** pour les phases minérales non carbonatées des matériaux limono-argileux rencontrés dans les différentes fosses.

Le **complexe adsorbant** est en majeure partie **saturé** par l'ion Ca^{2+} . Seuls les horizons superficiels de la fosse C ne le sont pas. La structure est généralement très nette, de type polyédrique sub-anguleuse à polyédrique fine.

Les **analyses minéralogiques** réalisées sur la fraction < 2 μm des échantillons des fosses A et C et sur celles des échantillons des sols du site des Sapins Dousset (Ould-Mohamed, 1991) montrent la présence de minéraux argileux 2/1 de type **smectite** et **illite** et de minéraux de type **kaolinite** sans qu'aucun de ces minéraux ne domine. Ces résultats sont **cohérents** avec les valeurs de CEC.

Les mesures de **densité apparente** sur les matériaux limono-argileux ont montré une variabilité comprise entre 1,2 et 1,4 pour les horizons superficiels et jusqu'à 1,6 pour les horizons limono-argileux plus profonds de la fosse C. Les mesures de densité apparente réalisées sur le site des Sapins Dousset (Ould-Mohamed, 1991) complètent notre jeu de données et permettent de déterminer une **densité apparente moyenne du LA**. Nous avons évalué cette densité apparente moyenne à 1,4.

V-2 Matériaux cryoturbés (PC)

Les matériaux cryoturbés, de couleur claire, sont généralement organisés en **poches**. Ces matériaux sont très hétérogènes ; des matériaux limono-argileux calcaires sont présents, principalement dans la partie supérieure, ainsi que de nombreux **cailloux calcaires** incorporés dans les poches. Ces matériaux cryoturbés ont été observés dans les fosses A et B. Après décarbonatation, ils peuvent présenter des textures très argileuses (40 à 86% d'argile) comme dans la fosse A (tableau 3.1), mais peuvent aussi présenter des textures voisines de l'ensemble limono-argileux supérieur (33%) d'argile comme dans la fosse B (tableau 3.2). Compte tenu de la faible proportion de fraction non carbonatée, les autres caractéristiques de la constitution ne sont connues que de façon très imprécise. Des précipitations de **calcaire secondaire** ont été identifiées au sein même de ces poches sous forme de **pseudo-mycélium**. La limite supérieure

de cet ensemble avec les matériaux limono-argileux est **très nette** au niveau des fosses A et B avec parfois un encroûtement calcaire. Cet ensemble montre une **minéralogie hétérogène**, tant du point de vue qualitatif que quantitatif (Ould-Mohamed, 1991).

V-3 Matériaux calcaires non affectés par la cryoturbation

Les matériaux calcaires aquitaniens **non cryoturbés** sont soit directement sous-jacents à l'ensemble limono-argileux supérieur, soit beaucoup plus fréquemment, sous sous-jacents aux matériaux cryoturbés. De couleur beige, très difficilement pénétrable à la tarière, ils peuvent présenter des faciès **pulvérulents** (carrière des Sapins Dousset) ou des faciès à **granules gris bleutés** (sondages à la tarière). L'étude de ces calcaires a été limitée par des difficultés de creusement dès lors qu'on les atteint.

V-4 Matériaux argilo-sableux à sablo-argileux à sables grossiers

Présents au niveau des fosses C et D, ces matériaux sont caractérisés par l'**absence totale** de carbonates et par des textures soit plus argileuses, soit plus sableuses que pour les horizons appartenant aux matériaux limono-argileux supérieurs. Les analyses granulométriques montrent que la teneur en argile varie de 14 à 58% et celles en sable grossier de 4 à 60%. De manière générale, la **teneur en argile décroît** avec la profondeur alors que **croît** celle en **sable grossier**. Dans la partie supérieure, en contact avec l'ensemble limono-argileux qui le surmonte, ces matériaux présentent de **très nombreux grains de quartz sub-automorphes** à éclat gras. Des passées argileuses pouvant contenir jusqu'à 90% d'argile existent dans les horizons plus sableux plus profonds en alternance avec des poches de sables à gros grains de quartz. La **couleur** de ces matériaux **varie** du brun rougeâtre pour les matériaux argileux (40 à 50% d'argile) au brun rouille, voire orangée, pour les matériaux plus sableux. Les passées argileuses sont de couleur jaune, verte ou gris bleutée. Les poches sableuses sont principalement jaunes, blanches ou grises. De nombreux **nodules** d'oxydes de fer et/ou de manganèse témoignent d'un **engorgement temporaire** au niveau de la partie supérieure de ces matériaux. La CEC est **élevée** dans les horizons les plus argileux. La limite supérieure avec les matériaux limono-argileux est **très peu nette**. Une distinction précise n'est possible qu'après analyse granulométrique. Toutefois, la présence de sables grossiers, de gros grains de quartz et la couleur brun rougeâtre permet sur le terrain de **localiser** la **limite** entre ces matériaux argileux à sables grossiers et les matériaux limono-argileux qui les surmontent. Les analyses minéralogiques effectuées sur les échantillons issus des différents horizons de la fosse C montrent une **différenciation** des minéraux argileux avec la profondeur. Ces minéraux sont de type **smectite, kaolinite et illite**. La proportion d'illite, présente dans les horizons superficiels, **diminue** avec la profondeur alors que le rapport kaolinite sur smectite **augmente fortement** avec la profondeur avec une proportion de kaolinite très élevée dans le dernier horizon. La présence de quartz et de goethite est à signaler mais dans des proportions différentes de

l'ensemble limono-argileux supérieur. Ces matériaux déjà décrits lors du tracé de l'autoroute A10, appartiennent à la formation des **sables et argiles de Sologne et de l'Orléanais**.

VI. CONCLUSION DU CHAPITRE 3

Dans l'ensemble, ces matériaux sont **similaires** à ceux décrits par Macaire (1972a et b) et Ould-Mohamed (1991). Seul le substrat calcaire dur est nettement différent. Cependant, la présence des **matériaux argileux à sables grossiers** constitue un élément supplémentaire pour la prise en compte des transferts d'eau et de solutés. L'étude détaillée des différentes successions pédologiques du secteur de Liconcy que nous venons de réaliser va nous permettre, pour la suite de ce travail, de les **différencier** et de les **délimiter**. Nous allons donc, dans une deuxième partie, localiser et délimiter chacun de ces ensembles pour pouvoir isoler l'**ensemble limono-argileux** sur lequel se portera l'étude des transferts d'eau et de solutés.

Deuxième Partie

Variation d'épaisseur de la Couverture de Sol

Il ressort de l'étude des fosses pédologiques que le sol se serait différencié dans un recouvrement limono-argileux calcaire de **faible épaisseur**. La couverture de sol se **confondant** avec le recouvrement limono-argileux, l'étude des **variations d'épaisseur** de la couverture de sol consiste à étudier celles de la **formation limono-argileuse**.

La deuxième partie de ce travail a donc pour principal objectif de décrire les variations d'épaisseur de la formation limono-argileuse. Après avoir effectué quelques rappels à propos des méthodes d'interpolation, un **premier** ensemble de données obtenu par **sondages mécaniques** sera présenté et discuté.

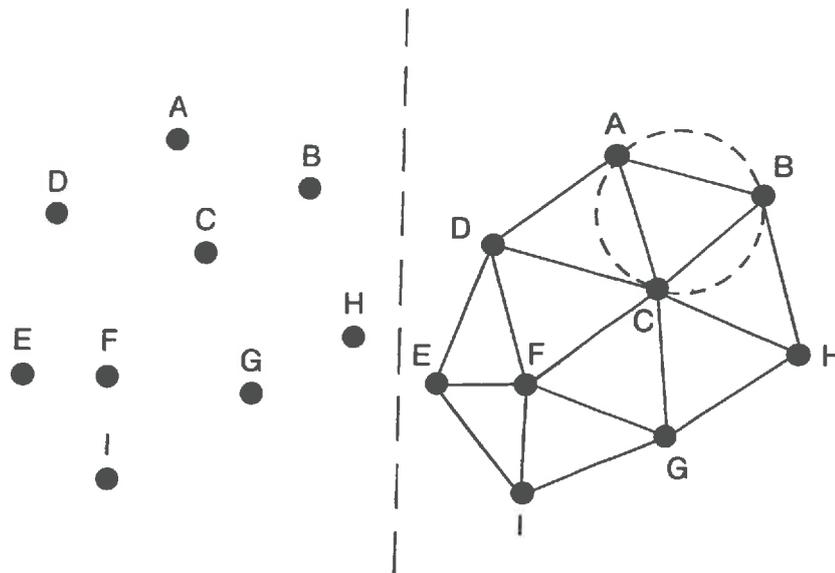
La proportion non expliquée de **variabilité de l'épaisseur** demeurant élevée à la suite de plusieurs campagnes de sondages mécaniques, nous avons cherché à obtenir une information moins locale que lors des sondages mécaniques, **très ponctuels**, en mettant en oeuvre des techniques qui procèdent de la **géophysique**.

Les observations pédologiques ont aussi mis en évidence la présence de matériaux argilo-sableux à sablo-argileux **intercalés** entre la formation limono-argileuse et le calcaire aquitainien. Les matériaux argilo-sableux à sablo-argileux modifient très vraisemblablement le **fonctionnement hydrique hivernal** de la couverture de sol en **limitant le drainage** vers l'aquifère. La **caractérisation** des matériaux argilo-sableux à sablo-argileux ainsi que leur **délimitation** sont par conséquent nécessaires dès lors que l'on étudie le fonctionnement hydrique de la couverture de sol.

C'est dans un troisième chapitre que les matériaux argilo-sableux à sablo-argileux seront étudiés en combinant les résultats de la campagne de **sondages mécaniques** et ceux de la **prospection géophysique** au sein d'un **système d'information géographique**.

**RAPPEL ET MISE EN OEUVRE
DES METHODES D'INTERPOLATION
ET DES METHODES STATISTIQUES**

La deuxième partie de ce travail a pour principal objectif de **caractériser les variations d'épaisseur** de la couverture de sol qui se confond avec le recouvrement limono-argileux. L'**interpolation spatiale** des données d'épaisseur sera faite par différentes méthodes. Des méthodes **non probabilistes** (interpolation par fonctions polynomiales) ou **probabilistes** (variographie, krigeage) seront ainsi utilisées. L'**objectif** de ce chapitre est de **rappeler les différentes méthodes d'interpolation** que nous allons employer et d'**expliquer** leur mise en oeuvre dans ce travail. Les résultats seront donnés sous forme de cartes comparées et validées par différentes méthodes.



- A : point échantillonné
- : cercle circonscrit au triangle ABC

Conditions de Delaunay :

- 1- Chaque point constitue un sommet de triangle
- 2- Les triangles sont le plus équilatéraux possible
- 3- Les cercles circonscrits aux triangles ne contiennent pas d'autre point.

Figure 4.1 : Elaboration d'un réseau de triangles respectant les conditions de Delaunay pour la réalisation d'un TIN (Triangle Irregular Network).

I. METHODES D'INTERPOLATION SPATIALE

L'interpolation spatiale d'une variable revient à **estimer celle-ci en un lieu quelconque** à partir des valeurs **mesurées** en un certain nombre de points. Il est alors possible de **cartographier** une variable spatialement répartie à partir d'un échantillonnage discret (Voltz, 1986). De nombreuses techniques existent, elles ont été décrites de façon détaillée notamment par Delhomme (1976) et Webster (1977).

I-1 Méthodes non probabilistes

I-1.1 Analyse et traitement préalable du jeu de données

Dans un premier temps, il est important de considérer le jeu de données dont on dispose. Nous n'exposerons pas ici les différentes **stratégies d'échantillonnage** pouvant être mises en oeuvre (Mc Bratney et al., 1981a et 1981b ; Russo, 1984 ; Webster et Oliver, 1990), mais nous distinguerons **deux types** de jeux de données : ceux qui obéissent à une **logique de répartition** dans l'espace et ceux dont les points de mesures sont répartis de façon **aléatoire**. De ceci dépendront le type d'interpolation à utiliser et surtout les résultats obtenus.

Avec un jeu de données dont les points échantillonnés sont **bien espacés et peu nombreux**, la méthode d'interpolation la plus facile à mettre en oeuvre est celle que l'on réalise **manuellement** lorsqu'on interprète en général des données altimétriques ou pluviométriques. Une telle interpolation conduit à la carte d'isovaleur la plus simple. Quand on trace ce type de carte, on interpole entre les points expérimentaux. Par exemple, une courbe isovale 20 passe entre les points de données 10 et 30. Ce type d'interpolation est **sensiblement linéaire** (Delhomme, 1976). Toutefois, si le nombre de points expérimentaux est important, la méthode devient très vite fastidieuse et un risque d'erreur apparaît lors de la construction des courbes isovales.

De ce fait, on utilise un autre type d'interprétation similaire mais obtenue en ne considérant que **trois points** de mesure à la fois. On élabore ainsi un **réseau de triangles** à partir d'un point connecté aux **deux plus proches voisins** pour former un triangle. L'élaboration de ce réseau triangulé répond aux critères de la méthode "**Delaunay**" (ESRI USER'S GUIDE, 1991) à savoir que le **cercle circonscrit** au triangle ainsi réalisé ne contient pas d'autre point. D'autre part, les triangles obtenus doivent être le plus possible **équilatéraux** ce qui réduit les problèmes de précision créés par les triangles longs et fins (figure 4.1). Chaque triangle ainsi obtenu possède la valeur de la variable expérimentale en **chacun de ses sommets**. Cette méthode facilite l'**automatisation** des calculs d'interpolation ultérieurs en raisonnant triangle par triangle.

A partir de ce réseau, plusieurs méthodes d'interpolation permettent d'obtenir un **modèle de représentation** de la zone d'étude en mode "raster", c'est-à-dire sous forme d'une grille de maille déterminée par l'utilisateur, chaque maille étant renseignée par la valeur de la variable interpolée.

I-1.2 Interpolation polynomiale

L'interpolation du champ étudié à partir des valeurs mesurées aux points expérimentaux peut être réalisée à l'aide de fonctions mathématiques comme les **polynômes**. On utilise un **ensemble de fonctions** qui sont ajustées chacune à une partie du champ étudié et qui doivent présenter un nombre de termes **compatible** avec l'objectif d'ajustement. Globalement, de telles fonctions s'expriment sous la forme :

$$Z(x, y) = \sum_{j=0}^j \sum_{k=0}^{k-j} q_{jk} \cdot f^{jk}(x, y)$$

où :

- $Z(x, y)$ est la valeur interpolée aux points de coordonnées x et y
- $f^{jk}(x, y)$ sont des fonctions de base retenues pour l'interpolation (ie : $X, Y, X^2, Y^2, XY, \dots$)
- j et k sont les degrés des polynômes
- q_{jk} sont des coefficients calculés de sorte que l'interpolation s'ajuste exactement aux points expérimentaux.

Ce type d'interpolation est valable lorsqu'il y a **régularité spatiale** du phénomène étudié. Dans ce cas, on **contraint** la surface d'ajustement à **passer** par les valeurs expérimentales. Le choix du nombre de fonctions de base et donc du **degré du polynôme** influence l'aspect des cartes interpolées. Plus le degré du polynôme est **élevé** et plus les cartes obtenues ont un aspect **tourmenté**. Mais lorsque le phénomène étudié n'est plus régulier, l'utilisation des méthodes d'interpolation polynomiale n'est plus adaptée.

Parmi ces types de fonctions polynomiales, citons notamment pour mémoire, les **fonctions splines** qui sont l'exemple le plus sophistiqué de l'interpolation polynomiale et l'utilisation de fonctions d'interpolation employées en **différences et éléments finis** (Hutchinson et Walley *in* Delhomme, 1972).

I-1.3 Interpolation par moindres carrés

En ajustant la surface d'interpolation par la méthode des **moindres carrés**, on ne l'oblige plus à passer par les points de mesure. Dans ce cas, on fait l'hypothèse que le

phénomène étudié $m(x,y)$ est **régulier**, mais qu'il est affecté d'une **erreur aléatoire** $\varepsilon(x,y)$ qui suit une **loi normale** de moyenne nulle, de variance constante et sans autocorrélation :

$$Z(x,y) = m(x,y) + \varepsilon(x,y)$$

Ce type d'interpolation **lisse** les résultats et entraîne une perte de détails. D'autre part, une **variation locale** sur une partie du champ étudié peut **affecter** l'ajustement global. Toutefois, ceci peut être évité en procédant par **voisinage glissant**.

I-1.4 Interpolation par pondération

De façon analogue, les méthodes par **pondération** permettent de calculer la valeur d'une variable spatiale Z par la moyenne pondérée des valeurs expérimentales :

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\lambda_i \cdot Z(x_i)}{\sum_{i=1}^k \lambda_i} \right)$$

où :

- $Z(x_0)$ est la valeur interpolée au point x_0 de coordonnées x'_0 et y'_0
- $Z(x_i)$ sont les valeurs expérimentales aux points x_i de coordonnées x'_i et y'_i
- λ_i sont les pondérateurs (ou poids) affectés à chaque valeur expérimentale

La méthode la plus simple d'interpolation par pondération est celle des polygones d'influence, dite de **Thiessen**, où on attribue à un point la valeur du point expérimental le **plus proche** (Thiessen, 1911). On réalise ainsi une **partition** du champ étudié en n zones d'influence de surface S_i avec :

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_n$$

Mais généralement, on prend les coefficients λ_i **proportionnels** à la distance aux points expérimentaux. Cette méthode est appelée pondération par **l'inverse de la distance** et peut être modifiée en utilisant par exemple l'inverse du carré de la distance. D'autres fonctions de pondération existe dans la littérature mais ne seront pas développées ici (Delhomme, 1976).

Les inconvénients présentés par ces méthodes résident tout d'abord dans le fait qu'elles ont été conçues pour être utilisées sur des surfaces très étendues **sans** tendance particulière bien marquée. D'autre part, et ceci est surtout vrai pour les pondérations par inverse de distance, elle ne parviennent pas à discriminer **l'information redondante**. Ainsi, deux points

très proches l'un de l'autre auront chacun le même poids sur le point à interpoler diminuant de ce fait celui des autres points voisins. Enfin, les méthodes d'interpolation par pondération sous-estiment toujours les valeurs élevées et sur-estiment toujours les valeurs faibles, elles "lissent" en quelque sorte le champ étudié.

I-1.5 Méthode d'interpolation choisie

Généralement, le choix d'une méthode plutôt qu'une autre résulte souvent de l'arbitraire sans que l'on en connaisse toutes les implications. La méthode d'interpolation **non probabiliste** utilisée dans ce travail est une méthode d'**interpolation polynomiale**. Elle a été effectuée à l'aide du module TIN (Triangulated Irregular Network) du Système d'Information Géographique (SIG) Arc/Info. On crée ainsi un **modèle de surface** de la zone d'étude à partir du réseau de points mesurés en notre possession. La **structure** des données de TIN est construite à partir d'éléments de base qui sont des points de coordonnées (x,y,z). Dans un premier temps, le programme TIN élabore un **réseau de triangles** répondant aux conditions de la méthode "Delaunay" (cf. § I-1.1 et figure 4.1). A partir de ce réseau, la méthode d'interpolation utilisée est une **fonction polynomiale du 5^{ème} degré** (Akima, 1978) tel que :

$$Z(x, y) = \sum_{j=0}^5 \sum_{k=0}^{5-j} q_{jk} x^j y^k$$

qui permet d'ajuster une surface à maille carrée à partir des sommets de chaque triangle. Cette méthode a été retenue car l'échantillonnage pratiqué est **régulier** et **bien espacé** selon une **maille carrée**. Ainsi, les conditions de "Delaunay" pour l'élaboration du réseau de triangles sont optimales.

Ce type d'interpolation spatiale est en général valable pour des phénomènes très réguliers à grandes tendances comme l'est l'altitude. Des auteurs comme Delhomme (1976) ont décrit et analysé en détail les différentes méthodes d'interpolation, utilisées surtout dans le domaine de la géologie et des sciences de l'eau. Néanmoins, ces méthodes, et celles décrites plus haut, ne tiennent pas compte entre autre de la **structure spatiale** des variables étudiées. Elle sont donc plus ou moins **arbitraires**. De plus, elles ne fournissent aucune indication sur la **précision** de l'estimation. L'utilisation de méthodes probabilistes permet d'éviter ces limites.

I-2 Méthodes probabilistes

I-2.1 Théorie des Fonctions Aléatoires (F.A.)

Ces méthodes que nous nous proposons d'utiliser sont probabilistes dans la mesure où elles considèrent que le champ spatial de la variable étudiée est une réalisation d'une **Fonction Aléatoire** (F.A.). Nous ne développerons pas ici le formalisme mathématique de cette notion, les références bibliographiques sont à ce sujet très nombreuses (Matheron, 1971 ; Journel et Huijbregts, 1978). Rappelons toutefois en bref ce que sont une **Variable Aléatoire** (V.A.) et une **Fonction Aléatoire** (F.A.). Une **Variable Aléatoire** est une variable qui prend un certain nombre de valeurs numériques suivant une certaine loi de probabilité. La **réalisation** d'une **Variable Aléatoire** est un **résultat numérique** d'un tirage au sort selon la loi de probabilité de celle-ci. Soit par exemple une propriété définie en un point x_1 particulier de l'espace. Cette propriété peut être considérée comme la **réalisation particulière** d'une certaine **Variable Aléatoire** $Z(x_1)$ définie au point x_1 . Cette **Variable Aléatoire** suit une loi de probabilité P de telle façon qu'un tirage au sort selon cette loi de probabilité donnera par exemple le résultat numérique x_1 . Maintenant, si l'on considère l'**ensemble des propriétés** $Z(x)$ pour tous les points x de l'espace, cet ensemble peut être considéré comme un ensemble de **Variable Aléatoire**. Cet ensemble est appelé une **Fonction Aléatoire**. Une **Fonction Aléatoire** est donc un ensemble de **Variables Aléatoires** à **une infinité de composantes** correspondant chacune à un point de l'espace (Delhomme, 1976). La **réalisation** d'une **Fonction Aléatoire** est une **fonction numérique ordinaire**.

Pour pouvoir utiliser les résultats de la théorie des F.A., il faut pouvoir reconstituer la loi de la F.A. en question ou du moins ses premiers **moments**. Cette reconstitution se nomme l'**inférence statistique**. A priori, ceci n'est envisageable que si l'on connaît un nombre suffisant de réalisations de la F.A.. On peut alors estimer ses caractéristiques à l'aide de **moyennes** sur l'ensemble des différents événements. Seulement, en pratique, on ne connaît qu'**une seule** réalisation de la F.A.. De fait, la caractérisation statistique de la F.A. n'est guère concevable. Pour pouvoir lever cette impossibilité, deux hypothèses qui sont le moins restrictives possibles sont posées (Delhomme, 1976 ; Cressie, 1991) :

- L'hypothèse d'ergodicité : on supposera que la réalisation unique étudiée **suffit** à rendre compte de l'ensemble des réalisations éventuelles.
- L'hypothèse de stationnarité : un phénomène est défini comme stationnaire s'il possède une certaine **homogénéité spatiale**, de nature statistique, qui fait qu'il se répète lui-même en quelque sorte dans l'espace.

Une F.A. est donc dite **stationnaire** si la loi de probabilité des valeurs prises par cette fonction en k points arbitraires est **invariante par translation** d'ensemble de ces points. Il est alors possible de déterminer la loi de probabilité de la F.A. par la connaissance d'une seule réalisation en remplaçant les moyennes que l'on est normalement amené à faire sur l'ensemble des réalisations disponibles, par des **moyennes spatiales** sur l'unique réalisation (Delhomme,

1976 ; Bresler *et al.*, 1984). Mais en général, on se limite à faire l'hypothèse de la **stationnarité d'ordre 2**, dans laquelle on impose aux deux premiers moments seulement de la loi de probabilité d'être invariants par translation. D'autre part, le développement des calculs d'estimation optimale exige la stationnarité d'ordre 2, non pas de la F.A., mais de ses **accroissements** uniquement (Delhomme, 1976 ; Journel et Huijbregts, 1978). Cette hypothèse moins restrictive que la précédente est appelée "**hypothèse intrinsèque**". Ainsi, pour tout vecteur h , l'accroissement $Z(x+h) - Z(x)$ possède une espérance mathématique et une variance **indépendantes** du point x .

$$E [Z(x+h) - Z(x)] = 0 \quad (1)$$

$$\text{Var} [Z(x+h) - Z(x)] = 2\gamma(h) \quad (2)$$

La fonction $\gamma(h)$ est appelée "**semi-variogramme**" communément dénommée par abus de langage "**variogramme**". C'est une **fonction aléatoire intrinsèque** qui représente l'**accroissement quadratique moyen** entre deux points distants de h . En tenant compte de (1) et (2), on obtient :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(Z(x+h) - Z(x))^2] \quad (3)$$

La fonction qui vient ainsi d'être définie est l'outil **principal** de l'analyse structurale d'une variable. Mais rappelons que cette expression (3) n'est valable que lorsque l'hypothèse intrinsèque est **vérifiée** (1 et 2). En général, il est très **difficile** de prouver cette hypothèse. On essaye plutôt de rechercher des **indices** de non stationnarité, de manière à se reporter, éventuellement, à des conditions de **stationnarité locale** pour lesquelles l'estimateur du variogramme sera valide aux faibles distances.

I-2.2 Approche géostatistique

Cette approche fait appel à la théorie des **Variables Régionalisées** (V.R.) développée par Matheron (1965). Elle est utilisée pour qualifier un phénomène se déployant dans l'**espace** et/ou dans le **temps**, et y manifestant une certaine **structure**. Une réalisation de fonction aléatoire peut en particulier être une Variable Régionalisée si elle présente une certaine structure spatiale c'est-à-dire une **dépendance** de la valeur prise en deux points distincts. On peut alors interpréter la V.R. comme une fonction, résultat d'un **tirage au sort** dans un ensemble de fonctions (Matheron *in* Delhomme, 1965 et 1970). On voit alors l'intérêt d'utiliser la théorie des fonctions aléatoires pour le traitement des variables régionalisées. Cette démarche permettra de définir la **structure spatiale** de la V.R. en utilisant les propriétés du **variogramme**. La théorie des Variables Régionalisées met d'autre part à notre disposition un outil de prédiction, le **krigeage**, prenant en compte l'information du variogramme et permettant l'estimation avec une **précision connue** de propriétés en des sites non échantillonnés. Ce deuxième outil permet donc de décrire la structure spatiale d'une variable.

La forme la plus simple et la plus utilisée de cette technique est celle du **krigeage simple**. L'estimation $Z^*(X_0)$ faite en un point X_0 par le krigage simple est telle que :

$$Z^*(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(X_i) \quad (4)$$

où :

- n est le nombre de points expérimentaux pris en compte dans l'estimation.
- λ_i est le poids affecté au point expérimental X_i .

Cette estimation est réalisée sous deux conditions ; elle doit être :

- non biaisée :

$$E[Z^*(X) - Z(X)] = 0 \quad (5)$$

- la variance d'estimation doit être la plus petite possible :

$$\text{Var}[Z^*(X) - Z(X)] \text{ minimale} \quad (6)$$

Quand l'hypothèse intrinsèque est vérifiée (équations 1 et 2), l'**ajustement** d'une fonction au **variogramme expérimental** permet de résoudre le système défini par les équations (4), (5) et (6). Ainsi, il est possible de calculer les poids λ_i de l'équation (4) et donc la valeur de l'estimation $Z^*(X_0)$.

Un des avantages de cette méthode est de fournir une **variance d'estimation** qui est un indicateur de la **précision** des estimations effectuées. Elle est d'autant plus grande que les estimations sont peu précises. Cette variance d'estimation **ne dépend pas** de la valeur des observations, mais uniquement de la **position** des points et du **variogramme**. D'autre part, le krigage est un **interpolateur exact**, c'est-à-dire que lorsqu'un point x_0 à kriger correspond à un point expérimental x_i , le résultat du krigage redonne bien la valeur au point expérimental ; on a alors $Z_0 = Z(x_0)$ avec une variance d'estimation nulle ($\text{Var}[Z^*(X) - Z(X)] = 0$). Enfin, on notera que le krigage tient compte de la position relative des points à estimer et des points expérimentaux et de la position relative des points expérimentaux entre eux.

D'autres formes de krigage existent, mais ne seront pas développées ici. Citons notamment le **krigeage indicatif** qui utilise une méthode indépendante de la loi de distribution de la variable à estimer (Journel, 1984). Cette méthode a été utilisée pour kriger des variables qualitatives ordonnées (Walter, 1990). Le **krigeage disjonctif** est utilisé pour l'estimation de données présentant plusieurs modes. Avec ce type de krigage, on aborde les **géostatistiques non linéaires** (Webster et Oliver, 1989). Enfin, le **krigeage universel** introduit la notion de **dérive** et permet le krigage de phénomènes où l'hypothèse de moyenne constante ne peut être maintenue (phénomènes non stationnaires) (Delhomme, 1976).

II. PRINCIPES DE MISES EN OEUVRE

De nombreux auteurs en Science du Sol ont utilisé les méthodes de **variographie** et de **krigeage** pour décrire la variabilité spatiale de **propriétés du sol** à des échelles et dans des milieux très différents. Nous pouvons notamment citer Gascuel-Oudoux (1984), Voltz (1986), Iris (1986) et Walter (1990) qui ont employé ces méthodes pour des propriétés physiques des sols, Mc Bratney *et al.* (1982), Goovaerts *et al.* (1989) et Cámara et Cluis (1992), pour des propriétés chimiques et Nortcliff (1978), Oliver (1984) Daroussin *et al.* (1992) et Bourennane *et al.* (1992) pour des données à caractères morphologiques. Enfin, des auteurs comme Guérin (1992) et Hansen (1993) ont utilisé ces méthodes probabilistes pour décrire la structure spatiale de données issues de mesures géophysiques. Les nombreuses références disponibles dans la littérature font du krigeage une technique dont les possibilités et les limites sont les mieux connues (Oliver et Webster, 1991).

L'utilisation des méthodes géostatistiques que nous venons de décrire nécessite une démarche particulière que nous nous efforcerons de suivre à chaque fois que nous les emploierons. Pour l'estimation des variogrammes expérimentaux des variables que nous allons étudier, nous avons utilisé des programmes informatiques en Fortran élaborés par M.Voltz (INRA, Montpellier), un logiciel du domaine public américain GEO-EAS (Englund et Sparks, 1988), ainsi que le logiciel ISATIS (Ecole des Mines de Paris).

II-1 Estimation du variogramme expérimental

Dans le cadre de notre travail, les phénomènes étudiés se développent généralement dans le **plan**. Le variogramme est alors une fonction de **deux variables** x et y , coordonnées des points dans l'espace. Pour calculer le variogramme expérimental, on procède à des regroupements par **classes de distance**. Ainsi, nous pouvons par exemple établir des classes de distance de 10 m. Le programme calculera alors les écarts quadratiques pour tous les **couples de points** séparés de 0 à 10 m, 10 à 20 m, 20 à 30 m, etc., et donnera pour chaque classe la valeur **moyenne de la distance** (h) ainsi que l'**écart quadratique moyen** pour la classe considérée. Ces deux valeurs constitueront **un** des points du variogramme. Le nombre de couples de points ayant servi à l'estimation d'un des points du variogramme ne doit pas être **inférieur à 50** pour obtenir une précision satisfaisante (Journel et Huijbregts, 1978). Notons d'autre part que le variogramme expérimental n'est étudié que sur des distances **inférieures à la moitié de la plus grande longueur** de la surface d'échantillonnage de la Variable Régionalisée (Voltz, 1986 ; Boivin, 1988). Cette précaution est nécessaire pour une meilleure **représentativité** des couples de points en évitant un trop grand nombre de ces couples sur la plus grande distance d'échantillonnage (Journel et Huijbregts, 1978). Dans notre cas, cette distance est d'environ **800 m**.

Le variogramme calculé ainsi est qualifié de variogramme "**moyen**" car son calcul ne tient compte que de la distance séparant les points, **indépendamment de la direction**. Fréquemment, il est intéressant de déterminer les variogrammes par classes de direction et de calculer ainsi les variogrammes dits "**directionnels**". Cette démarche permet de mettre en évidence une éventuelle **anisotropie** dans la variable régionalisée étudiée. Les programmes que nous utilisons permettent de définir des **classes de direction** pour lesquelles le variogramme est calculé. Une option supplémentaire peut être utilisée pour appliquer une **tolérance** dans le choix des directions.

II-2 Analyse du variogramme

L'analyse du variogramme porte généralement sur **deux points principaux** (figure 4.2).

- **son comportement à l'origine** : théoriquement, on devrait avoir $\gamma(h) = 0$ pour $h = 0$, mais très souvent, le variogramme présente une ordonnée à l'origine non nulle que l'on nomme "**effet de pépité**". Cet "effet de pépité" peut être interprété comme le résultat d'**erreurs de mesure** ou d'une **variabilité spatiale inférieure au pas d'échantillonnage**. Il est possible de rencontrer des variogrammes à l'aspect **plat**. Ceci correspond au cas **aléatoire pur** (figure 4.2). $Z(x)$ et $Z(x+h)$ sont non corrélés quelle que soit leur distance h non nulle. On se trouve ici dans le cas extrême de l'**absence totale de structure**.

- **son comportement à l'infini** : $\gamma(h)$ est en général une fonction croissante pouvant atteindre un "**palier**" (figure 4.2). Ce "palier" est atteint à une distance appelée "**portée**" qui est donc la distance à partir de laquelle la relation entre deux points est **indépendante** de la distance. Par exemple, les variogrammes de types **sphérique** ou **gaussien** sont des variogrammes à palier (figure 4.2). Mais il arrive que des variogrammes ne soient **pas bornés**, et que les notions de "palier" et "portée" ne soient pas déterminés. C'est le cas pour les variogrammes de types **linéaire** ou **parabolique** (figure 4.2) qui caractérisent des variables **régulières**.

En résumé, on comprend donc que trois éléments soient utilisés pour la lecture et la compréhension d'un variogramme : l'**effet de pépité**, le **palier** et la **portée**. Le terme anglais de "sill" est parfois employé pour qualifier la grandeur "palier - effet de pépité". Ainsi, on peut avoir une idée précise sur la façon plus ou moins rapide dont se **dégrade** la relation entre deux points au fur et à mesure que la distance les séparant **augmente** (Guérin, 1992).

II-3 Ajustement d'un modèle théorique

Lorsque le variogramme a été construit et analysé, il convient d'y **ajuster** graphiquement ou de manière automatique une **fonction théorique**. Seules certaines fonctions

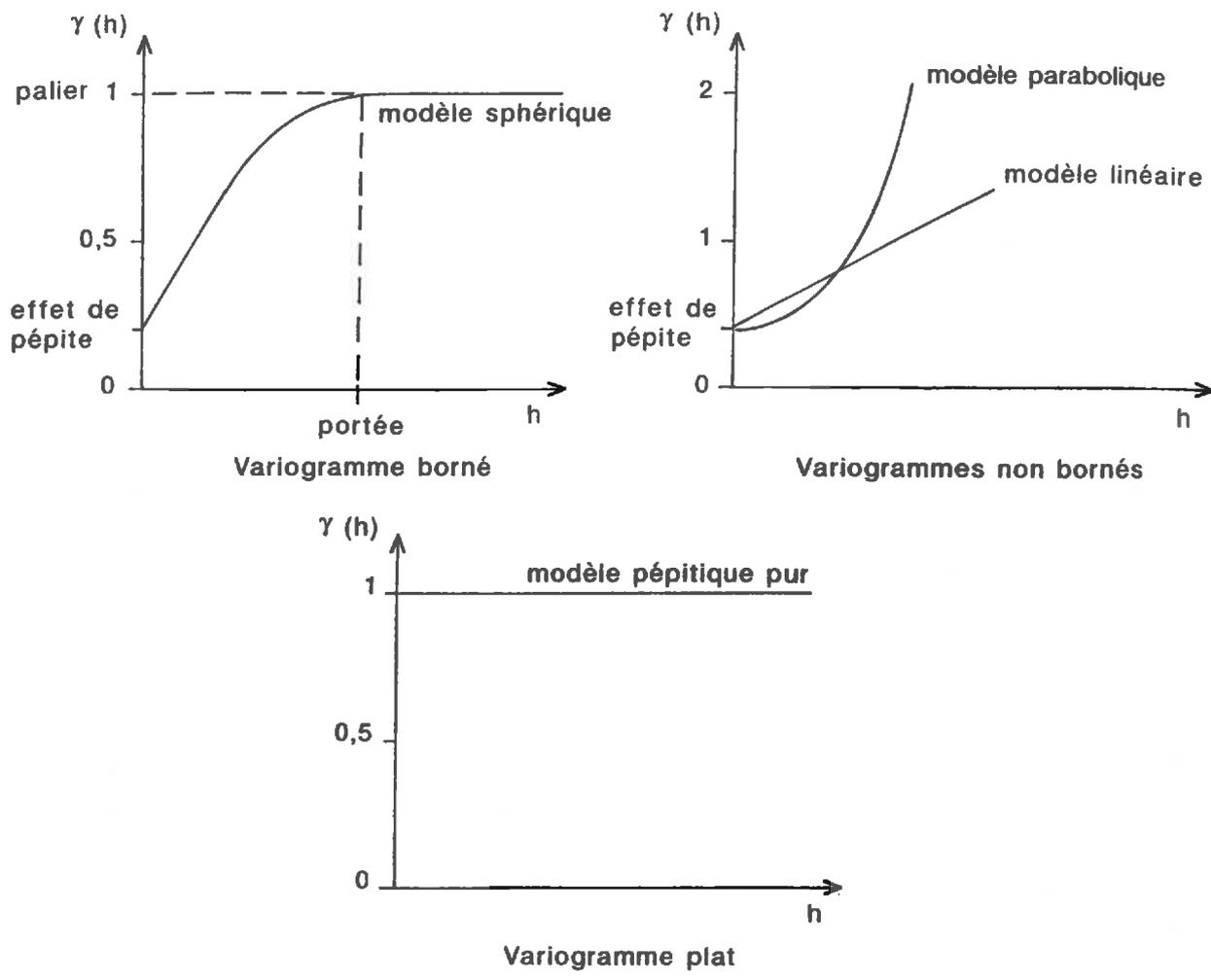


Figure 4.2 : Principaux modèles de variogrammes utilisés (d'après Delhomme, 1976 et Voltz, 1986).

ou combinaisons de fonctions sont autorisées car le variogramme doit être une fonction de type **néгатif conditionnel** pour garantir la **positivité** de la variance d'une combinaison linéaire de $n+1$ variables aléatoires (sous-ensemble d'une fonction aléatoire intrinsèque) avec $n+1$ pondérateurs de somme nulle (Wackernagel, 1993). En d'autres termes, le modèle utilisé devra garantir que les calculs de **variance** des combinaisons linéaires de fonctions employées ($\text{Var}(Y)$) donnent toujours des résultats **positifs** :

$$\text{Var}(Y) = - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \lambda_i \lambda_j \gamma(x_i - x_j) \geq 0 \quad \text{si } \sum_{i=0}^n \lambda_i = 0$$

avec $\text{Var}(Y) = \text{Var}\left(\sum_{i=0}^n \lambda_i Z(x_i)\right)$ et λ les pondérateurs

Ceci implique, entre autre, que ces fonctions possèdent une ordonnée à l'origine positive ou nulle et comportent une section **strictement croissante**. Ainsi, nous pouvons citer notamment les fonctions de type linéaires, sphériques, circulaires, exponentielles, etc., (notons que les fonctions de type **gaussien**, souvent citées dans la littérature géostatistique, sont très peu employées en Science du Sol car elles traduisent des phénomènes très réguliers **peu fréquents**) (Mc Bratney et Webster, 1986 ; Journel et Huijbregts, 1978). De telles fonctions ou l'une de leur combinaison sont employées couramment dans la littérature (Delhomme, 1976 ; Gascuel-Oudou, 1984 ; Voltz, 1986 ; Walter, 1990). Cet ajustement permet de déterminer les **ponds** λ_i dans l'équation du krigeage (équation (4)). Si l'objectif du travail est la mise en oeuvre d'une interpolation par krigeage, le modèle ne sera définitivement choisi qu'après les **tests de validation** des interpolations (Voltz, 1986).

Il existe une autre méthode pour choisir le meilleur ajustement aux points expérimentaux du variogramme. Webster (1985) retient comme meilleur ajustement la fonction qui s'ajuste **le mieux** aux points expérimentaux du variogramme. On **minimise** alors les **écarts** entre ces points et la fonction d'ajustement. Il reste alors à **quantifier** ces écarts pour avoir une précision de l'estimation (Mc Bratney et Webster, 1986).

II-4 Krigeage

Les estimations que l'on cherche à réaliser sont faites aux **noeuds** d'une grille dont la maille est préalablement définie par l'utilisateur. Très souvent, pour respecter l'hypothèse intrinsèque, on procède à une interpolation par **voisinage glissant** c'est-à-dire que l'on fixe un **rayon d'action** au delà duquel les points expérimentaux ne seront plus pris en compte pour l'interpolation. Ce rayon dépendra de la **confiance** accordée au variogramme aux **grandes distances** et, en particulier, de la distance jusqu'à laquelle on juge l'ajustement de la fonction théorique valide. Néanmoins, le voisinage glissant pose le problème du **choix des points** du

voisinage. Ce choix permet de palier à un éventuel sur- ou sous-échantillonnage d'une partie de la zone d'étude ou à un échantillonnage à maille irrégulière ou très dissymétrique.

Le logiciel GEO-EAS permet de réaliser une **étude de voisinage** pour kriger par voisinage glissant. Ainsi, on définit un **rayon d'action** ou "search radius". D'autre part, il est possible de **fractionner** le périmètre ainsi créé en **2, 4, 8 ou 16 secteurs** dans lesquels on pourra préciser un nombre **minimal** et un nombre **maximal** de voisins pris en compte pour l'interpolation de chaque point. Une autre option permet de tester si parmi les secteurs créés précédemment, certains sont **consécutivement vides de points**. Ainsi, si un nombre fixé par l'utilisateur de secteurs vides consécutifs est rencontré, le krigeage n'est pas réalisé dans ces secteurs, ceci dans le but d'éviter une trop mauvaise interpolation. D'autres options sont disponibles avec le logiciel GEO-EAS. Elles ne sont pas toutes décrites dans ce paragraphe mais le seront lors de leur utilisation.

II-5 Validation du modèle ajusté

La validation du modèle ajusté se fait par le test de **validation croisée** ou **test de Thomas**. Ce test compare **successivement** la valeur **réelle** d'un point avec son **estimation** par krigeage. Pour cela, on **enlève** successivement un point de l'ensemble des observations et on **estime** par krigeage la valeur en ce point à partir des observations **restantes**. Les critères servant à la validation sont les suivants (Voltz, 1986) :

- L'**écart moyen** (Z estimé - Z réel), qui est une estimation de $E(Z^* - Z)$. La valeur de cette estimation doit être le plus possible voisine de **0**. Ainsi, est-on sûr que le modèle ne surestime, ni ne sous-estime de façon systématique.

- La **variance de l'écart** $\text{Var}(Z^* - Z)$ permet d'estimer la précision de la réestimation des points de données.

- L'**écart quadratique moyen** $E(Z^* - Z)^2$ est un autre estimateur de la précision de la réestimation des points de données. On démontre que quand le modèle ne présente pas de biais systématique, la variance de l'écart est égale à l'écart quadratique moyen : si $E(Z^* - Z) = 0$, alors $\text{Var}(Z^* - Z) = E(Z^* - Z)^2$.

- L'**écart quadratique moyen réduit** $E(Z - Z^*)^2 / \sigma_e^2$, qui est la moyenne du quotient entre l'écart quadratique et la variance d'estimation. Il analyse la validité de l'estimation de l'écart-type d'interpolation. Sa valeur doit être voisine de **1**.

Cependant, il faut noter que ce test de validation est effectué sur le **même jeu de données** que celui ayant servi à l'analyse structurale. Voltz (1986) "incite à ne pas donner une valeur trop absolue à ce test, mais plutôt à l'utiliser comme moyen de **comparaison** entre les résultats obtenus par les reconnaissances structurales manuelles et automatiques". Ce test pourra donc être utilisé dans ce travail comme une méthode de **validation** du modèle d'ajustement du variogramme.

Dans ce travail, nous disposerons généralement d'un **jeu de données indépendant** des données interpolées, ce dernier sera alors utilisé pour la validation du modèle d'interpolation. Cette méthode permet d'éviter les critiques émises à l'encontre de la **validation croisée**. Les mêmes critères que précédemment (écart moyen et écart quadratique moyen réduit) seront calculés pour juger de la **validité du modèle**.

III. REMARQUES SUR LA REGRESSION LINEAIRE

Dans ce travail, nous comparerons à plusieurs reprises des données **estimées** issues d'une interpolation ou d'un modèle statistique à des données **mesurées** (Webster, 1989). Ce paragraphe détaille les **méthodes** et les **tests statistiques** utilisés pour cette comparaison de manière à faciliter la lecture ultérieure de ce travail (Saporta, 1990).

Dans un premier temps, la relation entre données estimées et données mesurées est qualifiée par un **coefficient de corrélation R** ou par un **coefficient de détermination R²**. Ce coefficient est alors testé pour évaluer son **degré de signification** et voir si il est **significativement différent de 0** (Fisher *in* Snedecor, 1984).

Ensuite, on effectue une **régression**, généralement linéaire de la forme $a + bx$, entre la **variable indépendante**, constituée par les données mesurées (que l'on suppose **sans biais**), et la **variable dépendante**, représentée par les données estimées. Cette régression est caractérisée par le **coefficient de régression b** qui est aussi la **pen**te de la droite de régression et par l'**ordonnée à l'origine a**. Chaque coefficient représente une **moyenne** qui est précisée par son **écart-type**. Une fois établie, cette régression doit être **testée** pour connaître son degré de signification. Pour cela, on teste si le coefficient de régression b est significativement différent de 0 (test F de Fisher). Si tel est le cas, la régression a statistiquement un sens car, ainsi, la pente de la droite de régression n'est pas nulle. De plus, on réalise également une **analyse visuelle des résidus de la régression** qui doivent être répartis selon une loi normale, **sans structure apparente**.

Enfin, très souvent, il ne suffit pas de savoir qu'il existe une relation statistique entre variable indépendante et variable dépendante, mais il faut aussi connaître les différences entre valeurs estimées et valeurs mesurées, pour savoir, par exemple, si un modèle utilisé (modèle d'interpolation ou modèle statistique) n'introduit pas de **biais systématique** dans l'estimation. La méthode des **écarts quadratiques moyens** décrite plus haut, est alors utilisée.

Tous ces tests sont donnés en **niveau de probabilité** et comparé à un **seuil de signification** généralement fixé à 1 ou à 5%. Ce seuil correspond à l'**erreur de première espèce** qui est le risque de rejeter une hypothèse vraie.

IV. CONCLUSION DU CHAPITRE 4

L'utilisation de l'une ou l'autre des techniques d'interpolation (méthodes probabilistes ou non) que nous venons de décrire restent **subordonnées** à la nature et à la structure spatiale des données à interpoler. Ainsi, nous commencerons généralement par utiliser les techniques les plus faciles à mettre en oeuvre (méthodes non probabilistes) pour employer ensuite, si cela s'avère nécessaire, les techniques de variographie et de krigeage. Cet emploi se **justifiera** chaque fois que les résultats d'une validation sur un jeu de données indépendant se montreront **faibles**.

Cependant, les études ayant comparé les différentes méthodes statistiques d'estimation spatiale montrent que le krigeage est l'un des **meilleurs estimateurs** car il s'adapte bien aux **phénomènes régionalisés** (Van Kuilenburg, 1982 ; Goulard *et al.*, 1987 ; Laslett *et al.*, 1987 *in* Walter, 1990). C'est la raison pour laquelle, dans certains cas où les résultats d'une **validation**, suite à l'utilisation de méthodes non probabilistes, ont donné des résultats satisfaisants, nous **poursuivrons** l'analyse en utilisant des méthodes probabilistes. De la sorte, nous pourrons **comparer** les résultats de la validation dans les deux cas et surtout, nous aurons la possibilité d'obtenir une **variance d'estimation** sur les valeurs estimées par krigeage ce qui permettra alors de dresser une **carte des écarts-types d'estimation** associée à la **carte krigée**.

VARIATION DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUVERTURE DE SOL ÉTUDE DE LA FORMATION LIMONO-ARGILEUSE

La géométrie du volume limono-argileux présent de façon **quasi continue** sur le calcaire de Beauce fortement cryoturbé dans sa partie supérieure est l'une des caractéristiques les plus importantes contrôlant les flux d'eau vers l'aquifère en période de drainage. Lors d'une campagne de sondages à la tarière nous avons mesuré en **190** points l'épaisseur du limono-argileux avec une précision de ± 5 cm. Ces données sont analysées dans ce chapitre afin de définir la **variabilité** de l'épaisseur de la couverture de sol et d'établir une **carte des isopaches** du limon argileux. Lors de cette analyse, nous comparerons **deux méthodes d'interpolation** (interpolation polynomiale et krigeage) pour la cartographie des épaisseurs du limon argileux en utilisant une validation sur un échantillon test de mesures.

I. ANALYSE DE LA VARIABILITE DE L'ÉPAISSEUR DU LIMON ARGILEUX PAR SONDAGE A LA TARIERE.

Dans ce paragraphe, nous allons dans un premier temps discuter des différents échantillonnages adoptés pour rendre compte de la variabilité de l'épaisseur du limon argileux sur l'ensemble du secteur d'étude. Après avoir analysé de façon statistique les différents jeux de données ainsi constitués, nous nous intéresserons, dans un deuxième temps, à la structure spatiale de la variable mesurée. Nous établirons alors le variogramme expérimental et les variogrammes directionnels de l'épaisseur du limon argileux (LA) à partir de l'ensemble des données, puis nous discuterons de sa structure spatiale et d'éventuelles anisotropies.

I-1 Echantillonnage

I-1.1 Echantillonnage de 150 sondages uniformément répartis

1°) Présentation de la grille de sondages.

Dans un premier temps, un repérage topographique du pourtour du secteur d'étude a été réalisé en prenant comme point de référence une borne cotée de l'IGN présente sur le secteur. Ce balisage, effectué à l'aide d'un théodolithe autoréducteur Wild RDS, a permis par la suite un repérage précis (en x,y,z) de toutes les opérations réalisées en coordonnées Lambert II étendu et cotes NGF. L'utilisation de fonds cadastraux a permis d'obtenir un fond topographique de calage pour les sorties cartographiques.

Par la suite, notre secteur a été quadrillé en utilisant une maille carrée de 150 m de côté selon des axes Nord-Sud et Est-Ouest ayant pour origine la borne de l'IGN. Aux noeuds et au centre de chaque élément de cette grille ont été effectués des sondages à la tarière pour lesquels ont été décrits la succession des différents types d'horizons rencontrés, et la position précise de chaque sondage. 100 sondages ont ainsi été réalisés et ont permis une couverture de l'ensemble du secteur avec une résolution de 1 point par hectare. La grille définitive obtenue est carrée de maille d'environ 106 m ($150\sqrt{2} / 2$) et elle est orientée Nord-Ouest-Sud-Est.

2°) Présentation du jeu de données indépendant pour validation.

Cinquante sondages supplémentaires ont été réalisés sur le secteur d'étude pour constituer un jeu de données indépendant. Ce dernier sera utilisé pour la validation des interpolations au cours de ce travail en comparant la valeur mesurée à la valeur interpolée au même point. Ces 50 sondages sont répartis sur le secteur entre les 100 premiers sondages déjà effectués. De la même manière que pour les cent premiers sondages, l'épaisseur des différents matériaux rencontrés a été relevée ainsi que la situation (x,y,z) du sondage.

3°) Répartition spatiale de l'épaisseur du LA.

Le report dans l'espace géographique des valeurs de la variable "épaisseur du LA" permet une première analyse de la structure spatiale des données. Ce report a été réalisé sous forme de croix dont la taille est **proportionnelle** à l'épaisseur (figure 5.1). L'**analyse visuelle** révèle l'existence d'une zone pour laquelle l'épaisseur du LA est plus élevée au centre du secteur d'étude, et de deux zones pour lesquelles cette épaisseur est plus faible respectivement au Sud et au Nord du secteur.

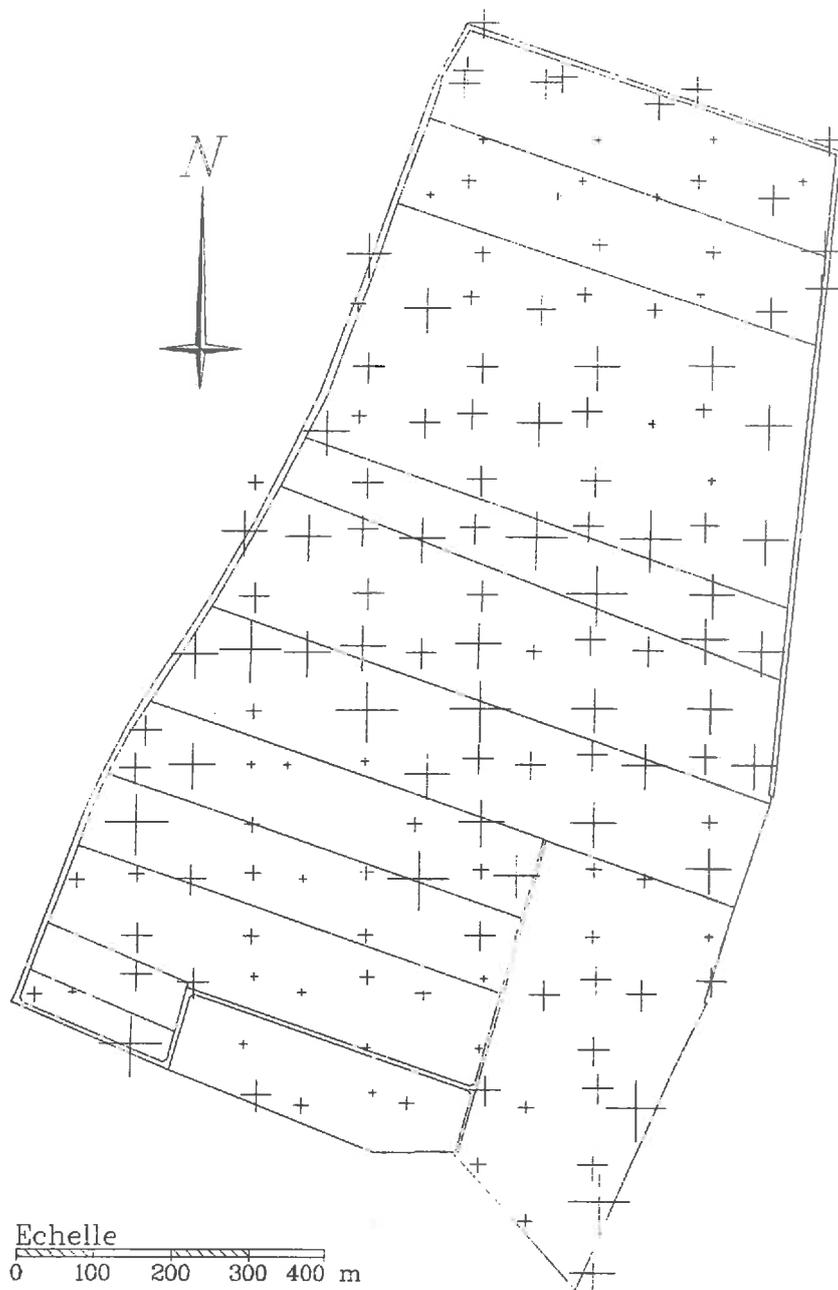
I-1.2 Echantillonnage semi-aléatoire complémentaire de 40 sondages

L'objectif est ici d'étudier l'épaisseur du limon-argileux aux **courtes distances d'échantillonnage**. On va par conséquent s'intéresser à des couples de points séparés par une distance inférieure à 106 m. Pour cela, nous avons employé une méthode permettant un échantillonnage régulier et semi-aléatoire donnant des couples de points espacés par des distances fixes, inférieures à 106 m, puis nous avons analysé les **variations** de l'épaisseur du limon argileux en fonction de la distance séparant les couples de points.

1°) Présentation de la distribution des sondages

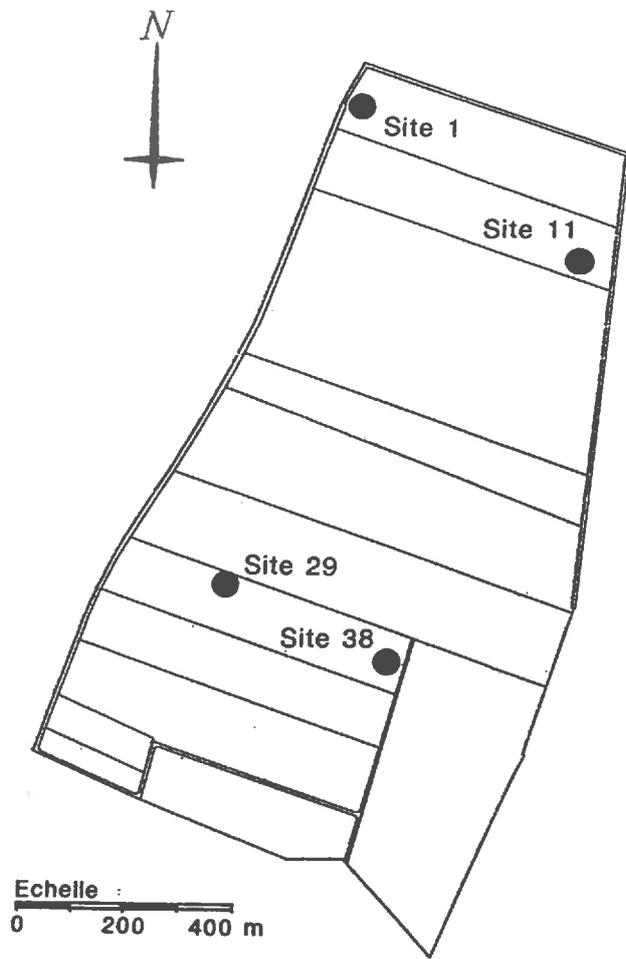
La prise en compte de points supplémentaires dans notre étude devait obéir à une **stratégie d'échantillonnage** particulière en tenant compte de l'échantillonnage régulier que nous avons réalisé précédemment. Il est indispensable pour notre étude, de connaître la variabilité de l'épaisseur du LA aux faibles distances d'échantillonnage en espaçant nos nouveaux sondages à la tarière d'une distance inférieure à 106 m. Rappelons que cette distance correspond à l'**espacement théorique minimal** entre deux sondages pour notre jeu de données initial (100 sondages). Plusieurs stratégies d'échantillonnage étaient envisageables (Webster et Oliver, 1990 ; Walter, 1990). A partir d'un point initial, il était en effet possible de faire varier la distance et/ou la direction entre deux points de façon aléatoire. Nous avons choisi de fixer une distance de manière **arbitraire** et de faire varier **aléatoirement** la direction (figure 5.2). Cette méthode a déjà été employée par Walter (1990) pour le choix de points supplémentaires au sein d'une même unité cartographique de sol à des fins de krigeage.

Après avoir divisé le secteur d'étude en **quatre parties** contenant chacune le même nombre de sondages, nous avons tiré **au hasard** un sondage dans chacune d'elles (figure 5.2). Ces sondages constitueront les points de départ de l'échantillonnage supplémentaire que nous allons réaliser (tableau II.1a en annexe 2). Pour chacun de ces points, nous nous sommes déplacés de 0,50 m selon une **direction aléatoire** et nous avons réalisé un nouveau sondage. De ce nouveau point, nous nous sommes ensuite déplacés de 1 m, toujours selon une direction prise au hasard et nous avons effectué un deuxième sondage. Nous avons successivement réalisé cette opération en **doubleant** la distance chaque fois, c'est-à-dire pour des distances de 0,5 m, 1 m, 2 m, 4 m, 8 m, 16 m, 32 m, 64 m et 128 m (figure 5.2). Si le nouveau point ainsi défini se trouvait dans une zone perturbée (chemin, route, etc.), un nouveau tirage aléatoire de la direction était réalisé jusqu'à l'obtention d'un point aux conditions satisfaisantes (tableau Ib en annexe 2).



- Légende : épaisseur du limon argileux**
- + (inférieure ou égale à 40 cm)
 - + (comprise entre 40 et 60 cm)
 - + (comprise entre 60 et 80 cm)
 - + (comprise entre 80 et 100 cm)
 - + (supérieure à 100 cm)

Figure 5.1 : Analyse visuelle de la structure spatiale des données (100 sondages).



● Site 1 : Localisation des sites de mesure

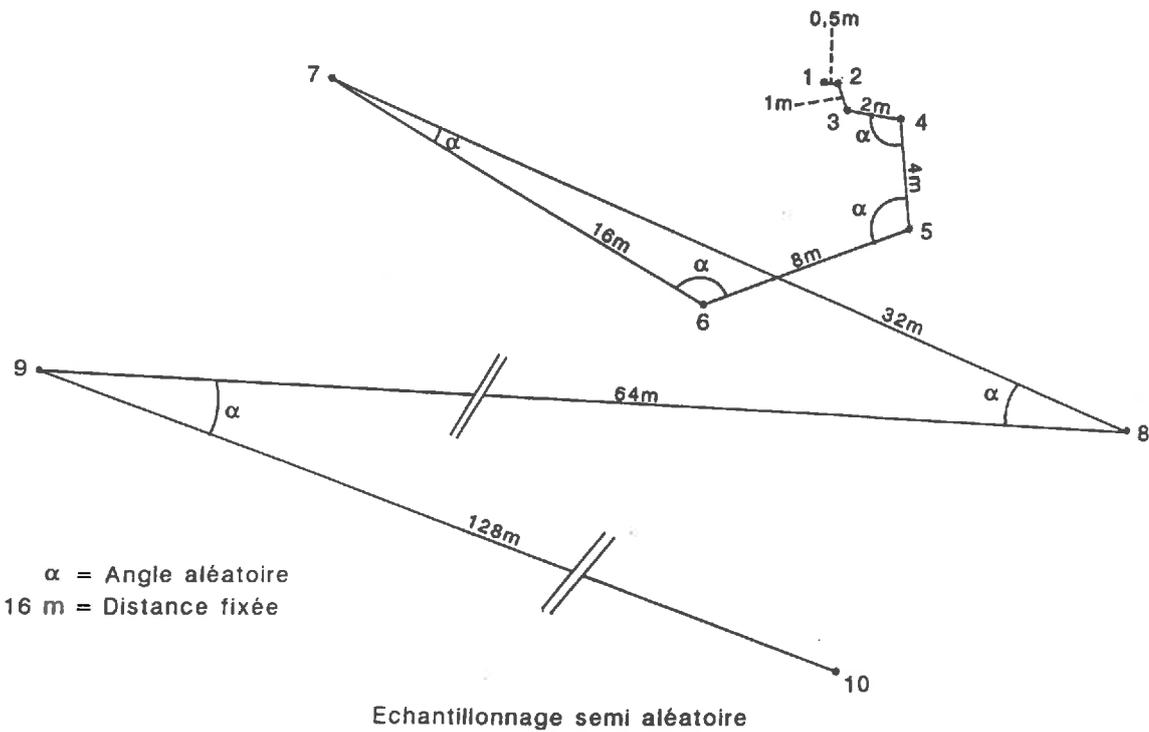


Figure 5.2 : Présentation de l'échantillonnage semi-aléatoire.

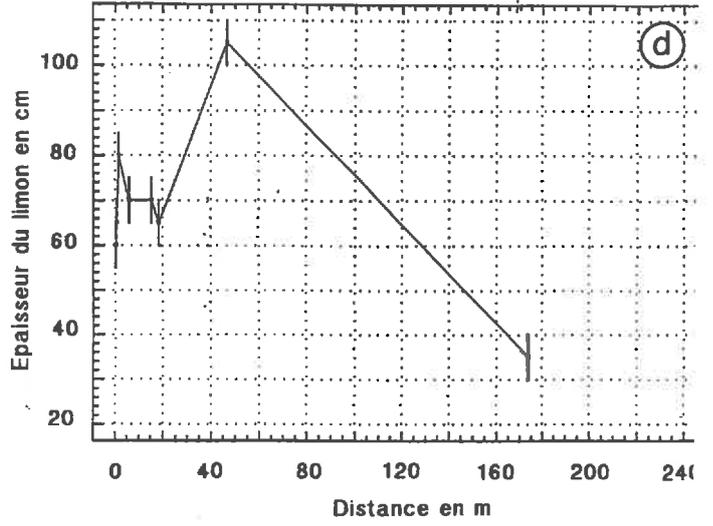
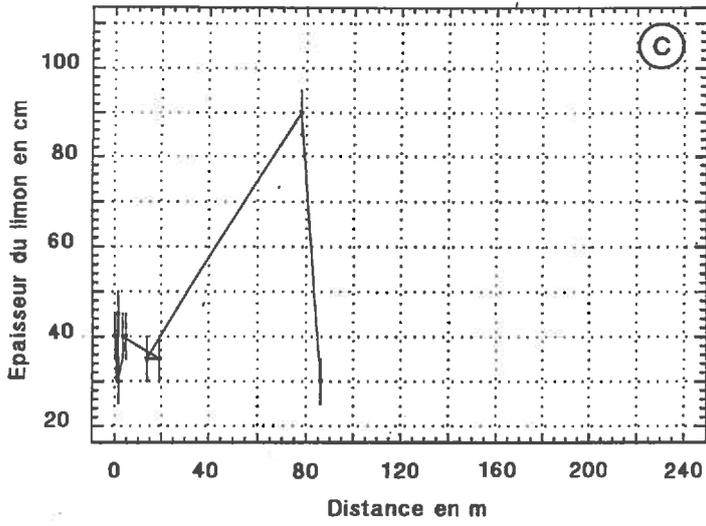
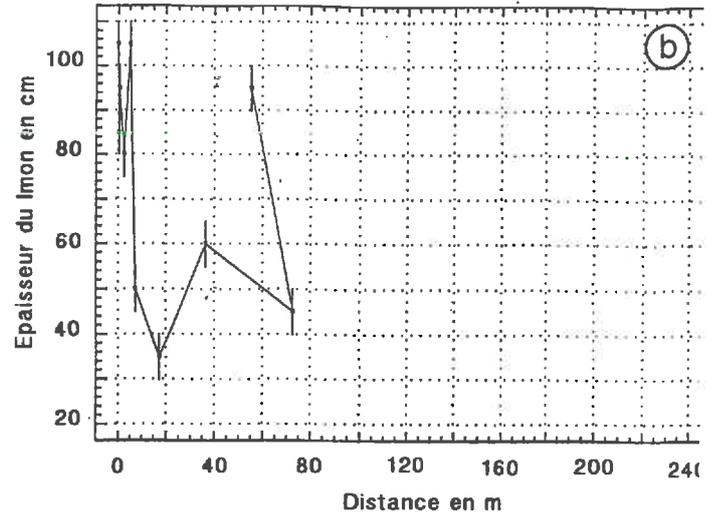
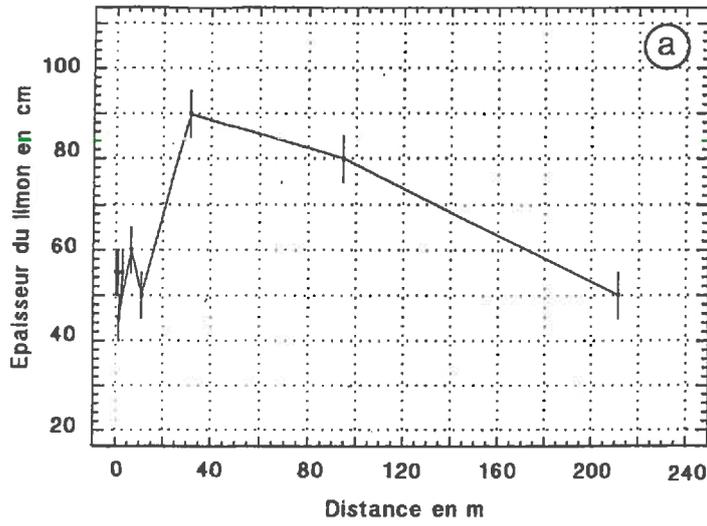


Figure 5.3a,b,c et d : Variabilité de l'épaisseur du LA aux courtes distances d'échantillonnage.

Nous aurions pu aussi rayonner autour des points initiaux tirés parmi les 100 sondages. Mais cette méthode aurait donné beaucoup trop d'importance à la position du point initial. Nous avons ainsi obtenu quatre séries de 10 sondages à la tarière (soit 40 sondages) pour lesquels nous avons mesuré l'épaisseur du limon-argileux.

2°) Variabilité de l'épaisseur du LA aux courtes distances d'échantillonnage.

De manière à rendre compte de façon plus précise de la variabilité de l'épaisseur du LA aux faibles pas d'échantillonnage, nous avons représenté, pour chacun des 4 sites de mesure qui constituent l'échantillonnage complémentaire, l'épaisseur du limon argileux mesurée par sondages mécaniques en fonction de la distance séparant un point de mesure au point origine (un point origine par site) (figure 5.3). Pour chaque point, nous avons aussi représenté l'erreur de mesure (± 5 cm). Pour les quatre sites concernés, on note un **accroissement** de la variabilité de l'épaisseur du LA à partir d'une certaine distance. Pour les sites 1, 29 et 38 (fig.5.3a, c et d) cette distance est de l'ordre de 20 m. Au delà de cette distance, les variations d'épaisseur dépassent nettement l'amplitude de 10 cm liée aux erreurs de mesures. Seul le site 11 (fig.5.3b) révèle une variabilité élevée dès une distance supérieure à 5m. Sur la figure 5.3b on remarque que cette distance se situe entre 5 et 10 m.

De manière générale, la réalisation de ces dispositifs met en évidence une **variabilité latérale** de l'épaisseur du LA inférieure à **20 m** sur les sites de mesures. Mais les mesures réalisées jusqu'à présent n'ont concerné qu'une faible surface du secteur d'étude. Ainsi, il serait intéressant d'utiliser des méthodes plus probabilistes pour préciser cette variabilité.

I-1.3 Analyse statistique des données issues des 190 sondages

L'analyse statistique élémentaire des données indique que la moyenne des épaisseurs est voisine de **67 cm** et l'écart-type de 23 cm. Les épaisseurs minimale et maximale sont respectivement de 20 cm et 125 cm. Le coefficient de variation est de l'ordre de 35%. L'histogramme de fréquence de la variable "épaisseur du LA" permet de préciser son échelle de variabilité. Il présente une distribution **unimodale** (7 classes). La classe modale est celle comprise entre 60 et 80 cm (figure 5.4). Moyenne, médiane et mode ne sont pas très différents et possèdent des valeurs respectivement de 67, 67 et 70 cm, ce qui caractérise une **distribution symétrique**.

La connaissance de la loi de distribution de la variable permet la définition d'estimateurs non biaisés. Ainsi, pour profiter des propriétés de la loi normale, nous avons testé la **normalité** de la distribution de la variable épaisseur (Snedecor et Cochran, 1984 ; Dagnélie, 1980). Dans notre cas et avec le jeu de données dont nous disposons, le test du χ^2 amène à **rejeter** l'hypothèse d'ajustement à une loi normale au niveau de probabilité de 5%.

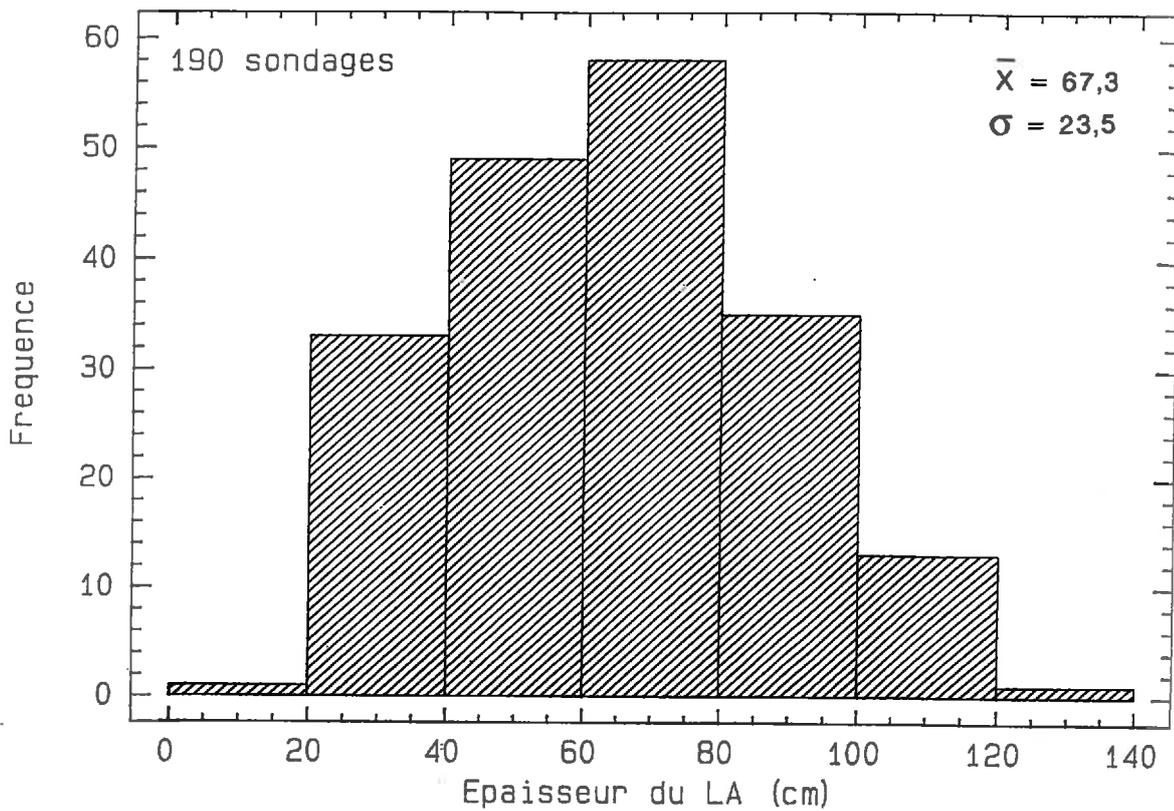


Figure 5.4 : Histogramme de fréquence de l'épaisseur du LA (190 sondages).

En effet, pour un choix de 7 classes de 20 cm le χ^2 calculé est supérieur au χ^2 théorique ($\chi^2_{\text{calc.}} = 6,13 > \chi^2_{\text{théor.}} = 5,99$) au niveau de probabilité 5% et pour 2 degrés de liberté (les classes 00-20 et 120-140 ayant été regroupées avec les classes adjacentes à cause de leur faibles effectifs, il ne reste donc plus que 5 classes donc $5-3 = 2$ degré de liberté).

Toutefois, l'hypothèse de **normalité** n'est pas requise dans le calcul du variogramme et celui des estimations car la normalité de la variable **n'affecte pas** les estimations faites par krigeage (Gutjahr, 1984 ; Walter, 1990), mais elle permet le calcul d'intervalles de confiance à partir des écarts-types d'estimation donnés par le krigeage.

I-2 Variographie

I-2.1 Variogramme expérimental

Dans ce paragraphe, nous allons procéder à l'estimation du variogramme expérimental selon la méthode décrite au chapitre 4. Ceci nous permettra de réaliser une analyse de la structure spatiale de la variable "épaisseur du LA" dans le but de la cartographier.

Le **variogramme** a été calculé avec l'ensemble des **190** données de l'épaisseur du limon-argileux obtenues par sondage mécanique à la tarière (figure 5.5). Le **pas** choisi (20 m) résulte d'un compromis entre le souci d'éviter un trop grand lissage du variogramme par le choix d'un pas trop important et de générer de trop petits nombres de couples de points avec un pas plus faible. Le nombre de **classes de distance** a donc été choisi de façon à générer pour chaque classe un nombre de couples d'observations **toujours supérieur à 50**.

Le tableau 5.1 indique, le nombre de couples ayant servi à l'estimation du variogramme expérimental. Ce tableau donne aussi la distance moyenne pour le pas considéré (moyenne des distances entre les points) et l'écart quadratique moyen. Le variogramme de la figure 5.5 est croissant jusqu'à une distance de l'ordre de 250 m où il atteint un palier de 550 cm^2 . L'**effet de pépité est d'environ 85 cm^2** , ce qui représente environ 15% de la valeur atteinte au palier. Au delà de 500 m, le nombre de couples de points servant à la construction du variogramme diminue très sensiblement ce qui explique les fortes variations de $\gamma(h)$. L'ajustement visuel de **deux modèles de type sphérique** aux points du variogramme a été réalisé (figure 5.5). Ce modèle est de la forme :

$$\gamma(h) = c_0 + c_1 \gamma_1 + c_2 \gamma_2$$

Avec : $c_0 = 85$ (effet de pépité)

$$c_1 \gamma_1 = 259[1,5h/54 - 0,5(h/54)^3]$$

$$c_2 \gamma_2 = 216[1,5h/241 - 0,5(h/241)^3]$$

Pas	Classe de distance (m)	Nombre de paires	Distance moyenne (m)	$\gamma(h)$ (cm ²)
1	00-20	75	4,2	131,8
2	20-40	55	16,2	250,7
3	40-60	54	42,2	434,6
4	60-80	98	61,4	352,3
5	80-100	152	80,9	443,3
6	100-120	231	100,4	416,2
7	120-140	135	119,6	583,6
8	140-160	234	144,3	413,3
9	160-180	327	158,1	538,6
10	180-200	231	179	516,6
11	200-220	232	201,1	557,6
12	220-240	382	218,6	608
13	240-260	410	239,1	531,7
14	260-280	251	260,1	728,8
15	280-300	243	280,3	427,5
16	300-320	492	300,2	525,2
17	320-340	428	319,7	540,6
18	340-360	445	337	590,3
19	360-380	249	361,1	566,4
20	380-400	568	381,1	503,2
21	400-420	338	399,4	516,6
22	420-440	344	420,1	651,5
23	440-460	339	439,6	575,8
24	460-480	259	459,3	544
25	480-500	278	477,8	617,8
26	500-520	225	499,3	568,7
27	520-540	155	520,7	508,7
28	540-560	288	539,5	542,4
29	560-580	172	559,5	702,8
30	580-600	123	579,1	663
31	600-620	149	600,4	507,6
32	620-640	119	618,5	641,5
33	640-660	101	640,7	711,4
34	660-680	70	662,6	423,1
35	680-700	82	678,3	496,1
36	700-720	63	699,6	631
37	720-740	38	716,9	833,5
38	740-760	40	740,5	435,5
39	760-780	53	759,3	600,1
40	780-800	32	779,1	626,7

Tableau 5.1 : Résultats de l'analyse variographique avec l'ensemble des données
(190 sondages - Tolérance sur la distance : 10 m)

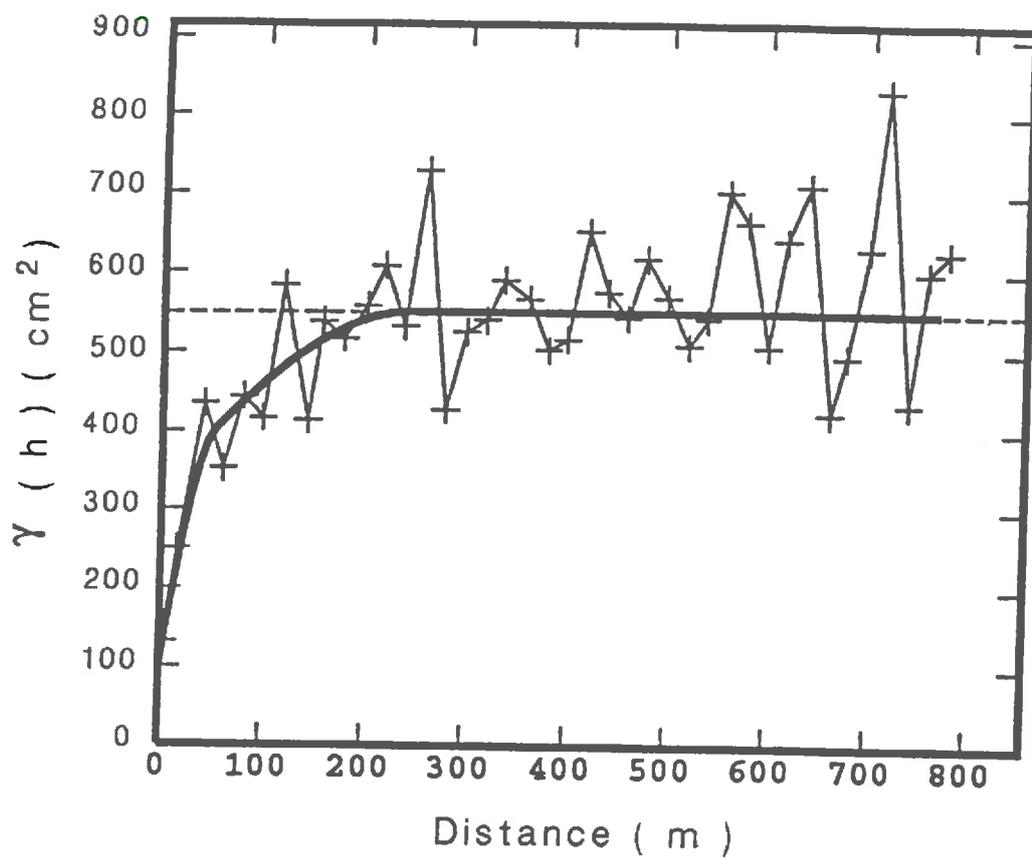


Figure 5.5 : Variogramme expérimental de l'épaisseur du LA (190 sondages).

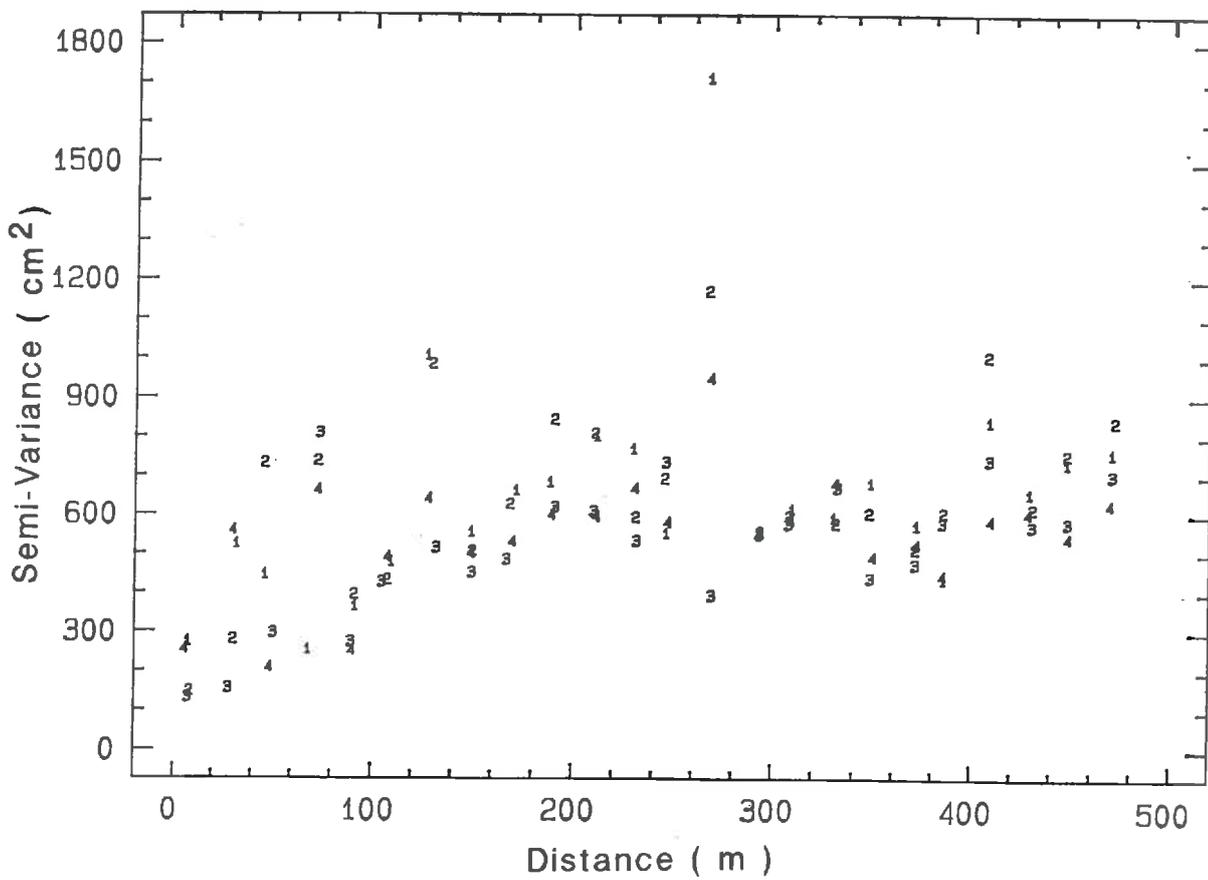
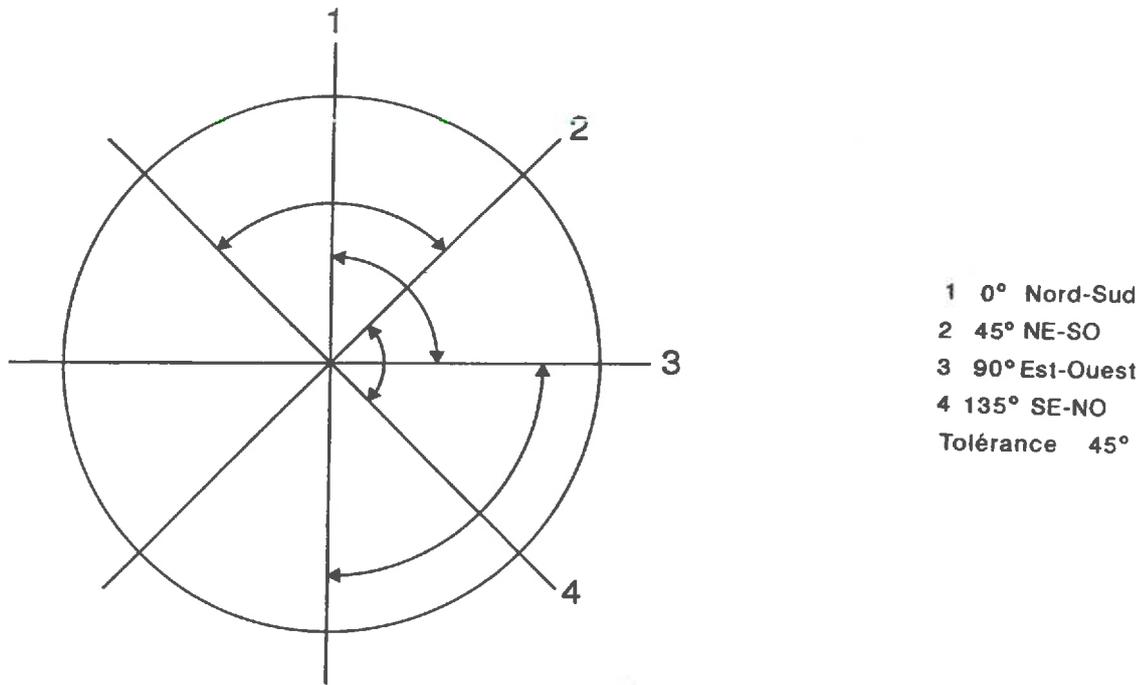


Figure 5.6 : Variogrammes directionnels de l'épaisseur du LA pour 4 classes de distance.

L'étude du variogramme expérimental met en évidence **deux structures imbriquées** (encore appelée structure gigogne) qui correspondent à une superposition de variations d'échelles différentes. Une première structure, de **portée d'environ 50 m**, semble confirmer la première analyse visuelle du jeu de données de 40 sondages complémentaires (§ I-1.2). Cette première variabilité, de l'ordre de la cinquantaine de mètres, montre que l'échantillonnage initial uniformément réparti n'aurait pas suffi à décrire l'intégralité de la structure spatiale de la variable "épaisseur du LA". Ceci justifie donc l'intérêt de l'échantillonnage semi-aléatoire complémentaire de 40 sondages. La deuxième structure, de **portée d'environ 240 m**, montre qu'il existe une autre variabilité, d'échelle supérieure. Au delà de 240 m, la variabilité de l'épaisseur du LA est **indépendante** de la distance entre les points de mesure.

I-2.2 Variogrammes directionnels

La figure 5.6 représente les variogrammes directionnels calculés pour **quatre classes de direction** (0° , 45° , 90° et 135° par rapport au Nord) avec une **tolérance de 45°** de part et d'autre (secteur angulaire de 90°) et ceci jusqu'à une distance de 500 m. Le choix d'une tolérance de 45° est guidé par la nécessité d'obtenir un nombre de couples de points suffisant pour l'estimation des variogrammes directionnels. Une tolérance inférieure aurait entraîné un **déficit** de couples de points. L'étude de ces variogrammes directionnels montre qu'ils se comportent comme le variogramme expérimental. Les quelques points s'écartant nettement du nuage principal sont pour la plupart générés à partir d'un nombre de couples de points inférieur à 50. L'interprétation visuelle générale de ces variogrammes directionnels **ne révèle pas** d'anisotropie nette.

I-2.3 Conclusion

L'étude du variogramme expérimental a mis en évidence :

- **deux structures imbriquées** correspondant à une superposition de variabilités d'échelles différentes,
- **l'absence d'anisotropie** dans la variabilité de l'épaisseur du LA,
- un **effet de pépité** qui représente 15% de la variance totale de l'échantillon. Ceci laisse supposer des erreurs de mesures ou une variabilité inférieure au pas d'échantillonnage. Or, les erreurs de mesures sur les sondages à la tarière sont d'environ ± 5 cm, c'est-à-dire une variance de 25 cm^2 . Ainsi, seulement 25 cm^2 des 85 cm^2 (soit 30%) de l'effet de pépité s'expliquerait par des erreurs de mesures, il reste donc une variabilité (70% de l'effet de pépité) **non analysée** par l'échantillonnage. Ceci laisse supposer que soit les erreurs de mesures sur les sondages à la tarière sont supérieures à ± 5 cm ou que le nombre de couples de points mesurés lors de l'échantillonnage semi-aléatoire complémentaire est insuffisant (le nombre de couples de points étant trop faible pour construire le variogramme à un pas inférieur à 20 m). On pourrait alors envisager un **échantillonnage plus resserré** sur le secteur de manière à

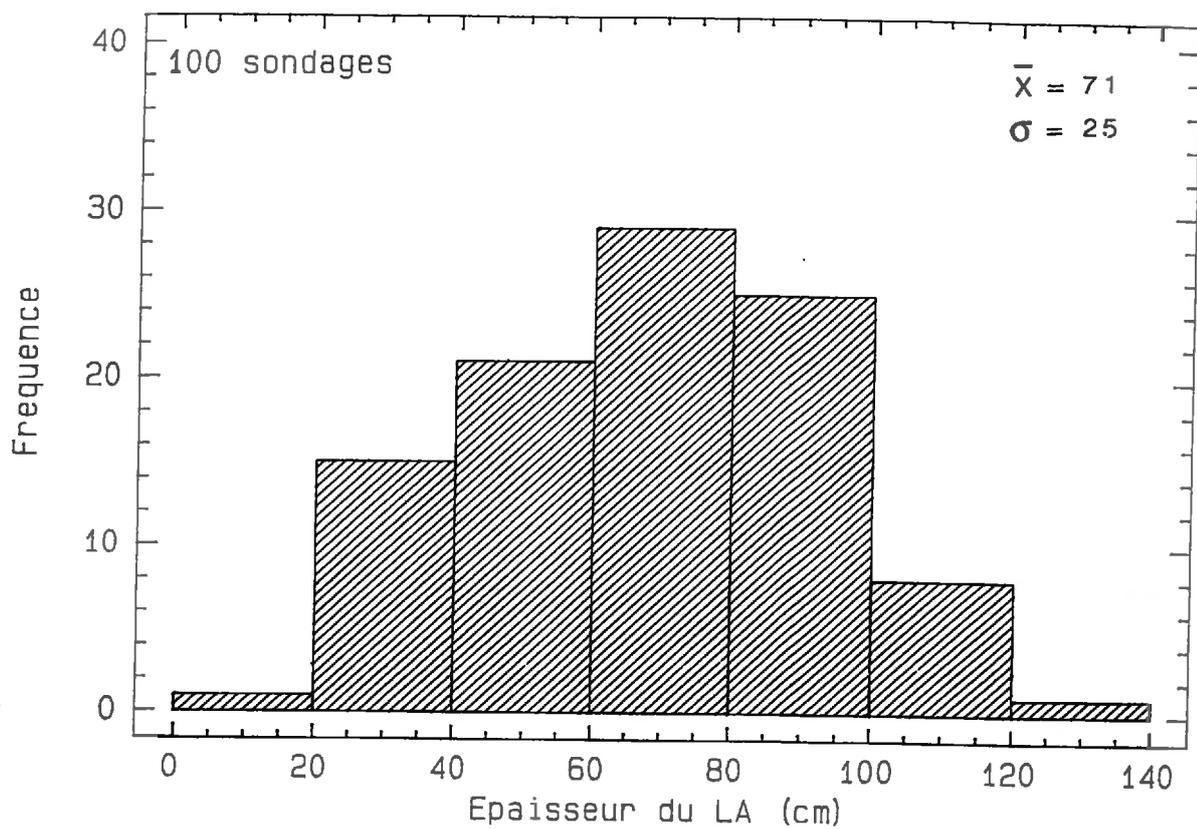


Figure 5.7 : Histogramme de fréquence de l'épaisseur du LA (100 sondages).

construire un variogramme expérimental plus détaillé aux faibles distances pour arriver à une meilleure cartographie.

II. INTERPOLATIONS

L'objectif de ce paragraphe est de réaliser une **interpolation** la plus précise possible des valeurs de l'épaisseur du LA sur l'ensemble du secteur d'étude. Dans un premier temps, nous allons comparer deux méthodes d'interpolation. La première est la méthode **TIN** non probabiliste définie au chapitre 4. Quant à la seconde, il s'agit du **krigeage**, méthode probabiliste également définie au chapitre 4. La comparaison s'effectuera à partir d'un **jeu de données indépendant** et nous calculerons divers critères statistiques qui permettront de **quantifier** la comparaison des deux méthodes d'interpolation.

Dans un deuxième temps, nous procéderons à l'interpolation des valeurs de l'épaisseur du LA à partir de l'**ensemble des données** dont nous disposons, ce qui permettra d'établir la carte **la plus précise possible** (à partir des données disponibles) des isopaches du LA sur la totalité du secteur d'étude, non sans avoir au préalable effectué une étude de voisinage. Un test de validation croisée permettra de discuter la qualité de l'estimation des valeurs d'épaisseur du LA et nous discuterons également la carte des écarts-types d'estimation issue du krigeage.

Enfin, nous évaluerons la **densité d'échantillonnage optimale** de manière à pouvoir discuter de la meilleure stratégie d'échantillonnage possible (en terme d'espacement de grille). Ainsi, pour un écart-type d'estimation préalablement choisi, nous pourrons déduire l'espacement de grille le mieux adapté.

II-1 Comparaison de deux méthodes d'interpolation sur la base de 100 sondages

II-1.1 Interpolation polynomiale : méthode TIN

1°) Analyse statistique du jeu de 100 données

L'analyse statistique élémentaire des 100 données uniformément réparties indique que la moyenne des épaisseurs est voisine de **71 cm** et l'écart-type de **25 cm**. Les épaisseurs minimale et maximale sont respectivement de 20 cm et 125 cm. Le coefficient de variation est de l'ordre de 35%. L'histogramme de la variable "épaisseur" possède une distribution **unimodale** (7 classes) (figure 5.7). Moyenne, médiane et mode ne sont pas très différents et possèdent des valeurs respectivement de 71, 75 et 70 cm, ce qui caractérise une distribution symétrique. D'autre part, avec le jeu de 100 données dont nous disposons, le test du χ^2 amène

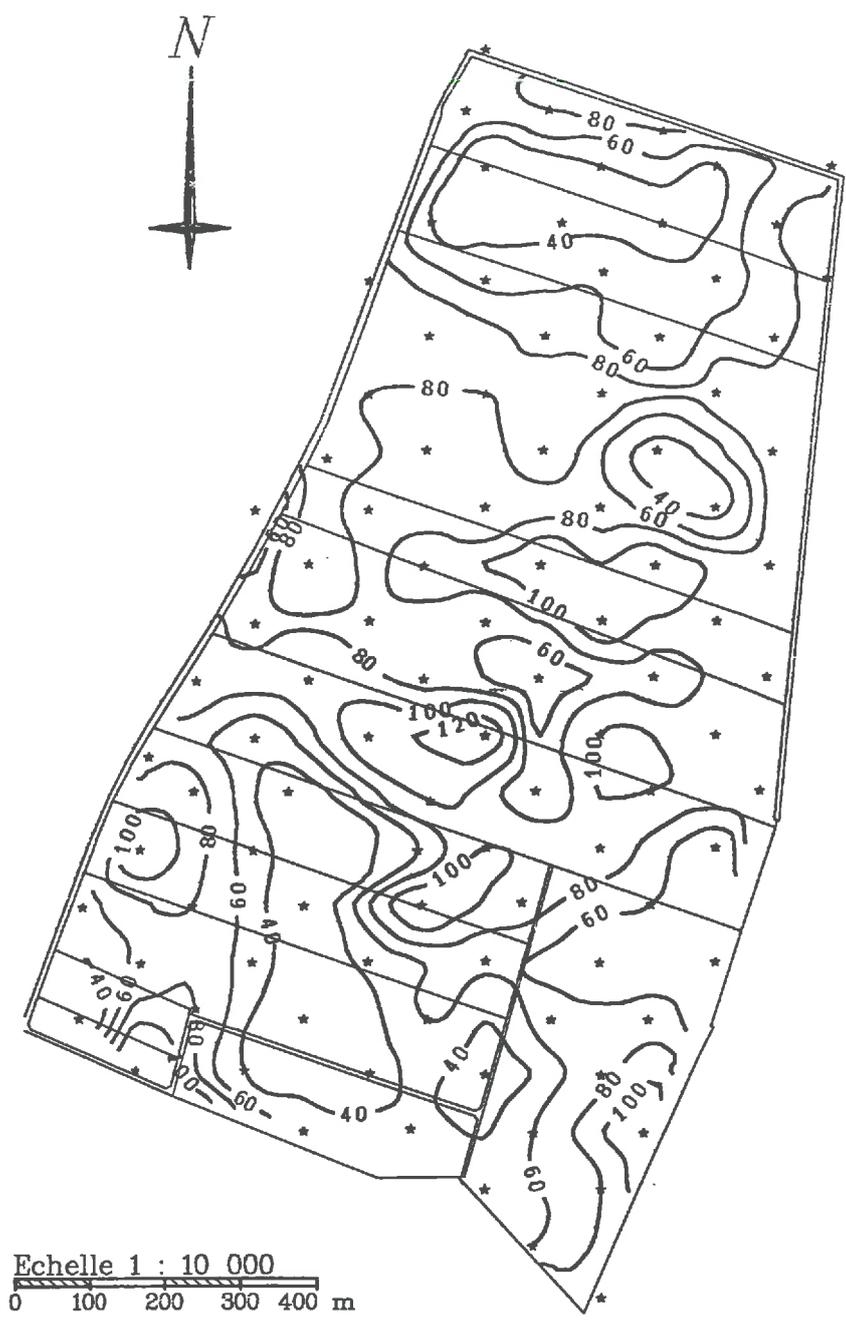


Figure 5.8 : Carte des isopaches du LA obtenus par la méthode TIN (100 sondages).
 équadistance 20 cm

à **accepter** l'hypothèse d'ajustement à une loi normale au niveau de probabilité de 5% ($\chi^2_{\text{calc.}} = 3,64 < \chi^2_{\text{théor.}} = 5,99$ pour 2 ddl).

2°) Interpolation

L'interpolation spatiale des valeurs expérimentales de l'épaisseur du limon-argileux sur notre secteur par la **méthode TIN** a permis de construire une **carte d'isopaches** (figure 5.8). Cette carte montre une succession, sans organisation très claire, de zones où le limon-argileux est relativement épais (> 100 cm) et de zones où le substrat calcaire est sub-affleurant (< 40 cm). Cependant, on remarque que les deux grandes zones les moins épaisses sont respectivement localisées au Nord et au Sud du secteur. Si on compare cette carte avec celle des altitudes (figure 2.5), on ne note pas de relation nette entre les variations de topographie et l'épaisseur de la couverture limono-argileuse. Notons cependant que la zone peu épaisse située au Nord est une des zones les plus élevées du secteur.

3°) Validation

La méthode d'interpolation utilisée a permis de construire une grille de maille carrée de 20 m renseignée de la valeur de l'épaisseur du limon-argileux au centre de chaque maille. Un essai de **validation** a été effectué à partir du jeu de données indépendant que nous avons constitué. Il faut toutefois noter que sur les 50 valeurs de validation, 4 valeurs n'ont pu être utilisées car elles se situaient en dehors de la zone interpolée. De ce fait, nous comparerons l'épaisseur du LA mesurée en **46 points** avec celle déduite de la carte obtenue par interpolation (figure 5.8).

Analyse statistique des valeurs estimées

Nous avons, dans un premier temps, réalisé une étude statistique des épaisseurs estimées par la méthode TIN. Le tableau 5.2 récapitule ces résultats.

La **moyenne** des données estimées par TIN **diffère légèrement** de celle des données observées ($\bar{Z}_{\text{obs.}} = 65$ cm, $\bar{Z}^*_{\text{est.}} = 70$ cm). Quant à l'**écart-type** des valeurs estimées, il est égal à celui des valeurs observées (21 cm) ce qui montre que l'interpolation **n'a pas diminué** la dispersion des valeurs de l'épaisseur autour de la moyenne.

L'**écart moyen** entre les valeurs observées et les valeurs estimées (a) - soit $E(Z^* - Z)$ - indique la bonne restitution des données et doit être le plus proche possible de 0. Dans notre étude, cette valeur est de 4,6 cm. En moyenne, nous pouvons donc considérer que les écarts entre valeurs estimées et valeurs observées ne sont pas négligeables. La réestimation des données présente un **biais systématique**. Le test de χ^2 amène à **accepter** l'hypothèse d'ajustement à une loi normale $\mathcal{N}_{(4,6 ; 23,9)}$ pour la différence $Z^* - Z$ au niveau de probabilité 5%

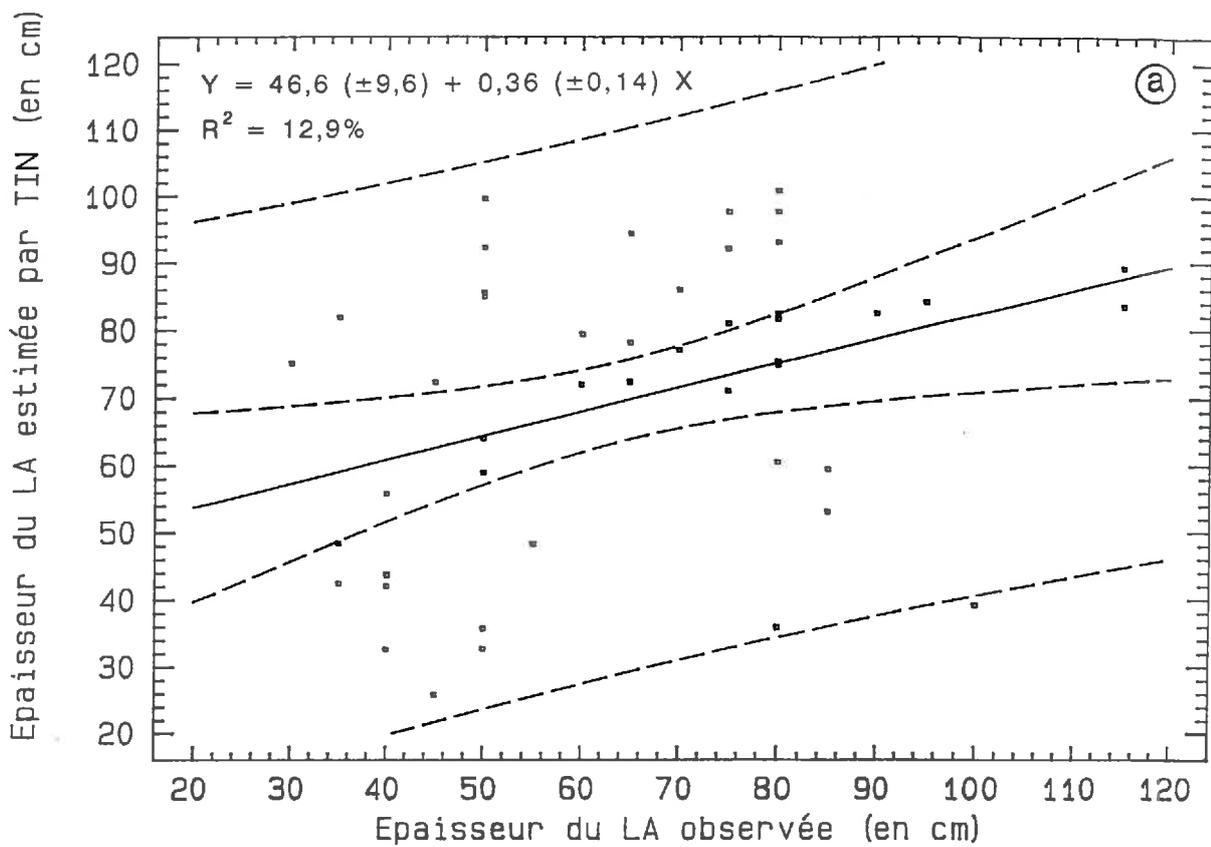


Figure 5.9a : Régression entre épaisseurs observées et épaisseurs estimées par la méthode TIN sur 46 points.

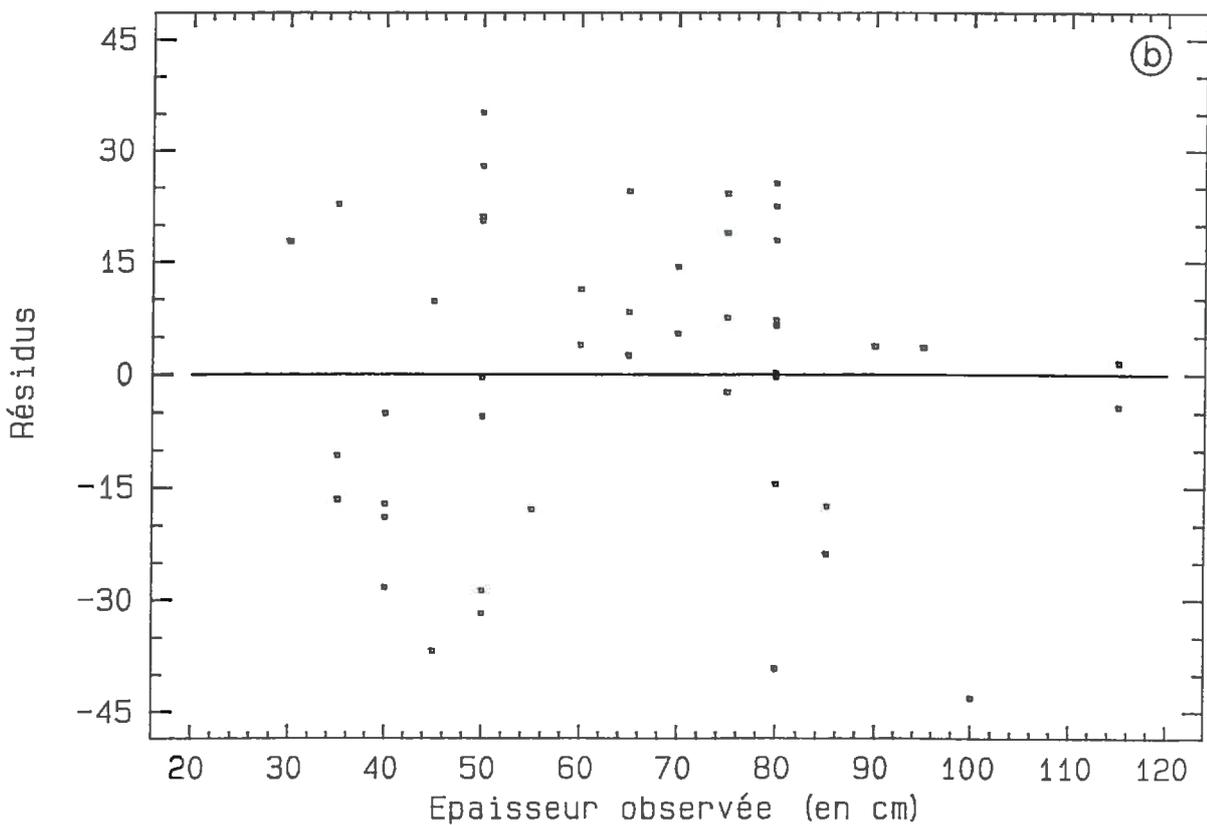


Figure 5.9b : Résidus de la régression.

($\chi^2_{\text{calc.}} = 2,31 < \chi^2_{\text{théo.}} = 9,49$ avec 4 degrés de liberté). L'écart-type de cet écart est de **23,9 cm**. Il permet d'estimer la précision de la réestimation des points de données.

Quant à l'**écart quadratique moyen** (b)- soit $E(Z^* - Z)^2$ - il donne l'écart à la 1^{ère} bissectrice et doit être le moins élevé possible. La racine carrée de cet écart donne une **erreur moyenne d'environ 24 cm**. Nous constatons alors que si l'écart moyen - $E(Z^* - Z)$ - est proche de 0, l'écart-type de l'écart moyen - $\sigma(Z^* - Z) = 23,9 \text{ cm}$ - et la racine carrée de l'écart quadratique moyen - $\sqrt{E(Z^* - Z)^2} = 24 \text{ cm}$ - sont similaires.

En théorie, si $E(Z^* - Z) = 0$,

on a :
mais,
d'où,

$$\sigma(Z^* - Z) = [\text{Var}(Z^* - Z)]^{1/2}$$

$$\text{Var}(Z^* - Z) = E[(Z^* - Z) - E(Z^* - Z)]^2 = E(Z^* - Z)^2$$

$$\sigma(Z^* - Z) = \sqrt{E(Z^* - Z)^2}$$

	Z	Z*	Z* - Z	(Z* - Z) ²
Minimum	30	26	-61	2,3
25 ^{ème} %tile	50	53	-7,6	55
Médiane	65	75	7,1	250
75 ^{ème} %tile	80	85	17,6	746
Maximum	115	101	50	3702
Moyenne	65	70	4,6 ^a	581 ^b
Ecart-type	21	21	23,9	802

Légende :

Z = Epaisseur Observée (en cm).

Z* - Z = Ecart valeurs estimées/observées

a = Ecart moyen (en cm)

Z* = Epaisseur Estimée (en cm).

(Z* - Z)² = Ecart quadratique.

b = Ecart quadratique moyen (en cm²).

Tableau 5.2 : Résultats de la validation de la méthode TIN sur 46 données indépendantes.

Notons que ces valeurs caractérisent le jeu de données dans son ensemble et que les colonnes sont indépendantes (elles ne s'obtiennent pas par opérations sur les précédentes).

Régression entre valeurs estimées et valeurs observées

Une étude statistique utilisant des méthodes de **régression linéaire simple** a été employée pour discuter les valeurs observées et estimées. Les valeurs de l'épaisseur observée constituent la variable indépendante de cette régression. Les valeurs estimées par le modèle d'interpolation constituent la variable dépendante (figure 5.9a).

L'analyse de la variance permet de tester si la variabilité prise en compte par le modèle de régression est significative. Le test F de Fisher (F = 6,52) qui teste si le coefficient de régression b est nul (donc que le modèle de régression n'est pas significatif) (H0) permet de rejeter H0 au niveau de probabilité 5% (Prob.Level = 1,4% <

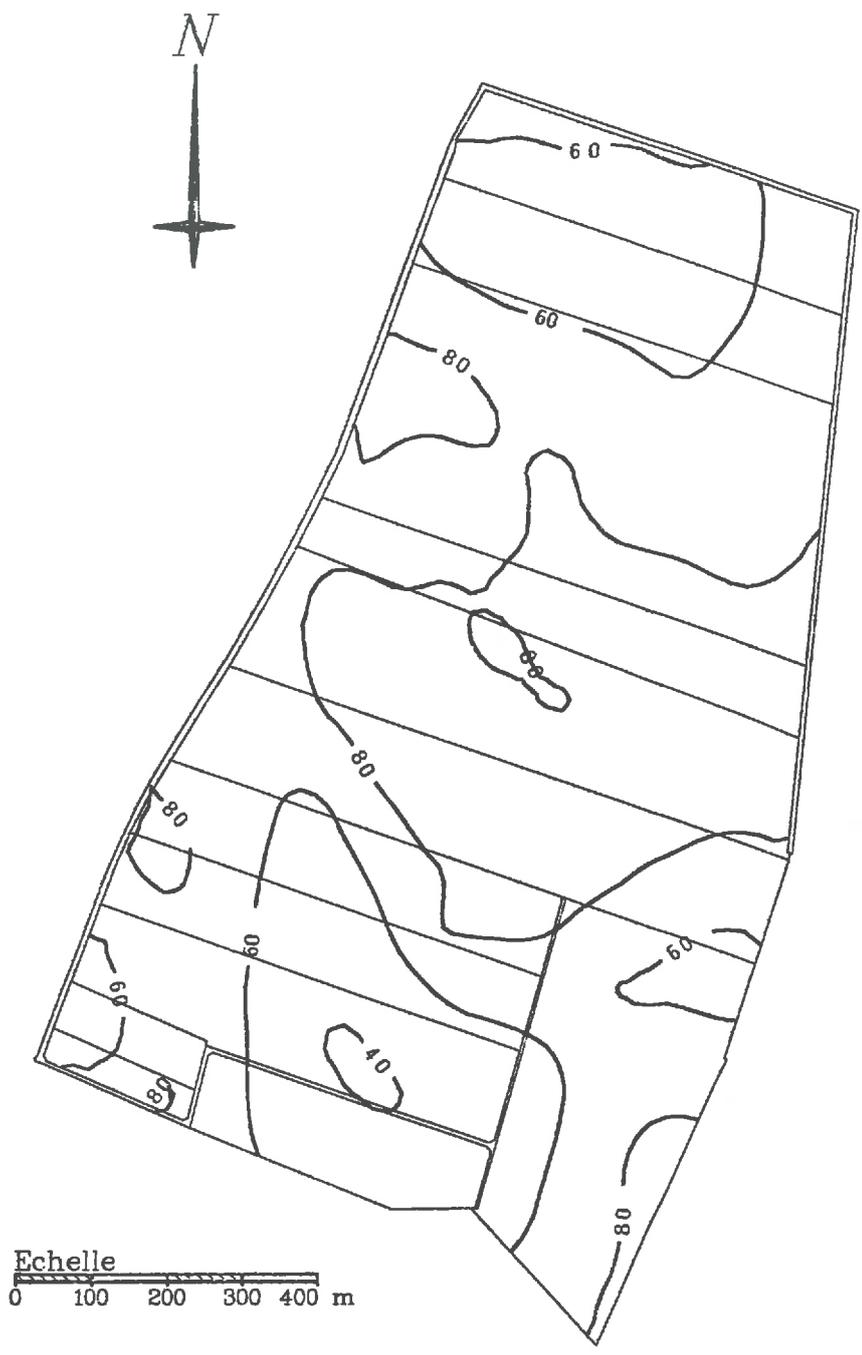


Figure 5.10 : Carte des isopaches du LA obtenus par krigeage (100 sondages).
équidistance 20 cm

5%). Ainsi, nous ne pouvons pas rejeter le modèle théorique de régression que nous venons d'ajuster au nuage de points avec un risque de 5% d'erreur. D'autre part, l'analyse visuelle des résidus de la régression (figure 5.9b) montre une répartition sans structure. L'analyse paraît convenable.

L'erreur standard de l'estimation est d'environ **20 cm**. Le coefficient de corrélation de cette régression est de **0,36** pour 44 degrés de liberté (ddl) (coefficient significativement différent de 0 au niveau de probabilité de 5%). Mais la valeur du R^2 ($R^2 = 12,9\%$) indique une faible prédiction des valeurs observées par les valeurs estimées dans le modèle d'interpolation. En effet, seulement **13% de la variance** se trouve expliquée par le modèle. En traçant la droite d'équation $y = x$ qui représente l'égalité des valeurs théoriques aux valeurs observées sur la figure 5.9a, on remarque que le modèle tend à surestimer les faibles valeurs de l'épaisseur et à sous-estimer les fortes.

Conclusion

Nous avons estimé les valeurs de l'épaisseur en tout point du secteur par interpolation TIN à partir d'un jeu de 100 sondages régulièrement répartis sur le secteur selon une maille carrée. Lorsque l'on compare les 46 valeurs mesurées du jeu de données indépendant aux 46 valeurs estimées par interpolation, on constate qu'il existe une relation statistique mais que cette relation n'explique que **13%** de la variance. Il existe une différence importante entre valeurs mesurées et valeurs estimées qui indique la **faible fiabilité** de l'interpolation effectuée à partir du jeu de données dont nous disposons.

II-1.2 Interpolation probabiliste : Krigeage

Avec le même jeu de données que pour l'interpolation non probabiliste, nous avons réalisé une interpolation par krigeage afin de comparer les deux méthodes.

1°) Interpolation

La carte des isopaches du limon-argileux issue de l'interpolation spatiale par krigeage des valeurs expérimentales d'épaisseur sur notre secteur (figure 5.10) montre comme la précédente deux zones d'épaisseur faible à moyenne (entre 40 et 60 cm) du LA situées respectivement au Nord et au Sud du secteur d'étude. Dans la zone centrale, l'épaisseur est sensiblement plus élevée (entre 80 et 100 cm). Cette carte est nettement **moins fragmentée** que celle obtenue par la méthode TIN non probabiliste. Les tendances générales sont similaires, mais les extrêmes sont **partiellement gommés** (absence d'épaisseur > 120 cm et les épaisseurs < 40 cm sont en nombre réduit) et les polygones représentant les valeurs extrêmes sont plus fragmentés. Toutefois, cette dernière tendance est normale car, de manière générale, les méthodes d'interpolation par pondération (probabilistes ou non) ont tendance à

lisser les valeurs extrêmes parce qu'un estimateur, même optimal, ne peut restituer des détails qui n'ont pas été observés.

2°) Validation à partir du jeu de données indépendant

Analyse statistique des valeurs estimées

De la même manière que pour l'interpolation TIN, la validation de l'interpolation par krigeage a été réalisée sur un échantillon de 46 données indépendantes du jeu de 100 données initial. L'étude statistique des épaisseurs estimées par krigeage est reprise dans la tableau 5.3.

	Z	Z*	Z* - Z	(Z* - Z) ²
Minimum	30	43	-39	0
25 ^{ème} %tile	50	60	-3	33
Médiane	65	73	7	150
75 ^{ème} %tile	80	81	14	546
Maximum	115	94	44	1929
Moyenne	65	70	4,8 ^a	379 ^b
Ecart-type	21	14	19	499

Légende :

Z = Epaisseur Observée (en cm).

Z* - Z = Ecart valeurs estimées/observées

a = Ecart moyen (en cm)

Z* = Epaisseur Estimée (en cm).

(Z* - Z)² = Ecart quadratique.

b = Ecart quadratique moyen (en cm²).

Tableau 5.3 : Résultats de la validation du krigeage sur 46 données indépendantes
(les colonnes sont indépendantes)

La **moyenne** des données estimées par krigeage **diffère légèrement** de celle des données observées ($\bar{Z}_{obs.} = 65$ cm, $\bar{Z}_{est.}^* = 70$ cm). Quant à l'**écart-type** des valeurs estimées (14 cm), il est nettement inférieur à celui des valeurs observées (21 cm). Ceci montre que l'interpolation a **diminué la dispersion** des valeurs de l'épaisseur autour de la moyenne.

L'**écart moyen** entre les valeurs observées et les valeurs estimées (a) est de 4,8. En moyenne, nous pouvons donc considérer que les écarts entre valeurs estimées et valeurs observées ne sont pas négligeables. La réestimation des points de données présente un **biais systématique**. Le test de χ^2 amène à accepter l'hypothèse d'ajustement à une loi normale $\mathcal{N}_{(4,8; 19)}$ pour la différence Z* - Z au niveau de probabilité $\alpha = 5\%$ ($\chi^2_{calc.} = 1,24 < \chi^2_{théo.} = 5,99$ avec 2 degrés de liberté). L'écart-type de cet écart permet d'estimer la précision de la réestimation des points de données : il est de **19 cm**.

L'écart quadratique moyen (b) est de 379 cm². La racine carrée de cet écart donne une erreur moyenne de 19,5 cm. L'écart-type de l'écart moyen est différent de la racine carrée de l'écart quadratique moyen car l'écart moyen est différent de 0 soit : $\{\sigma(Z^* - Z) \neq E[(Z^* - Z)^2]^{1/2} \text{ car } E(Z^* - Z) \neq 0\}$.

Régression entre valeurs estimées et valeurs observées

Une étude statistique utilisant des méthodes de régression linéaire permet de discuter de la relation entre les valeurs de l'épaisseur observée qui constituent la variable indépendante de cette régression et les valeurs estimées par krigeage qui constituent la variable dépendante (figure 5.11a).

L'analyse de la variance permet de tester si la variabilité prise en compte par le modèle de régression est significative. Le test de Fisher ($F = 12,6$) permet de rejeter H_0 ($H_0 =$ le coefficient de régression b est nul) au niveau de probabilité 5% (Prob.Level = 0,1% < 5%). Ainsi, nous ne pouvons pas rejeter le modèle théorique de régression que nous venons d'ajuster au nuage de points avec un risque de 5% d'erreur. De plus, l'analyse visuelle des résidus de la régression (figure 5.11b) montre une répartition sans structure.

L'erreur standard de l'estimation est d'environ 12 cm. Le coefficient de corrélation de cette régression est de 0,47 pour 44 degrés de liberté (ddl) (coefficient significativement différent de 0 au niveau de probabilité de 5%). La valeur du R^2 ($R^2 = 22,3\%$) montre une prédiction des valeurs observées par les valeurs estimées supérieure au modèle TIN avec 22% de la variance qui se trouve expliquée par le modèle. En traçant la droite d'équation $y = x$ qui représente l'égalité des valeurs théoriques aux valeurs observées sur la figure 5.11a, on remarque que le modèle tend encore à surestimer les faibles valeurs de l'épaisseur et à sous-estimer les fortes ce qui est normal car les interpolations par krigeage ont tendance à lisser les valeurs extrêmes.

3°) Validation croisée

Nous comparons ici successivement la valeur réelle d'un point avec son estimation par krigeage lorsqu'elle a été exclue de l'ensemble des points de données (cf. chapitre 4). Nous pourrions ainsi tester la pertinence de l'ajustement de la courbe théorique aux points expérimentaux du variogramme. Le tableau 5.4 récapitule les résultats du test de validation croisée sur les 100 sondages uniformément répartis. Il indique également des indices de robustesse (en gras notés a et c) qui caractérisent cette validation. Notons que l'obtention des écarts-types d'estimation du krigeage ($\sigma_{\text{est.}}$) permet le calcul de l'écart quadratique moyen réduit : $(EQMR = E[(Z^* - Z)^2 / \sigma_{\text{est.}}^2])$.

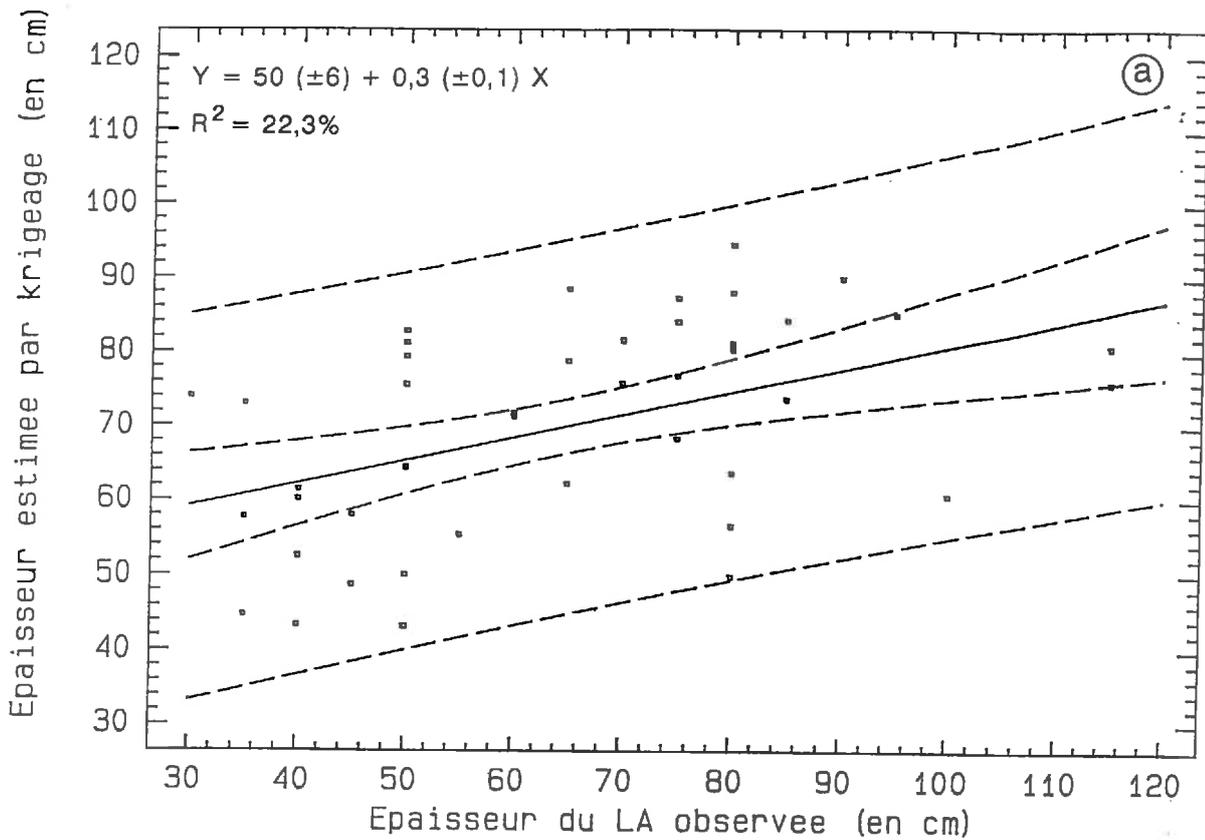


Figure 5.11a : Régression entre épaisseurs observées et épaisseurs estimées par krigeage sur 46 points.

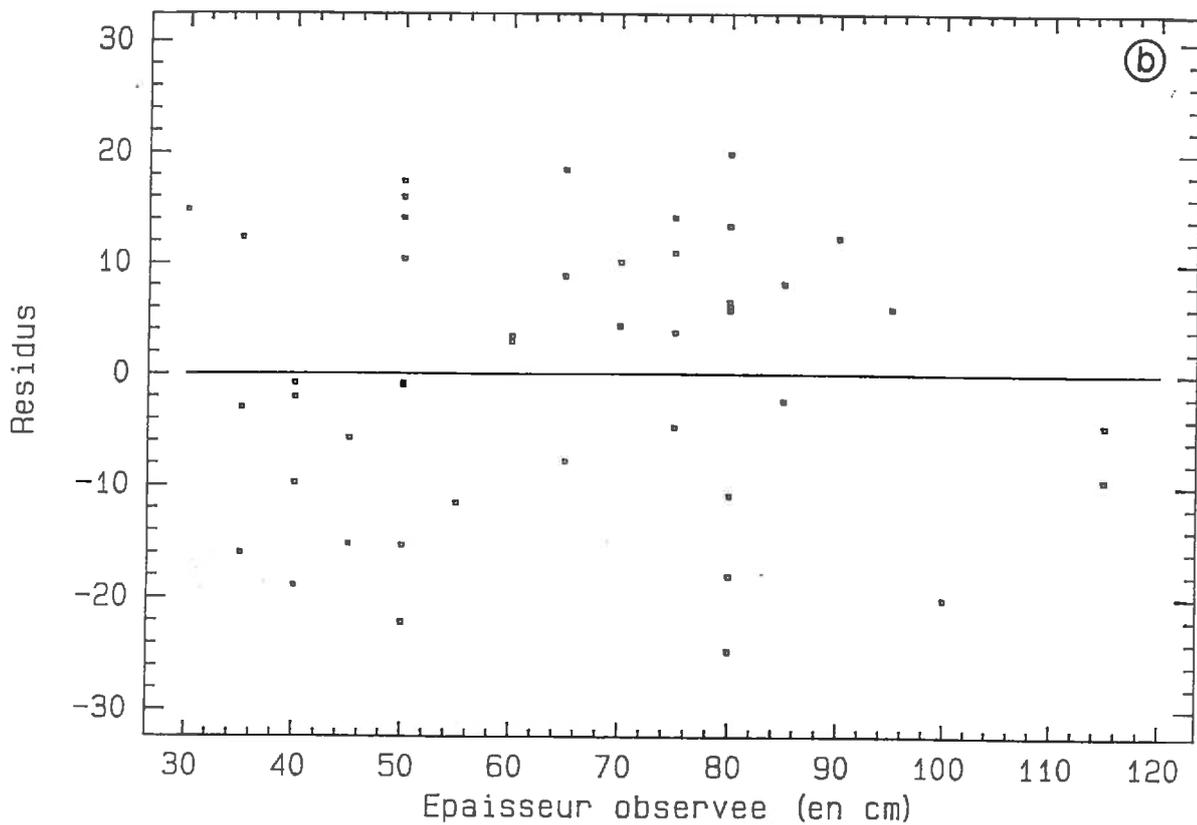


Figure 5.11b : Résidus de la régression.

	Z	Z*	$\sigma_{est.}$	Z* - Z	(Z* - Z) ²	(Z* - Z)/ $\sigma_{est.}$	(Z* - Z) ² / $\sigma_{est.}^2$
Minimum	20	44	21	-70	0,03	-3,1	0,0
25 ^{ème} %tile	50	62	21,4	-16,5	86,6	-0,8	0,2
Médiane	75	71	21,4	-0,6	272	-0,03	0,6
75 ^{ème} %tile	90	80	22	17	673	0,8	1,4
Maximum	125	97	25	50,6	4906	2,2	9,3
Moyenne	71	70	21,8	-0,5 ^a	534 ^b	-0,02	1,1 ^c
Ecart-type	25	12,6	0,7	23,2	727	1,06	1,5

Légende :

Z = Epaisseur Observée (cm).

$\sigma_{est.}$ = Ecart-type d'estimation (cm).

(Z* - Z)² = Ecart quadratique

(Z* - Z)²/ $\sigma_{est.}^2$ = Ecart quadratique réduit.

Z* = Epaisseur Estimée (cm).

Z* - Z = Ecart valeurs estimées/observées (cm).

Z* - Z/ $\sigma_{est.}$ = Ecart réduit.

a, b et c = (cf. texte).

Tableau 5.4 : Résultats du test de validation croisée (100 sondages).

Notons que ces valeurs caractérisent le jeu de données dans son ensemble et que les colonnes sont indépendantes (elles ne s'obtiennent pas par opérations sur les précédentes).

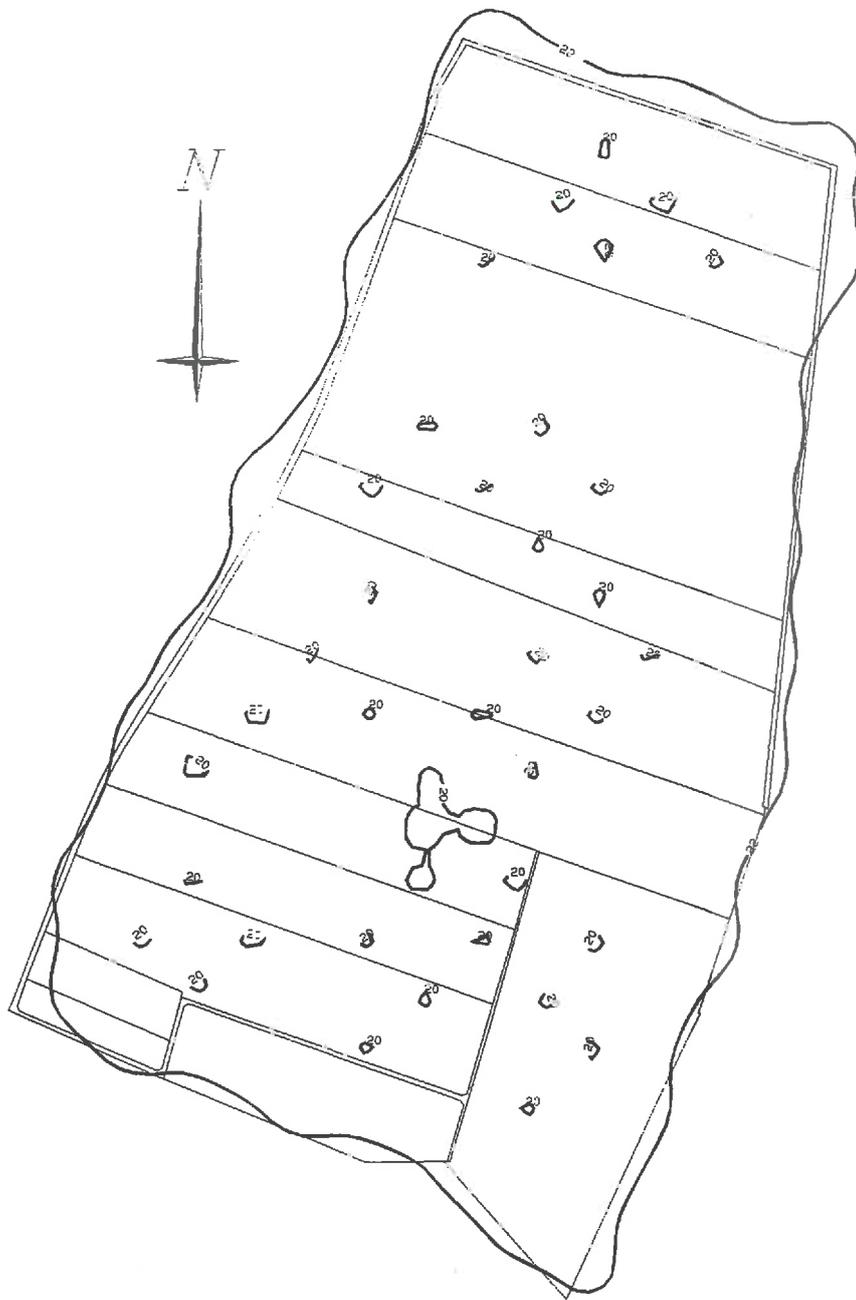
La **moyenne** des données estimées par krigeage est **très proche** de celle des données observées ($\bar{Z}_{obs.} = 71$ cm, $\bar{Z}_{est.} = 70$ cm). L'**écart-type** des valeurs estimées (12,6 cm) est nettement inférieur à celui des valeurs observées (25 cm). Ceci montre une **distribution moins étalée** des valeurs de l'épaisseur du limon-argileux estimée par krigeage. L'écart-type d'estimation $\sigma_{est.}$ est en moyenne égal à $21,8 \pm 0,7$ cm. Cette valeur est légèrement inférieure à celle de l'écart-type des valeurs d'épaisseur observées ($\sigma_{obs.} = 25$ cm).

L'**écart moyen** entre les valeurs observées et les valeurs estimées (a) est de **-0,5**. Cet écart moyen est proche de 0 et nous pouvons donc considérer que les écarts entre valeurs estimées et valeurs observées sont négligeables. La réestimation des points de données **ne présente pas** de biais systématique. Le test de χ^2 amène à accepter l'hypothèse d'ajustement à une loi normale $N_{(-0,5; 23,2)}$ pour la différence Z* - Z au niveau de probabilité $\alpha = 5\%$ ($\chi^2_{calc.} = 0,96 < \chi^2_{théo.} = 12,6$ avec 6 degrés de liberté). La précision de la réestimation des points de mesure est donnée par l'écart-type de cet écart, il est de **23,2 cm**.

L'**écart quadratique moyen** (b) est de 534 cm². La racine carrée de cet écart donne une erreur moyenne d'environ **23 cm**.

L'**écart quadratique moyen réduit** (c) est la moyenne quadratique de l'écart entre valeurs réelles et valeurs estimées (Z* - Z), sur l'écart-type estimé ($\sigma_{est.}$) soit :

$$\frac{1}{100} \sum_1^{100} \frac{(Z^* - Z)^2}{\sigma_{est.}^2}$$



Echelle
 0 100 200 300 400 m

Figure 5.12 : Carte des écarts-types d'estimation issus du krigeage sur 100 sondages.
 équidistance 20 cm

Il rend compte de l'adéquation entre l'écart-type estimé ($\sigma_{est.}$) et l'erreur d'estimation ($Z^* - Z$) (Gascuel-Oudou, 1984). Il doit être voisin de 1 ce qui est le cas ici ($c = 1,1$). Ainsi, l'écart-type estimé est sensiblement équivalent, en valeur absolue, à l'erreur d'estimation.

Les valeurs de ces différents indices montrent que les données ont été **correctement réestimées** lors de l'interpolation par krigeage.

4°) Carte des écarts-types d'estimation

Il s'agit dans ce paragraphe de calculer pour chaque valeur krigée un écart-type d'estimation qui déterminera l'**intervalle de confiance de l'interpolation**. Il est alors possible de réaliser, de la même manière que pour les épaisseurs estimées par krigeage, une **carte en isovalues de ces écarts-types d'estimation**. Cette carte est présentée figure 5.12. La majorité de la surface cartographiée par krigeage possède des écarts-types d'erreurs de **22 cm**. Les zones les plus fiables sont les zones situées à proximité des points de mesure, les écarts-types d'erreurs pouvant alors atteindre 20 cm. Toutefois, ces écarts-types d'estimation ne descendent jamais en dessous de 20 cm.

II-1.3 Comparaison des deux méthodes

1°) Comparaison

Les deux méthodes que nous avons employées pour l'interpolation des valeurs d'épaisseur du LA ont donné des résultats sensiblement **différents** (Tableau 5.5). Dans un premier temps, l'analyse du coefficient de corrélation entre valeurs estimées et valeurs observées pour chacune des deux méthodes montre un R supérieur en faveur du krigeage pour le même degré de liberté. La variance expliquée par le modèle d'interpolation obtenue par krigeage est supérieure à celle obtenue avec la méthode TIN. Par contre, l'analyse des droites de régression montre que les pentes (b) et les ordonnées à l'origine (a) de ces droites ne sont pas significativement différentes.

Cependant, l'analyse de **critères statistiques** tels que écart moyen, écart-type de l'écart ($Z^* - Z$) et écart quadratique moyen font apparaître une nette préférence pour la méthode d'interpolation probabiliste. En effet, même si les écarts moyens sont similaires, l'écart-type de l'écart ($Z^* - Z$) et l'écart quadratique moyen, qui tous deux quantifient la **précision** de l'estimation des données, sont nettement à l'**avantage du krigeage**.

Modèles	Coefficients					
	R	(a)	(b)	$E(Z^* - Z)$	$\sigma(Z^* - Z)$	$E(Z^* - Z)^2$
Krigeage (probabiliste)	0,47	50 ± 6	0,31 $\pm 0,09$	4,8	19	379
TIN (non probabiliste)	0,36	47 $\pm 9,6$	0,36 $\pm 0,14$	4,6	24	581

Tableau 5.5 : Comparaison des résultats des analyses statistiques pour les deux méthodes d'interpolation utilisées.

2°) Conclusion

En estimant les valeurs de l'épaisseur en tout point du secteur par deux méthodes différentes à partir d'un même jeu de 100 sondages régulièrement répartis sur le secteur selon une maille carrée et en comparant les 46 valeurs mesurées du jeu de données indépendant aux 46 valeurs estimées par interpolation, on constate, après analyses statistiques, qu'il existe une **différence** dans la réestimation des données selon la méthode utilisée. Ainsi, la méthode d'interpolation non probabiliste (TIN) **n'est pas adaptée** au jeu de données étudié. La relation statistique mis en évidence n'explique que 13% de la variance et il existe une différence importante entre valeurs mesurées et valeurs estimées. Quant au krigeage (méthode probabiliste), il permet d'expliquer un **pourcentage de variance supérieur (>22%)**, mais surtout la précision de l'estimation des données est nettement **améliorée** (19 cm pour le krigeage contre 24 cm pour la méthode TIN soit 5 cm), le krigeage minimise donc la dispersion de valeurs estimées autour de la moyenne. Pour donner un ordre de grandeur à cette amélioration, rappelons que l'erreur commise lors de la mesure de l'épaisseur du LA par sondages à la tarière est de ± 5 cm. De ce fait, pour la suite de ce travail, nous utiliserons le **krigeage** pour établir la **carte des isopaches du LA** à partir de la totalité des sondages à la tarière.

II-2 Interpolation par krigeage sur la totalité des sondages

Nous allons, dans ce paragraphe, établir la carte de l'épaisseur de la couverture de sol, (carte des isopaches du LA). Pour cela, nous avons pris en compte **l'ensemble des données** dont nous disposons. Ainsi, pour obtenir le maximum de précision dans l'interpolation, nous effectuerons ce krigeage sur l'ensemble des 190 sondages à la tarière répartis sur le secteur d'étude, selon une **maille de 106 m** pour 150 sondages et selon une répartition "**semi-aléatoire**" pour les 40 sondages complémentaires. L'essentiel des calculs pour cette opération de krigeage a été réalisé à partir du logiciel GEO-EAS.

Après avoir discuté des problèmes de mise en oeuvre du krigeage, nous allons réaliser la carte des isopaches du LA et celle des écarts-types d'estimation non sans avoir au préalable discuté des problèmes de voisinage entre points. Par la suite, nous réaliserons une validation croisée de la carte krigée et nous analyserons les indices de robustesse du krigeage. Enfin, nous discuterons des différents résultats obtenus.

II-2.1 Etude du voisinage

L'estimation par krigeage permet d'évaluer en un point de coordonnées quelconques, une propriété définie en des points expérimentaux. Ainsi, le point à estimer sera-t-il entouré de points expérimentaux qui seront appelés des "voisins". Rappelons que très souvent, l'hypothèse intrinsèque n'est vérifiée que localement (cf. chapitre 4). De ce fait, le krigeage sera réalisé avec un nombre limité de voisins autrement dit par "voisinage glissant". La répartition et la position de ces voisins constituent ce qu'on appelle *l'étude de voisinage* préliminaire à toute estimation par krigeage. Le logiciel GEO-EAS permet de réaliser cette étude de voisinage. Il permet en particulier de définir un rayon de recherche maximal (*search radius*) au delà duquel les points expérimentaux ne seront plus pris en compte pour l'estimation. Ce rayon maximum de recherche a ici été fixé à 245 m, valeur qui correspond à la distance d'ajustement optimale de la courbe théorique jusqu'à la deuxième portée du variogramme expérimental (cf. §.I-2). Le fait qu'aucune anisotropie n'ait été détectée lors de l'analyse des variogrammes directionnels permet d'étendre le rayon maximum de recherche dans toutes les directions du plan. Ainsi se trouve défini pour chaque point, un cercle de recherche (de 245 m de rayon), qui sera divisé en 4 secteurs équivalents de manière à répartir uniformément les voisins servant à l'estimation. Pour chaque secteur, un nombre maximal (8) et un nombre minimal (4) de voisins sont donnés pour l'estimation par krigeage. Cette dernière option permet en effet de définir un nombre limité de voisins (entre 4 et 24) de manière à respecter le plus possible l'hypothèse intrinsèque (cf. chap 4). Un choix de 8 voisins par secteur (soit $4 \times 8 = 32$ points expérimentaux au total pour un point à estimer) paraît raisonnable aussi bien du point de vue temps de calcul que de celui de la précision des estimations (Voltz, communication orale). Un nombre minimal de voisins est fixé pour ne pas effectuer une estimation qui comporterait un nombre insuffisant de points (4 voisins au minimum). Enfin, un contrôle du nombre consécutif de secteurs vides de points expérimentaux est obtenu grâce à une dernière option, ceci dans le but de limiter les extrapolations trop hasardeuses. Ce nombre est fixé à 3 secteurs vides consécutifs pour notre étude.

II-2.2 Mise en oeuvre

Les estimations par krigeage seront réalisées aux noeuds d'une grille régulière préalablement définie par son abscisse et son ordonnée origine ($X = 542085$ m ; $Y = 2336888$ m, en coordonnées Lambert II étendue). A partir de ce **point origine** la grille est construite en

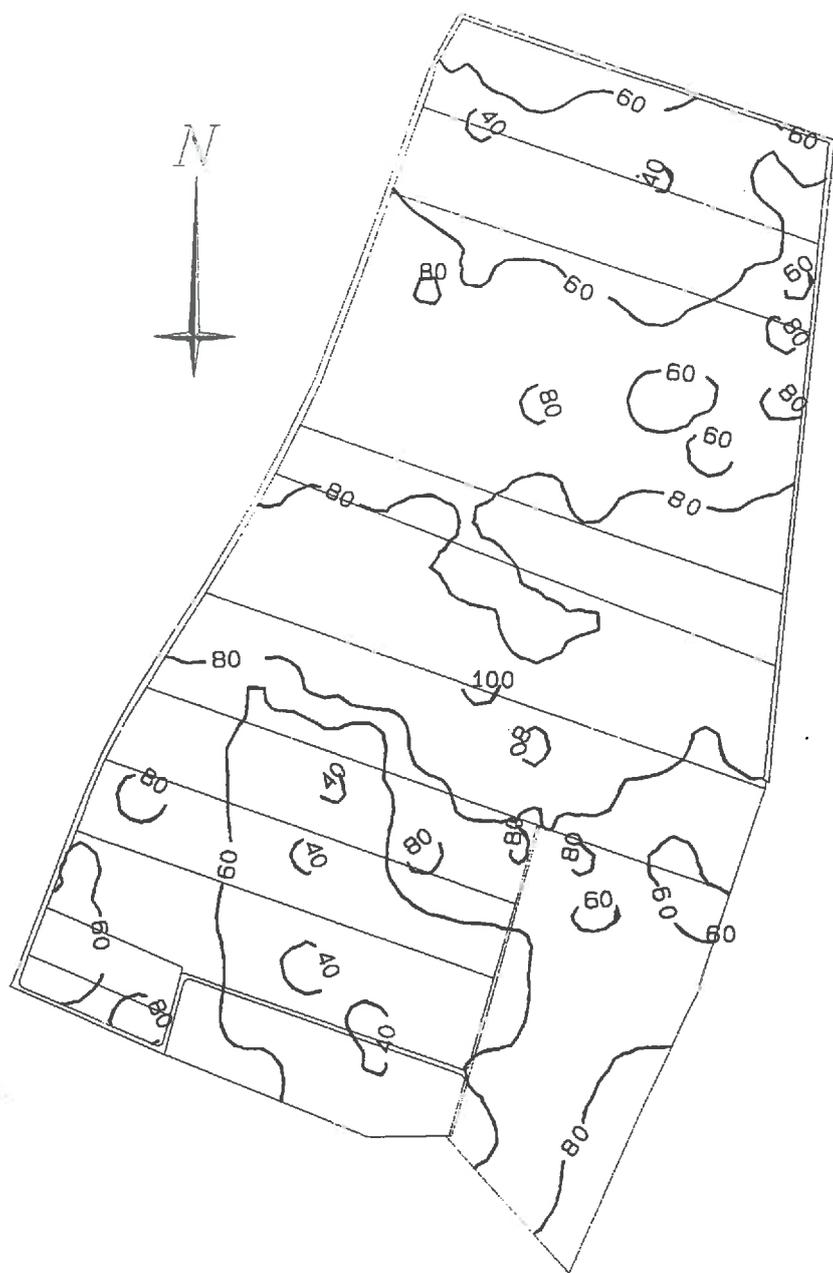


Figure 5.13 : Isopaches du LA obtenus par krigeage sur l'ensemble des données (190 sondages).

(équidistance 20 cm)

précisant la **maille** de la grille (20 x 20 m) et le **nombre maximal de pas** (80 en X et 100 en Y). Nous obtenons ainsi une grille qui couvre la totalité du secteur d'étude et aux noeuds de laquelle sera estimée par krigeage l'épaisseur du LA. Ces estimations peuvent être visualisées soit sous forme de bloc diagramme, soit sous forme de **cartes d'isovaleurs**. Nous avons choisi cette dernière forme pour la représentation de nos résultats.

II-2.3 Résultats

1°) Carte des isopaches

Les résultats du krigeage sont alors transférés sous forme de matrice lignes-colonnes dans le Système d'Information Géographique (SIG) Arc/Info sous environnement Unix (station de travail Sun 4/160) pour la construction des courbes d'isovaleurs de l'épaisseur (isopaches) du LA (figure 5.13). Cette carte montre, comme les précédentes établies à partir des 100 sondages, deux zones d'épaisseur faible à moyenne (entre 40 et 60 cm) du LA situées au Nord et au Sud du secteur d'étude. Dans la zone centrale, l'épaisseur est sensiblement plus élevée (supérieure à 80 cm). Cette carte est nettement **plus fragmentée et plus tourmentée** que celle obtenue par krigeage sur 100 sondages. Cependant, les tendances générales restent similaires.

2°) Carte des écarts-types d'estimation

GEO-EAS calcule également pour chaque valeur krigée un **écart-type d'estimation**. Il est alors possible de réaliser, de la même manière que pour les épaisseurs estimées par krigeage, une carte en isovaleurs de ces écarts-types d'estimation. Cette carte est présentée figure 5.14. Nous constatons que les erreurs les plus importantes se situent en **bordure** du secteur ce qui n'est pas étonnant du fait de la plus **faible densité** de points dans ces zones. La majorité de la surface cartographiée par krigeage possède des écarts-types d'erreurs compris entre **20 et 22 cm**. Les zones les plus fiables sont évidemment les zones les plus échantillonnées qui ont des écarts-types d'erreurs pouvant diminuer **jusqu'à 16 cm**.

II-2.4 Validation croisée

1°) Résultats

De la même manière que dans le paragraphe II-1.2, nous comparerons ici successivement la valeur réelle d'un point avec son estimation par krigeage lorsqu'elle a été exclue de l'ensemble des points de données. Nous pourrions ainsi tester la **pertinence de la réestimation** des valeurs de l'épaisseur aux points expérimentaux. Le tableau 5.6 récapitule les résultats du test de validation croisée sur les 190 sondages. Il indique également des

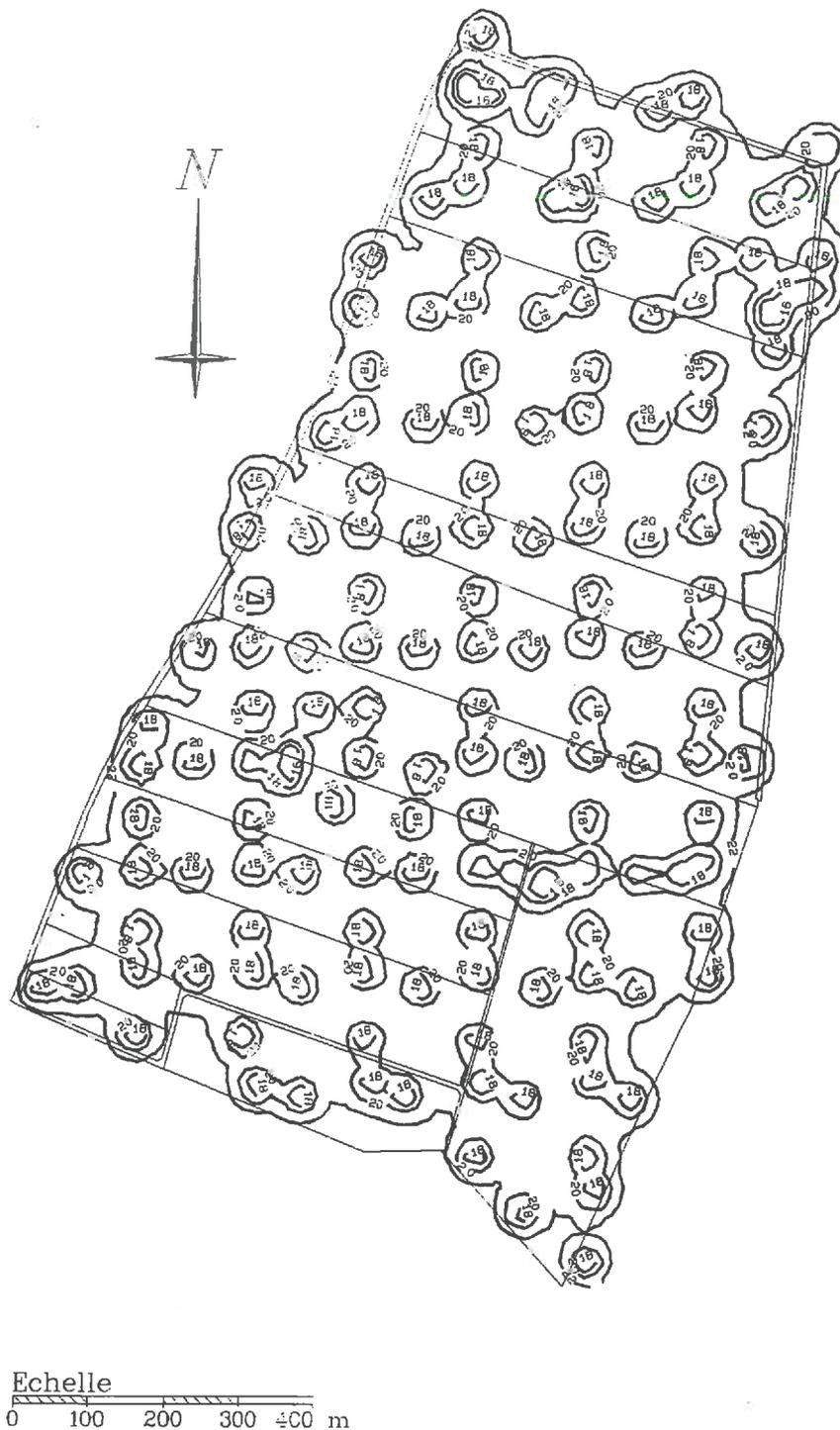


Figure 5.14 : Carte des écarts-types d'estimation issus du krigeage sur 190 sondages.
(équidistance 20 cm)

indices de robustesse (en gras notés a et c) qui caractérise cette validation. Notons que cette validation croisée est la **seule réalisable** même si elle est issue du même jeu de données que celui ayant servi pour l'analyse structurale et pour l'interpolation.

	Z	Z*	$\sigma_{est.}$	Z* - Z	(Z* - Z) ²	(Z* - Z)/ $\sigma_{est.}$	(Z* - Z) ² / $\sigma_{est.}^2$
Minimum	20	35,7	10,4	-62,6	0	-2,8	0
25 ^{ème} %tile	50	57,4	21,6	-14,6	28,7	-0,7	0,1
Médiane	67,5	67,8	22,1	0,8	173	0,04	0,5
75 ^{ème} %tile	85	77,1	22,3	13	555	0,7	1,2
Maximum	125	89,5	24,8	45,5	3915	2,7	7,7
Moyenne	67,3	67	20,4	-0,3^a	423^b	-0,01	0,99^c
Ecart-type	23,5	13,4	3,9	20,6	587	1	1,4

Légende :

Z = Epaisseur Observée (cm).

$\sigma_{est.}$ = Ecart-type d'estimation (cm).

(Z* - Z)² = Ecart quadratique

(Z* - Z)²/ $\sigma_{est.}^2$ = Ecart quadratique réduit.

Z* = Epaisseur Estimée (cm).

Z* - Z = Ecart valeurs estimées/observées (cm).

Z* - Z/ $\sigma_{est.}$ = Ecart réduit.

a, b et c = (cf. texte).

Tableau 5.6 : Résultats du test de validation croisée sur la totalité des données (190).

Notons que ces valeurs caractérisent le jeu de données dans son ensemble et que les colonnes sont indépendantes (elles ne s'obtiennent pas par opérations sur les précédentes).

La **moyenne** des données estimées par krigeage est similaire à celle des données observées ($\bar{Z}_{obs.} = 67,3$ cm, $\bar{Z}_{est.}^* = 67$ cm). L'**écart-type** des valeurs estimées (13,4 cm) est supérieur à celui des valeurs estimées par krigeage sur 100 sondages (12,6) mais reste nettement inférieur à celui des valeurs observées (23,5 cm). La dispersion autour de la moyenne des valeurs estimées est donc plus importante avec la prise en compte de la totalité des données. L'écart-type d'estimation $\sigma_{est.}$ est en moyenne égal à $20,4 \pm 3,9$ cm. Cette valeur est légèrement inférieure à celle de l'écart-type d'estimation par krigeage sur 100 sondages ($\sigma_{obs.100} = 21,8 \pm 0,7$ cm).

2°) Analyse des résidus

Les résidus sont donnés par l'écart entre valeurs réestimées et valeurs observées Z* - Z. L'analyse de ces résidus permet de rendre compte de la bonne réestimation des données. L'**écart moyen** entre les valeurs observées et les valeurs estimées (a) est de -0,3. Cet écart moyen est plus proche de 0 que celui obtenu par krigeage sur 100 données et nous pouvons donc considérer que les écarts entre valeurs estimées et valeurs observées sont négligeables. La réestimation des points de données ne présente pas de biais systématique. Le test de χ^2 amène à **accepter** l'hypothèse d'ajustement à une loi normale $\mathcal{N}_{(-0,3 ; 20,6)}$ pour la différence Z* -

Z au niveau de probabilité $\alpha = 5\%$ ($\chi^2_{\text{calc.}} = 6,7 < \chi^2_{\text{théo.}} = 12,6$ avec 6 degrés de liberté). La précision de la réestimation des points de mesure est donnée par l'écart-type de cet écart, il est de **20,6 cm**.

L'**écart quadratique moyen** (b) est de 423 cm². La racine carrée de cet écart donne une erreur moyenne d'environ **20,6 cm**.

L'**écart quadratique moyen réduit** (c), qui est de 0,99, rend compte de l'adéquation entre l'écart-type estimé ($\sigma_{\text{est.}}$) et l'erreur d'estimation ($Z^* - Z$). L'écart-type estimé est donc équivalent à l'erreur d'estimation.

II-2.5 Conclusion

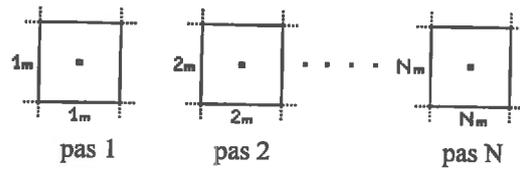
Les valeurs de ces différents indices montrent que les données ont été **correctement réestimées** lors de l'interpolation par krigeage. De plus, on constate (avec satisfaction) que la prise en compte de la **totalité** des sondages a **amélioré** la qualité de l'estimation de l'épaisseur du LA sur le secteur d'étude. La carte des isopaches du LA issue du krigeage sur 190 sondages sera donc utilisée pour la suite de ce travail.

II-3 Evaluation de la densité d'échantillonnage optimale

En connaissant le **variogramme** et en réalisant un échantillonnage selon une **grille régulière** (une maille carrée n'est pas indispensable, mais elle facilite les calculs), on peut calculer les écarts-types d'estimation du krigeage (ou les variances de krigeage) au centre de la maille pour **différents espacement de grille**. On trace ensuite les valeurs prises par l'écart-type d'estimation en fonction de ces différents espacements. La **densité d'échantillonnage optimale** est lue sur le graphe et correspond au maximum d'erreur tolérable spécifiée par l'utilisateur (Delhomme, 1976 ; Webster et Oliver, 1989).

III-3.1 Mise en oeuvre

Dans un premier temps, on établit une **grille d'observation fictive** de maille carrée (figure 5.15). Puis on fait **varier la distance** entre les points de la même manière en X et en Y afin de conserver une maille carrée. Ainsi, la géométrie des points sur cette grille ne varie pas, seule la distance augmente. On obtient donc N grilles successives contenant le même nombre de points dont l'espacement augmente progressivement (figure 5.15).



$$\forall N \in \mathbb{R}^{*+}$$

Figure 5.15 : Construction des grilles pour l'établissement de la densité d'échantillonnage optimale.

Notons que la valeur de la variable à interpoler n'a ici **aucune importance** puisque seul nous intéresse l'écart-type d'estimation qui dépend uniquement de la forme du variogramme et de la grille utilisée (Delhomme, 1976).

On réalise ensuite **pour chaque grille** un krigeage par point au **centre de la maille**. Le point à kriger devant avoir un minimum de 12 voisins (Voltz, communication orale). Par exemple, dans notre cas, nous avons considéré 25 points échantillonnés selon une maille carrée (figure 5.16).

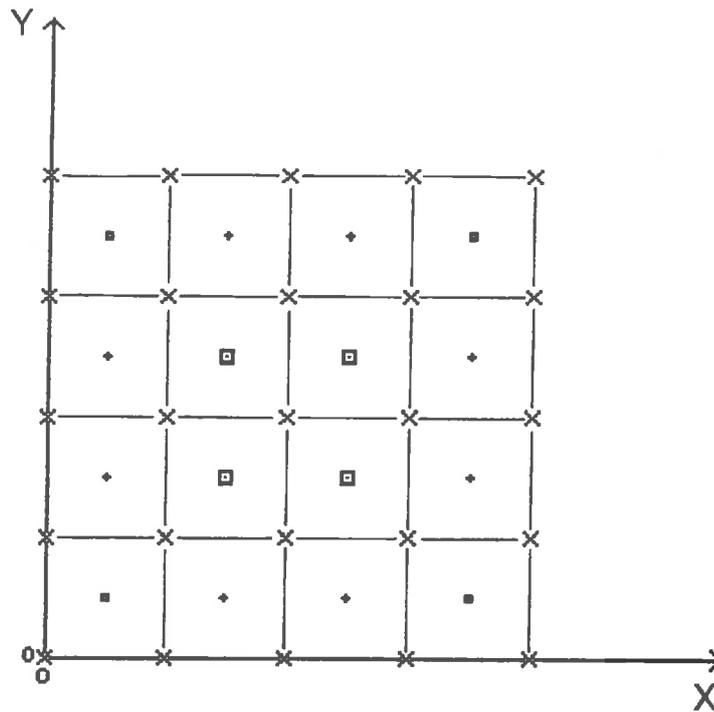
Les écarts-types d'estimation retenus pour l'évaluation de la densité d'échantillonnage optimal sont ceux dont les points correspondant possèdent le **maximum de voisins** pour une maille. Il est à noter, dans notre exemple, que pour un nombre égal de voisins, les écarts-types d'estimation des points krigés sont égaux.

III-3.2 Résultats

Les résultats sont donnés sous la forme d'un graphique (figure 5.17) qui illustre les **variations** de l'écart-type d'estimation en fonction de l'espacement de la grille de points échantillonnés. Ainsi, on s'aperçoit que cet écart-type augmente très rapidement jusqu'à des espacements de grille de **70 m**. Au delà, l'écart-type d'estimation augmente de façon moins rapide jusqu'à des espacements de grille de 300 m. Notons qu'au delà de 300 m d'espacement, il n'est plus possible de kriger, le nombre de voisins étant insuffisant.

Pour notre étude, nous voyons donc que si nous souhaitons une prédiction par krigeage avec un maximum de **20 cm** d'erreur tolérable, il nous faudra utiliser un espacement de grille de **55 m**. De même, pour un maximum d'erreur tolérable de **15 cm**, un espacement de grille de **25 m** sera nécessaire (figure 5.17).

Ainsi, nous comprenons que l'échantillonnage initial de 100 sondages (1 sondages par ha) se soit avéré **insuffisant** pour obtenir des écarts-types d'estimation inférieurs à 20 cm. L'interpolation par krigeage à partir de ces 100 sondages, régulièrement répartis selon une



- × Points échantillonnés (25)
- ▣ 4 points krigés (maximum de voisins)
- ◆ 8 points krigés (nombre de voisins intermédiaires)
- 4 points krigés (minimum de voisins)

Figure 5.16 : Configuration de l'échantillonnage utilisé pour le calcul de la densité d'échantillonnage optimale.

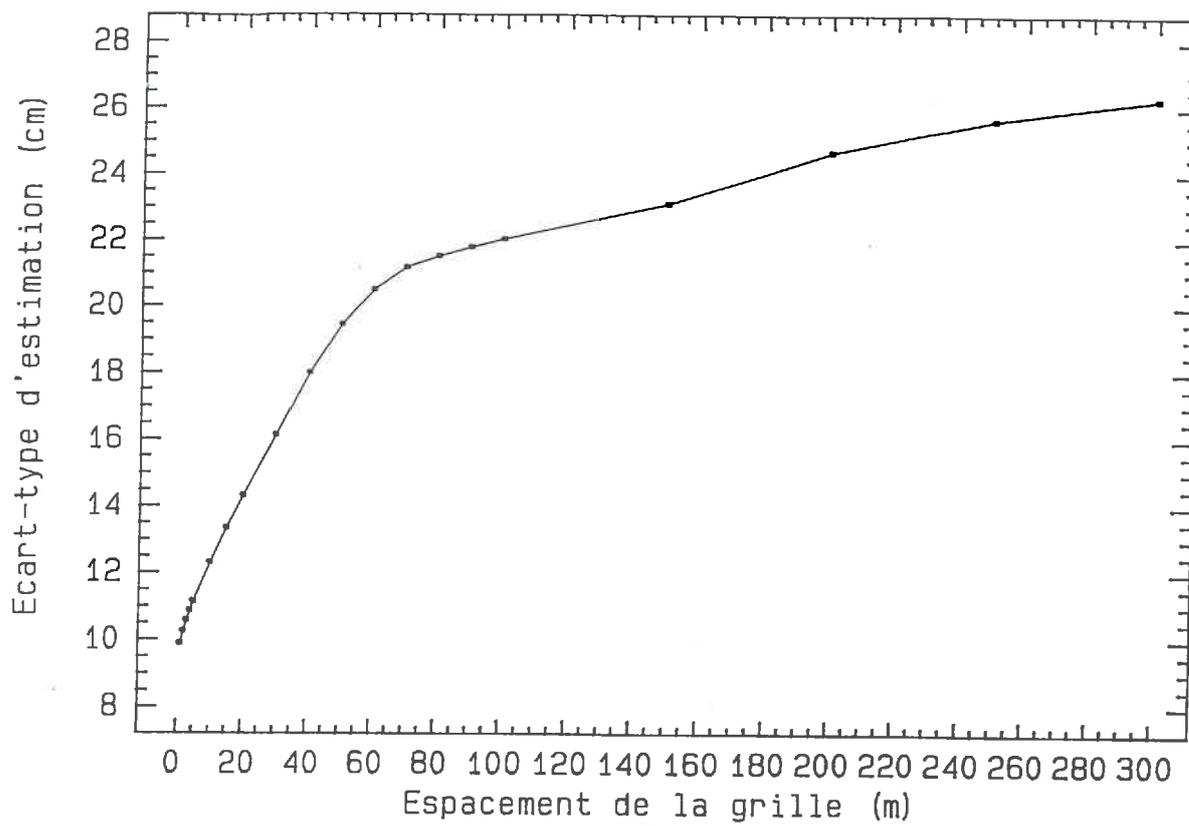


Figure 5.17 : Variations de l'écart-type d'estimation en fonction de l'espacement de la grille de points échantillonnés.

maille carrée de 106 m, donne des écarts-types d'estimation de l'ordre de 22 cm. Ceci justifie *a posteriori* la nécessité de l'échantillonnage complémentaire de 40 sondages et la prise en compte de l'ensemble du jeu de données pour l'interpolation par krigeage aboutissant à la carte des isopaches du LA définitive. Cependant, même avec la prise en compte de l'ensemble du jeu de données, on constate que la majorité des écarts-types d'estimation restent compris entre 20 et 22 cm (figure 5.14). Un échantillonnage plus resserré sera donc nécessaire si l'on veut diminuer ces écarts-types.

II-4 Discussion - Conclusion

L'utilisation du krigeage pour l'interpolation de la variable épaisseur sur l'ensemble du secteur d'étude a permis d'une façon générale d'**améliorer** sensiblement la corrélation entre les valeurs d'épaisseurs estimées par le modèle et celles observées sur un jeu de données indépendant. Le pourcentage de variance expliquée est plus important qu'avec la méthode d'interpolation non probabiliste. D'autre part, nous avons montré que les différents indices statistiques calculés étaient nettement **en faveur** du krigeage. Cependant, nous avons démontré que le pourcentage de variance expliquée par le krigeage restait de l'ordre de **22%** lors de la comparaison avec un jeu de 46 données indépendantes et que la précision de la réestimation des 190 points de mesure n'était que d'environ 21 cm. Plusieurs raisons peuvent être à l'origine de ces résultats.

L'**ajustement visuel** de la courbe théorique aux points expérimentaux du variogramme n'est peut être pas optimal. Cependant, de nombreux auteurs (Yost *et al.*, 1982 ; Trangmar *et al.*, 1985 ; Voltz, 1986 ; Walter, 1990) considèrent que le krigeage est peu sensible au modèle d'ajustement du variogramme.

L'existence de **données aberrantes** peut être envisagé. Il est nécessaire de les détecter car l'estimateur du variogramme est particulièrement sensible aux valeurs extrêmes des différences $Z(x) - Z(x+h)$ (Gascuel-Oudou, 1984 ; Voltz, 1986). Il existe dans notre jeu de données initial des valeurs de l'épaisseur du LA qui peuvent sembler aberrantes. Leur élimination pourrait être envisagée dans la mesure où elles seraient reconnues aberrantes sur le plan expérimental. Or, les sondages à la tarière effectués ont donné lieu chacun à une prise d'échantillon numéroté et classé, de telle sorte qu'une vérification ultérieure soit possible. Les échantillons suspects ont été contrôlés et il n'a pas été possible de déclarer aberrante et donc d'écarter la moindre valeur.

L'utilisation du krigeage pour l'interpolation de données ne permet pas une bonne **reconnaissance des pics ou des discontinuités** pouvant être présentes sur la zone à cartographier (Voltz, 1986). En comparant les cartes réalisées par krigeage et par la méthode TIN, nous avons en effet constaté le lissage des valeurs extrêmes et une représentation plus

"compacte" des courbes en isovaleurs. Cette constatation pourrait être un argument pouvant expliquer les résultats obtenus.

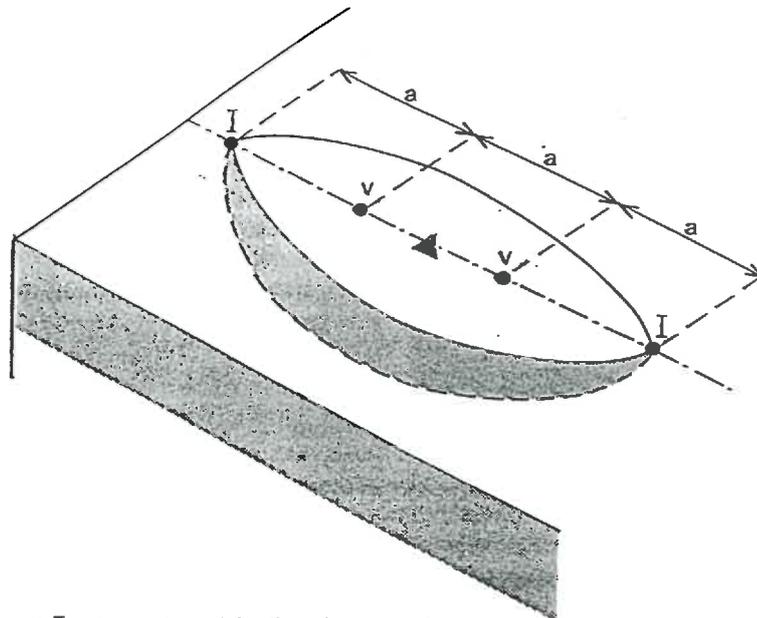
Cette remarque entraîne automatiquement une autre. Si l'existence de pics et de discontinuité est prouvée, nous sommes alors en droit d'émettre des doutes quant à la vérification de l'**hypothèse intrinsèque**. Cette remarque semble d'autant plus pertinente qu'il existe dans le jeu de données initial des sondages d'épaisseur nettement plus élevée que la moyenne (>110 cm) et des zones assez étendues (sud du secteur) où cette épaisseur est très faible (≤ 40 cm). Ainsi la cartographie de l'épaisseur du LA par krigeage risque-t-elle de comporter des biais.

Rappelons également ici l'importance des **écarts-types d'estimation**. Nous avons vu qu'en moyenne ces écarts-types étaient de l'ordre de $20,4 \pm 3,9$ cm c'est-à-dire inférieurs à l'écart-type moyen du jeu de données initial (23,5 cm).

Enfin, on pourrait penser que l'**effet de pépité** (85 cm^2) que nous avons détecté lors de l'ajustement visuel d'une courbe aux points expérimentaux du variogramme contribue à atténuer les résultats des interpolations successives et à surestimer les écarts-types d'estimation. Cependant, cet effet de pépité n'explique qu'environ 15% de la variance totale de l'échantillon (550 cm^2) et il n'est lui même expliqué qu'à 30% par les erreurs de mesures (25 cm^2). Nous avons alors montré que la **densité d'échantillonnage optimale** était trop espacée et qu'il serait nécessaire d'effectuer un échantillonnage selon une maille plus resserrée pour diminuer les écarts-types d'estimation du krigeage et améliorer ainsi l'interpolation.

III. UTILISATION DE METHODES ELECTRIQUES

Les méthodes employées jusqu'alors pour déterminer l'épaisseur du limon argileux ont montré qu'une **forte proportion de la variabilité spatiale** était inférieure au pas d'échantillonnage initial de 106 m. D'autre part, l'étude de la densité optimale d'échantillonnage a montré que pour un maximum d'erreur acceptable de 15 cm (seuil que nous nous sommes fixés arbitrairement), un espacement de grille de 25 m serait nécessaire. Plutôt que de procéder à de nouveaux sondages à la tarière pour atteindre cette densité d'échantillonnage optimale, nous avons choisi de mettre en oeuvre des **méthodes géophysiques** (et en particulier une prospection électrique) pour comparer les épaisseurs du LA mesurées par sondages à la tarière et par sondages électriques. Ainsi, si les résultats obtenus par ces deux méthodes ne s'avèrent pas différents, une **automatisation** des méthodes électriques pourra être envisagée ultérieurement pour atteindre la densité optimale d'échantillonnage.



- 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 5.18 : Configuration du dispositif Wenner.

(d'après Lamothe, 1993)

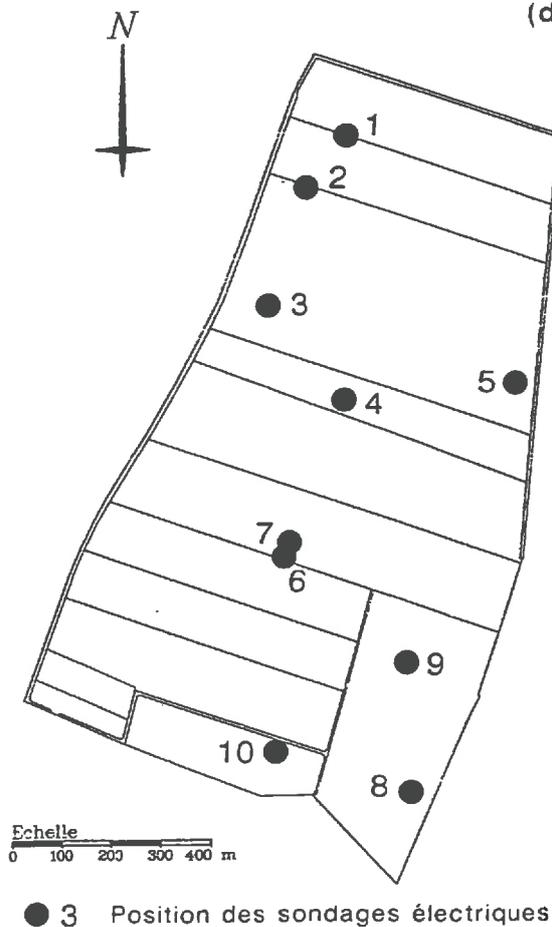


Figure 5.19 : Positionnement des sondages électriques sur le secteur d'étude.

Les **méthodes électriques** sont en effet bien adaptées à notre secteur d'étude. L'homogénéité de la couverture limono-argileuse, la présence de roches calcaires sous-jacentes à cette couverture, devrait faire du secteur d'étude un terrain d'expérimentation à **contraste électrique élevé**. Par ailleurs, toute la surface du secteur d'étude est cultivée et elle est facilement accessible pour peu que les dates de prospection soient bien choisies. Le dénivelé total sur la zone d'étude ne dépasse pas 6 m. Ces méthodes permettent une investigation rapide, non liée directement à la profondeur à atteindre en opérant à partir de la surface du sol. La mise en oeuvre du dispositif de mesure nécessite l'emploi d'un matériel léger (résistivimètre, électrodes, câbles). Ces méthodes sont **non destructives** et peuvent être aisément **répétées**. De nombreux auteurs en Science du Sol ont développé ces méthodes pour des travaux de cartographie. Citons notamment Cabidoche et Servant (1980), Bottraud (1983), Bottraud *et al.* (1984), Andrieux *et al.* (1986), Dabas *et al.* (1989), Hesse et Rekeawicz (1990), Lamotte (1993). D'autre part, le milieu étudié se prête particulièrement bien à leur utilisation.

III-1 Mise en oeuvre du dispositif

La mise en oeuvre de la méthode électrique nécessite de procéder à une reconnaissance préliminaire par **sondages électriques**. Au premier stade de l'investigation, une série de sondages électriques (quadripôle Wenner) a été implantée sur l'ensemble du secteur d'étude, en particulier aux emplacements où les cartes d'erreurs issues du krigeage prévoyaient les plus fortes variations de l'épaisseur du LA. Douze sondages électriques ont été effectués (dont deux doublés pour vérification) afin de définir les **unités électrostratigraphiques** du secteur d'étude. Le résistivimètre utilisé pour ces opérations est un RMCA4 (SEPTA/CNRS). Les données de ces sondages électriques ont été interprétées directement sur le terrain avec un modèle électrique tabulaire en terme de résistivité et épaisseur de terrain (logiciel développé par le CRG Garchy utilisant la méthode des moindres carrés pour ajuster une courbe théorique aux points expérimentaux). L'épaisseur du limon argileux ainsi calculée a été comparée aux **sondages à la tarière réalisés aux mêmes points** afin de caler les données électriques par rapport aux organisations pédologiques.

Les sondages électriques ont ainsi été réalisés avec un dispositif Wenner (figure 5.18) et sont positionnés sur le secteur selon la figure 5.19. Ce dispositif comprend un résistivimètre, 2 électrodes d'injection du courant (intensité I) et 2 électrodes de mesure de la différence de potentiel (ΔV). Les électrodes sont disposées en ligne selon la configuration I-V-V-I et à une distance égale (désignée habituellement a) et sont reliées au résistivimètre sur lequel les résistances ($R = V/I$) lues sont enregistrées manuellement. La résistivité ρ est calculée comme suit : $\rho = 2 R a$ où a est égal à l'écartement entre les électrodes. La géométrie et la nature des couches prise en compte étant inconnues, les résistivités mesurées sont des résistivités dites "**apparentes**". Par convention, la mesure de résistivité apparente est attribuée au point central du dispositif. La géométrie précise de ce volume est variable en fonction des propriétés du sol. Dans notre étude, avec les matériaux mis en évidence, la profondeur d'investigation est comprise entre a et $3a/4$ (Dabas, communication orale). Ce dispositif peut être utilisé aussi bien en sondage électrique qu'en trainé électrique. Le sondage électrique s'apparente à une coupe verticale de résistivité. Le dispositif est centré à l'aplomb d'un point et la valeur de a est graduellement augmentée de $a = 0,1$ m à $a = 16$ m. On atteint ainsi des profondeurs de plus en plus élevées. Le passage des

résistivités apparentes aux résistivités vraies est réalisé par "inversion" des sondages électriques. Ceci revient à déterminer une succession verticale de couches uniformes horizontales considérées comme tabulaires et dont la résistivité et l'épaisseur sont estimées puis ajustées par le modèle. Dans notre étude, cette "inversion" est effectuée à l'aide d'un logiciel développé par le CRG de Garchy.

Comme on peut le constater, l'emploi de cette méthode dans notre travail se justifie par le fait que les volumes de terrain concernés par la mesure sont nettement supérieurs à ceux que l'on obtient lors des sondages à la tarière. Ainsi, la comparaison des mesures électriques et mécaniques pourra éventuellement nous renseigner sur l'échelle spatiale des variations locales de l'épaisseur du LA. Ceci sera en effet possible, dans la mesure où une différence significative d'épaisseur du LA sera mise en évidence entre les deux méthodes de mesure au même point.

III-2 Reconnaissance de la limite limon-argileux / calcaire de Beauce

III-2.1 Inversion des sondages électriques

C'est lors de l'inversion des sondages électriques que l'on calcule l'épaisseur et la résistivité de chaque couche considérée à partir des résistivités apparentes mesurées. Ces dernières varient entre 40 Ωm ($a = 10$ cm) et 400 Ωm pour les plus grands a ($a = 15$ m). La plupart des sondages ont pu être interprétés par une structure bi-couche dont la couche superficielle est la plus conductrice. L'interprétation des sondages 3 et 4 a conduit à la création d'une couche résistante en surface peu épaisse (10 cm), vraisemblablement liée à une différence de teneur en eau lors de la réalisation du sondage (dessèchement superficiel). Le sondage 10 est plus complexe et a dû être interprété par une succession de 4 couches. Le tableau 5.7 présente les valeurs des épaisseurs et des résistivités de chacune des couches :

Sondages	1	1b	2	2b	3	4	5	6	7	8	9	10
ρ_1 (Ωm)	-	-	-	-	50	80	-	-	-	-	-	-
e_1 (m)	-	-	-	-	0,1	0,1	-	-	-	-	-	-
ρ_2 (Ωm)	35	40	35	40	35	30	45	30	30	45	40	35
e_2 (m)	0,5	0,5	0,9	1,1	0,9	0,5	0,9	0,4	1,4	0,9	0,7	0,2
ρ_3 (Ωm)	190	160	300	350	140	195	180	105	130	400	380	160
e_3 (m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6
ρ_4 (Ωm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33
e_4 (m)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7
ρ_5 (Ωm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	570

Tableau 5.7 : Résultats de l'inversion des sondages électriques.

e_n = épaisseur de la couche considérée.

ρ_n = résistivité de la couche considérée.

Les résultats montrent que la couche ρ_2 - e_2 est la mieux définie et la plus conductrice. La **résistivité moyenne** est de **36,7 Ωm** avec un écart-type de **5,1 Ωm** ce qui indique une grande homogénéité tant du point de vue de sa constitution que de sa teneur en eau au moment des mesures. L'épaisseur de cette couche varie entre 0,4 et 1,4 m. La couche résistante sous-jacente possède une résistivité qui fluctue dans un rapport important (de 1 à 5) indiquant une variabilité horizontale importante.

III-2.2 Comparaison avec les sondages à la tarière

Le tableau 5.8 présente les **statistiques** sur les valeurs des épaisseurs du LA obtenues par inversion des sondages électriques et celles mesurées par sondages à la tarière au même point.

	E1	E2	(E1- E2)	(E1- E2) ²
Minimum	20	35	-80	25
25 ^{ème} %tile	50	52,5	-15	62,5
Médiane	80	70	0	225
75 ^{ème} %tile	90	92,5	20	1700
Maximum	140	120	65	6400
Moyenne	74,2	72,9	1,3^a	1273^b
Ecart-type	33,7	26,1	37,2	2062

E1 : épaisseur du LA calculée d'après les sondages électriques (en cm)

E2 : épaisseur du LA mesurée à la tarière (en cm)

Tableau 5.8 : Comparaison par grandeurs statistiques de l'épaisseur du LA calculée par inversion des sondages électriques et mesurée à la tarière (12 sondages).

L'**écart moyen** entre épaisseur mesurée à la tarière et épaisseur mesurée par sondage électrique [^a = E(E1- E2) = 1,3] montre un biais systématique. Ce biais étant positif, nous pouvons dire qu'en moyenne, la mesure par sondage électrique **surestime** légèrement les épaisseurs du LA.

Nous avons reporté sur un même graphique les valeurs d'épaisseur du LA calculées selon les deux méthodes (figure 5.20). L'**écart quadratique moyen** à la première bissectrice :

$$[{}^b = EQM = E(E1- E2)^2]$$

est de 1273 cm² avec $n = 12$, la racine carrée de cet EQM est de 36 cm ($\sqrt{1273}$). Cette erreur est élevée et nettement supérieure aux erreurs de mesure à la tarière (± 5 cm). Mais d'autre

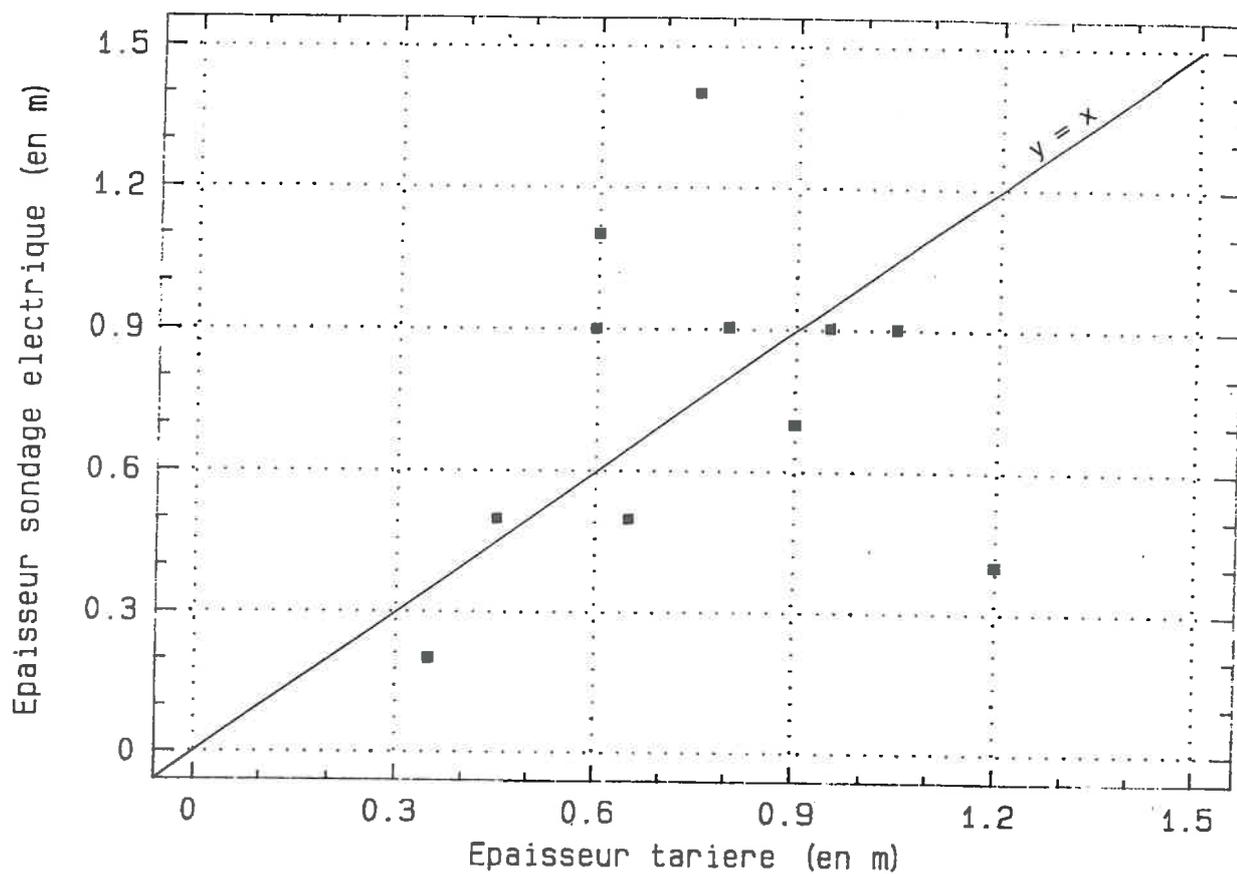


Figure 5.20 : Ecart des valeurs d'épaisseurs mesurées et calculées à la 1^{ère} bissectrice.

part, on constate que les sondages 6 et 7 s'écartent très sensiblement de cette 1^{ère} bissectrice (figure 5.20). Nous avons donc recalculé l'écart quadratique moyen en ne tenant pas compte de ces deux valeurs. Nous obtenons alors un EQM de 465 cm² avec $n = 10$ et l'**erreur moyenne** est de **21,6 cm**. Les erreurs commises lors des mesures de résistivité et lors de l'inversion des sondages électriques sont loin d'être négligeables. Ces erreurs sont difficilement quantifiables. Notons toutefois que les sondages 6 et 7 ont été réalisés à proximité l'un de l'autre et dans une zone **très perturbée** et où les formations cryoturbées sont très épaisses. Cette zone correspond en effet à une ancienne limite départementale autour de laquelle les remaniements du parcellaire ont provoqué des accumulations de matériaux.

Nous venons de montrer que l'écart quadratique moyen à la 1^{ère} bissectrice est non négligeable, mais qu'il est **pondéré** par les erreurs commises lors des mesures de résistivité et de l'inversion des sondages électriques. Ainsi, la couche (ρ_2 - e_2) dont la résistivité est d'environ 35 Ωm peut être associée aux **matériaux limono-argileux** définis dans la deuxième partie. Sa remarquable **uniformité électrique** est en accord avec l'**homogénéité de constitution** mise en évidence lors de l'étude des sols du secteur. L'interprétation de la couche (ρ_2 - e_2) comme correspondant à ces matériaux est donc confirmée par les sondages mécaniques à la tarière.

On en déduit alors que la résistivité ρ_3 , dont l'ordre de grandeur varie entre 105 et 400 Ωm , correspond à celle du **calcaire de Beauce** plus ou moins cryoturbé. Les sondages mécaniques à la tarière réalisés conjointement aux sondages électriques le confirment dans la mesure où ces matériaux cryoturbés sont directement sous-jacents aux matériaux limono-argileux. Seul le sondage à la tarière 3 n'a pas atteint ces matériaux calcaires cryoturbés. Ce sondage s'est arrêté sur des matériaux sablo-argileux et on remarque que ρ_3 est de 140 Ωm . On remarque également que les sondages 6 et 7 ont une résistivité ρ_3 encore plus faible (respectivement 105 et 130 Ωm) et présentent pourtant la succession limono-argileux sur matériaux calcaires cryoturbés. Ceci confirme le caractère particulier de ces deux sondages et semble justifier leur mise à l'écart. En revanche, pour tous les autres sondages (autres que 3, 6 et 7), ρ_3 est supérieure ou égale à 160 Ωm et peut atteindre 570 Ωm , particulièrement dans la partie sud du secteur. Les sondages ont montré par ailleurs que le calcaire de Beauce était très peu fracturé (plus compact) dans cette zone, ce qui pourrait expliquer ces résistivités élevées.

D'une manière générale, de **faibles différences** (20 cm en moyenne) sont rencontrées entre les valeurs obtenues par sondages électriques et celles mesurées par sondages à la tarière. Seuls les sondages 2, 2b, 6 et 7 présentent des écarts relativement importants avec les observations à la tarière. Nous avons déjà expliqué les conditions concernant la mise à l'écart des sondages 6 et 7. Les autres différences peuvent avoir plusieurs origines :

1°) le **modèle** que nous utilisons pour interpréter les sondages électriques (couches tabulaires, planes et homogènes) ne serait pas applicable à la réalité.

2°) les mesures effectuées par sondages électriques sont des mesures **intégratrices**, c'est-à-dire qu'elles intègrent un certain volume de terrain alors que les mesures par sondages mécaniques à la tarière sont ponctuelles. Il en résulterait un **lissage** des variations ponctuelles observées à la tarière.

3°) la mise en évidence, lors des sondages à la tarière, des **interfaces** entre les différentes couches (limon-argileux / calcaire de Beauce ou limon-argileux / matériaux argileux à sables grossiers) ne serait pas aussi facilement décelable que nous l'avions supposé. Rappelons ici que l'erreur attachée aux mesures effectuées à la tarière a été considérée comme étant égale à ± 5 cm.

Le premier point est important car si les matériaux limono-argileux possèdent une résistivité moyenne de $36,7 \Omega\text{m}$ avec un faible écart-type de $5,1 \Omega\text{m}$ traduisant l'**homogénéité** électrique du LA, cela ne suffit pas car il faut également que les couches considérées soient **planes et tabulaires** pour que le modèle utilisé reste valable. Or, la présence de **poches de cryoturbation** intercalées entre le LA et le calcaire rendent l'interface entre ces deux formations **ondulée** ce qui joue en défaveur de l'hypothèse des couches tabulaires et planes. Cependant, cette hypothèse peut être localement vérifiée notamment pour les a maximum ($a = 10$ à 15 m) (Dabas, 1992). Le second point est important car c'est précisément pour cela que des méthodes électriques ont été employées. Elles nous permettent de nous libérer d'**accidents locaux** que seul un réseau de quatre ou cinq sondages à la tarière espacés de 1 m permettrait d'apprécier (Dabas, 1992). Quant au troisième point, nous avons déjà mentionné les difficultés pour mettre en évidence, d'un strict point de vue morphologique, la **limite** entre les formations limono-argileuses et les formations argileuses à sables grossiers.

III-3 Variations locales de l'épaisseur du LA

L'objectif principal de ce paragraphe est de montrer que l'utilisation de méthodes électriques permet de remplacer avantageusement les sondages mécaniques à la tarière pour réaliser un échantillonnage plus resserré des valeurs de l'épaisseur du LA. Pour cela, nous devons nous assurer par des méthodes statistiques, qu'il n'existe pas de différence entre épaisseur du LA mesurée à la tarière et épaisseur du LA mesurée **par sondage électrique**. Nous avons, dans un premier temps, calé ces méthodes sur notre secteur en comparant épaisseur mesurée par sondage électrique et celle mesurée par sondage à la tarière sur quelques points. Cette première étude nous a permis de définir les différentes unités électrostratigraphiques en présence.

Puis, nous allons sur l'ensemble de l'échantillonnage complémentaire **analyser** l'ensemble des résistivités et comparer les épaisseurs mesurées par des sondages électriques **orientés perpendiculairement** et réalisés au même point. Ainsi, nous pensons pouvoir mettre

en évidence, si elle existe, une **anisotropie** de la variation d'épaisseur du LA aux courtes distances d'échantillonnage.

Enfin, la relation mise en évidence précédemment entre les épaisseurs mesurées à la tarière et celles calculées par inversion des sondages électriques sera discutée sur l'ensemble des données pour éventuellement, envisager une **généralisation** des méthodes géophysiques à l'ensemble du secteur.

III-3.1 Mise en place du dispositif

Nous avons défini **40 points** sur lesquels ont été effectués des sondages à la tarière pour mesurer l'épaisseur du limon argileux. Sur **30** de ces 40 points, nous avons réalisé un double sondage électrique croisé (méthode Wenner) orientés Nord-Sud et Est-Ouest. Au total, 60 sondages électriques ont été effectués. De façon à minimiser d'éventuelles variations des conditions de mesure (t° , teneur en eau superficielle, ...), l'**ordre de réalisation** des sondages électriques a été tiré au hasard (tableau II.1b en annexe 2). Toutes les valeurs de résistivités détaillées sont portées en annexe 3. Ces valeurs conduisent aux valeurs d'épaisseur qui sont présentées dans le tableau 5.9. Ces données ont été calculées en utilisant un modèle tabulaire à deux ou trois couches.

III-3.2 Résultats

Les valeurs de résistivité obtenues par sondages électriques croisés sont présentées dans le tableau II.2a, b et c en annexe 2. Ce tableau donne les valeurs des **résistances** lues sur le résistivimètre lors de la prospection sur le terrain et les **résistivités apparentes** calculées qui leur correspondent. Le modèle tabulaire employé précédemment pour l'inversion des sondages électriques a été utilisé pour calculer les **résistivités** et les **épaisseurs** des différentes couches (tableau II.3 en annexe 2). Par la suite, nous nous sommes intéressés aux données concernant l'épaisseur de la couche correspondant au volume limono-argileux (LA). Ces résultats sont repris dans le tableau 5.9 qui donne pour chaque sondage l'épaisseur du LA obtenue lors des **sondages à la tarière** (1), les épaisseurs du LA obtenues lors des **sondages électriques** (épaisseurs déterminées avec les sondages orientés Nord-Sud et Est-Ouest) et l'épaisseur moyenne (2). Les résultats des **douze sondages initiaux** ont été intégrés au tableau 5.9 pour compléter le jeu de données dont nous disposons. Pour chaque épaisseur déterminée, une erreur est estimée. Elle est de ± 5 cm pour les sondages à la tarière et elle est calculée par le modèle tabulaire pour les sondages électriques. Cette dernière erreur correspond d'ailleurs plus à une erreur d'ajustement de la courbe aux points expérimentaux qu'à une stricte erreur de mesure. Enfin, la différence entre les deux méthodes de mesure de l'épaisseur est mentionnée ainsi que l'erreur relative. Une première observation des données

NUMERO SONDAGE	EPAISSEUR TARIERE (1) (cm)	ERREUR TARIERE (cm)	EPAISSEUR NORD - SUD (cm)	EPAISSEUR EST - OUEST (cm)	EPAISSEUR MOYENNE (2) (cm)	ERREUR MOYENNE (%)	ERREUR ABSOLUE (cm)	DIFFERENCE (1)-(2) (cm)	ERREUR RELATIVE (%)
111	105	5	86	100	93.0	3.75	3.5	12.0	11.43
112	85	5	80	85	82.5	3.95	2.8	2.5	2.94
113	95	5	83	85	84.0	2.90	2.4	11.0	11.58
114	80	5	76	74	75.0	2.15	1.6	5.0	6.25
115	105	5	90	90	90.0	2.20	2.0	15.0	14.29
116	50	5	62	58	60.0	2.00	1.2	-10.0	20.00
117	35	5	36	35	35.5	1.90	0.7	-0.5	1.43
118	60	5	61	62	61.5	2.00	1.2	-1.5	2.50
119	45	5	41	42	41.5	1.95	0.8	3.5	7.78
120	95	5	130	137	133.5	2.45	3.3	-38.5	40.53
121	40	5	30	30	30.0	3.40	1.0	10.0	25.00
122	35	5	30	33	31.5	3.10	1.0	3.5	10.00
123	45	5	34	40	37.0	6.05	2.2	8.0	17.78
124	30	5	25	20	22.5	2.40	0.5	7.5	25.00
125	40	5	37	37	37.0	3.30	1.2	3.0	7.50
126	40	5	25	25	25.0	3.05	0.8	15.0	37.50
127	35	5	33	35	34.0	1.95	0.7	1.0	2.86
128	35	5	27	36	31.5	3.70	1.2	3.5	10.00
129	90	5	68	100	84.0	2.30	1.9	6.0	6.67
130	30	5	15	17	16.0	2.25	0.4	14.0	48.67
131	60	5	80	57	68.5	2.25	1.5	-8.5	14.17
132	60	5	56	70	63.0	2.65	1.7	-3.0	5.00
133	65	5	75	72	73.5	2.70	2.0	-8.5	13.08
134	80	5	110	100	105.0	2.10	2.2	-25.0	31.25
135	70	5	90	80	85.0	3.55	3.0	-15.0	21.43
136	70	5	62	60	61.0	2.35	1.4	9.0	12.86
137	70	5	80	88	84.0	2.45	2.1	-14.0	20.00
138	65	5	85	103	94.0	3.00	2.8	-29.0	44.62
139	105	5	126	118	122.0	3.55	4.3	-17.0	16.19
140	35	5	56	61	58.5	3.65	2.1	-23.5	67.14
1	45	5	-	-	50.0	7.00	3.5	-5.0	11.11
1b	45	5	-	-	50.0	4.40	2.2	-5.0	11.11
2	60	5	-	-	90.0	4.50	4.1	-30.0	50.00
2b	60	5	-	-	110.0	4.70	5.2	-50.0	83.33
3	95	5	-	-	100.0	6.00	6.0	-5.0	5.26
4	65	5	-	-	60.0	3.00	1.8	5.0	7.69
5	105	5	-	-	90.0	5.00	4.5	15.0	14.29
6	120	5	-	-	40.0	3.50	1.4	80.0	66.67
7	75	5	-	-	140.0	7.00	9.8	-65.0	86.67
8	80	5	-	-	90.0	9.00	8.1	-10.0	12.50
9	90	5	-	-	70.0	7.00	4.9	20.0	22.22
10	35	5	-	-	20.0	3.00	0.6	15.0	42.86

Tableau 5.9 : Epaisseur du LA obtenue par sondage à la tarière et par sondage électrique

montre que les différences les plus importantes entre les deux méthodes sont rencontrées sur les premiers sondages électriques de **calage**.

Les différences observées peuvent être dues à des erreurs de mesure ou à de mauvaises manipulations de l'appareil. On peut aussi envisager un lissage des valeurs d'épaisseur calculées en prenant la moyenne des épaisseurs obtenues par les sondages électriques croisés. Cependant, il est important de préciser que les deux jeux de données n'ont pas été acquis à la même période. Les **conditions du milieu** (teneur en eau, température) au moment des mesures étaient sensiblement différentes. Ainsi, les douze premiers sondages ont été réalisés en période automnale (octobre) c'est-à-dire à une période où les sols sont **différemment humectés**. Quant au deuxième jeu de données, il a été acquis en période hivernale (janvier-février) c'est-à-dire à une période où l'état hydrique du limon-argileux était beaucoup **plus homogène**. Le tableau II.3 (annexe 2) indique, pour chaque sondage électrique réalisé, le nombre de couches. On constate que pour environ la **moitié** des sondages électriques (29 sondages sur 60), la couche superficielle correspondant au LA est divisée en deux couches voire trois couches avec généralement une première couche de surface de résistivité élevée comprise entre 40 et 80 Ωm . Ce phénomène a déjà été observé avec le premier jeu de douze sondages (sondages 3 et 4) et nous avons déjà évoqué un dessèchement superficiel. Ceci confirme l'influence de l'état hydrique du sol (et donc de la période de prospection) sur les mesures de résistivité. Hesse (1966) et Lamotte (1993) parlent de "**dérive de la résistivité apparente du sol**" pour les volumes proches de la surface, dérive pouvant intervenir à différents moments au cours de la journée. Elle est la conséquence de variations diurnes de la température, d'un événement pluvieux ou d'une dessiccation locale. Ainsi, les contrastes de résistivités qui apparaissent au niveau des couches superficielles ne correspondent pas à des matériaux différents mais plutôt à des **différences de teneur en eau** au sein même de ces matériaux.

III-3.3 Analyse des résistivités

L'**analyse des résistivités** obtenues par inversion du nouveau jeu de sondages électriques confirme l'**homogénéité** du point de vue électrique de la couche superficielle de limon-argileux. Le tableau II.4 (annexe 2) donne pour chaque sondage électrique la valeur de la résistivité de la couche superficielle. Pour les sondages dont la couche superficielle a été modélisée par un modèle bicouche ou tricouche (notés *), nous avons considéré une couche unique dont l'épaisseur est égale à la somme des épaisseurs des différentes couches et la résistivité à la moyenne des résistivités des différentes couches. Pour les sondages notés ** (5 au total), la valeur de la résistivité de la première couche a été négligée (variabilité trop importante due très certainement à une augmentation sensible de la teneur en eau de surface) pour ne prendre en compte que la valeur de résistivité de la couche immédiatement sous-jacente. Ainsi, le tableau 5.10, qui donne la répartition de ces valeurs par classe de 10 Ωm , montre que 92% des valeurs de résistivités de surface sont comprises entre 20 et 40 Ωm et

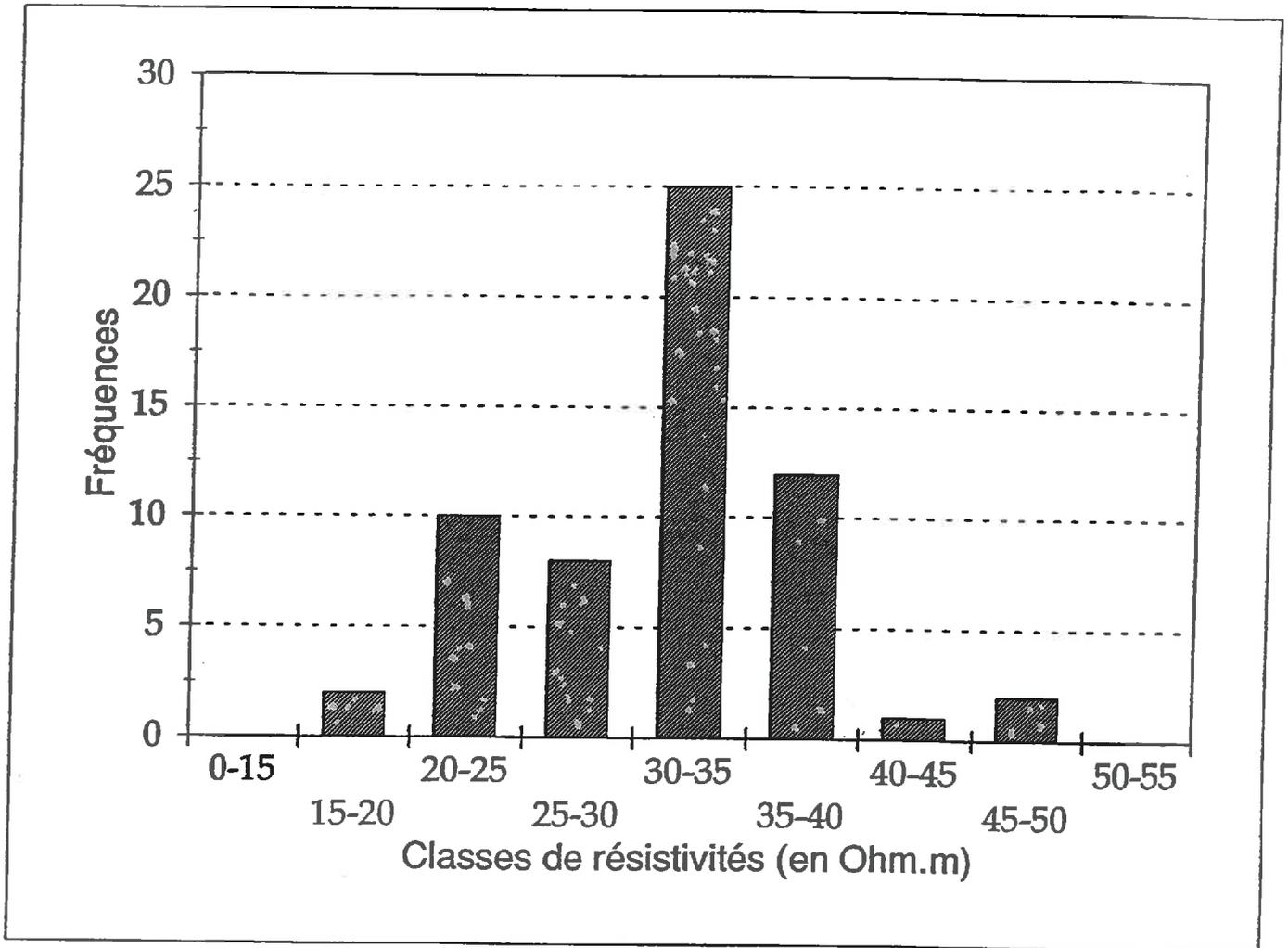


Figure 5.21 : Histogramme de fréquence des résistivités vraies de la couche superficielle.

62% entre 30 et 40 Ωm . Si l'on considère des classes plus étroites de 5 Ωm , on constate que 42% de ces valeurs se situent entre 30 et 35 Ωm . L'**histogramme de fréquence** (figure 5.21) et le tableau 5.10 ci-dessous récapitulent les résultats précédents :

Classes(Ωm)	Fréquences	Pourcentage	Classes(Ωm)	Fréquences	Pourcentage
00-10	0	0%	15-20	2	3%
10-20	2	3%	20-25	10	17%
20-30	18	30%	25-30	8	13%
30-40	37	62%	30-35	25	42%
40-50	3	5%	35-40	12	20%
50-60	0	0%	40-45	1	2%
<i>Total</i>	<i>60</i>	<i>100%</i>	45-50	2	3%

Tableau 5.10 : Répartition des résistivités de la couche superficielle.

Les résistivités des couches sous-jacentes qui correspondent au calcaire de Beauce cryoturbé dans sa partie superficielle varient de 150 Ωm pour des formations calcaires cryoturbées à 1000 Ωm pour des calcaires compacts. L'ensemble de ces résultats confirment ceux obtenus lors de la définition des unités électro-stratigraphiques (cf. § II-3.2), à savoir une couche superficielle de **limon-argileux très homogène** du point de vue électrique et des matériaux sous-jacents, constitués par des **calcaires cryoturbés** dans leur partie supérieure, **très hétérogènes** du point de vue électrique.

III-3.4 Interprétation des sondages croisés

Les **sondages électriques croisés** (directions Nord-Sud et Est-Ouest) ont été comparés pour chacun des trente sondages électriques réalisés. Cette comparaison nous permettra de discuter la **variabilité** d'épaisseur du limon argileux aux faibles pas d'échantillonnage et l'éventuelle anisotropie que nous n'aurions pas détectée lors de l'analyse variographique ainsi que des erreurs de mesures et d'inversion. Le tableau 5.9 présente, pour chaque sondage électrique orienté, les valeurs de l'épaisseur de la couche superficielle (colonnes 4 et 5). Nous avons alors comparé ces deux colonnes au moyen d'une **régression linéaire** simple et d'un **coefficient de corrélation** (figure 5.22a). La variable indépendante a été arbitrairement choisie comme étant l'épaisseur calculée à partir du sondage orienté Nord-Sud (épaisseur NS), l'autre variable, l'épaisseur calculée à partir du sondage électrique orienté Est-Ouest (épaisseur EW), étant considérée comme dépendante. Les résultats de la régression et de la corrélation sont présentés de façon détaillée ci-dessous.

L'analyse de la variance permet de tester si la variabilité prise en compte par le modèle de régression est significative. Le test F de Fisher ($F = 260,93$) qui teste si le coefficient de régression b est nul (H_0) (donc que le

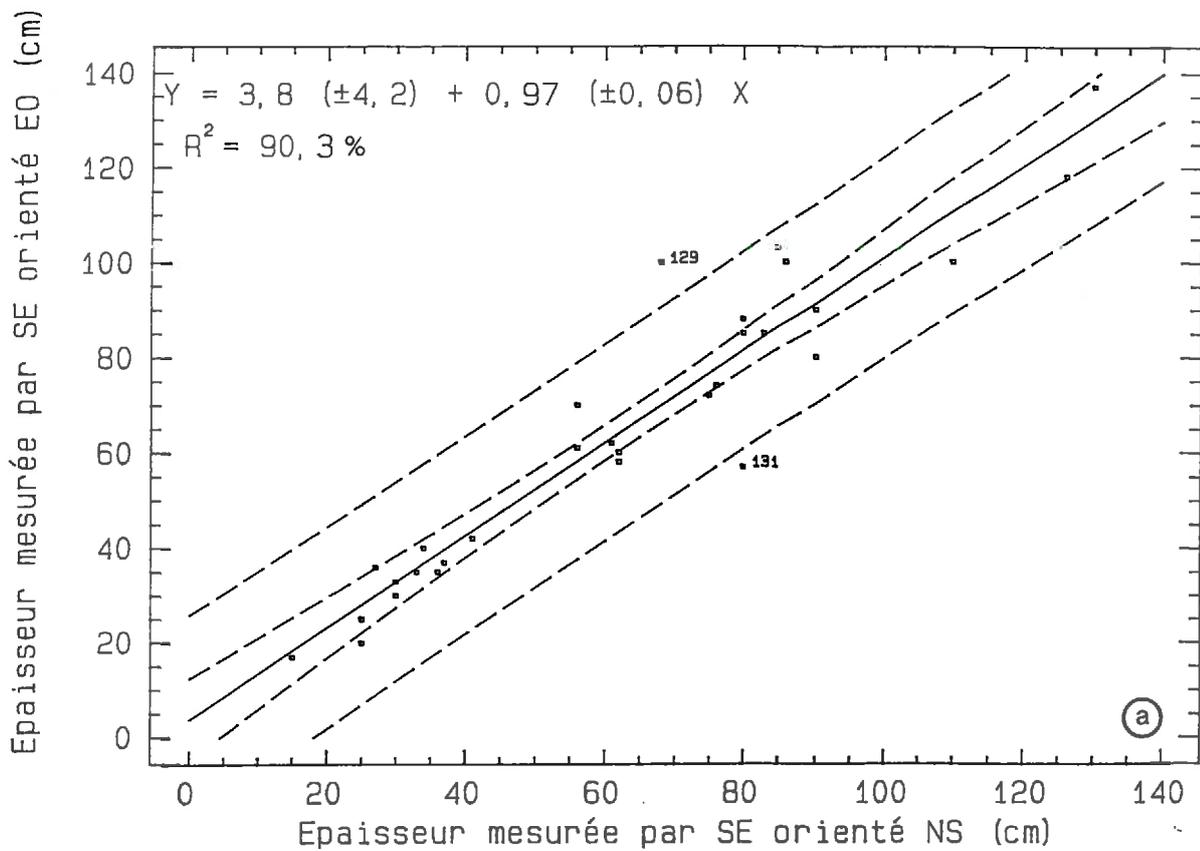


Figure 5.22a : Régression linéaire entre épaisseurs du LA mesurées par sondages électriques croisés orientés Est-Ouest et Nord-Sud.

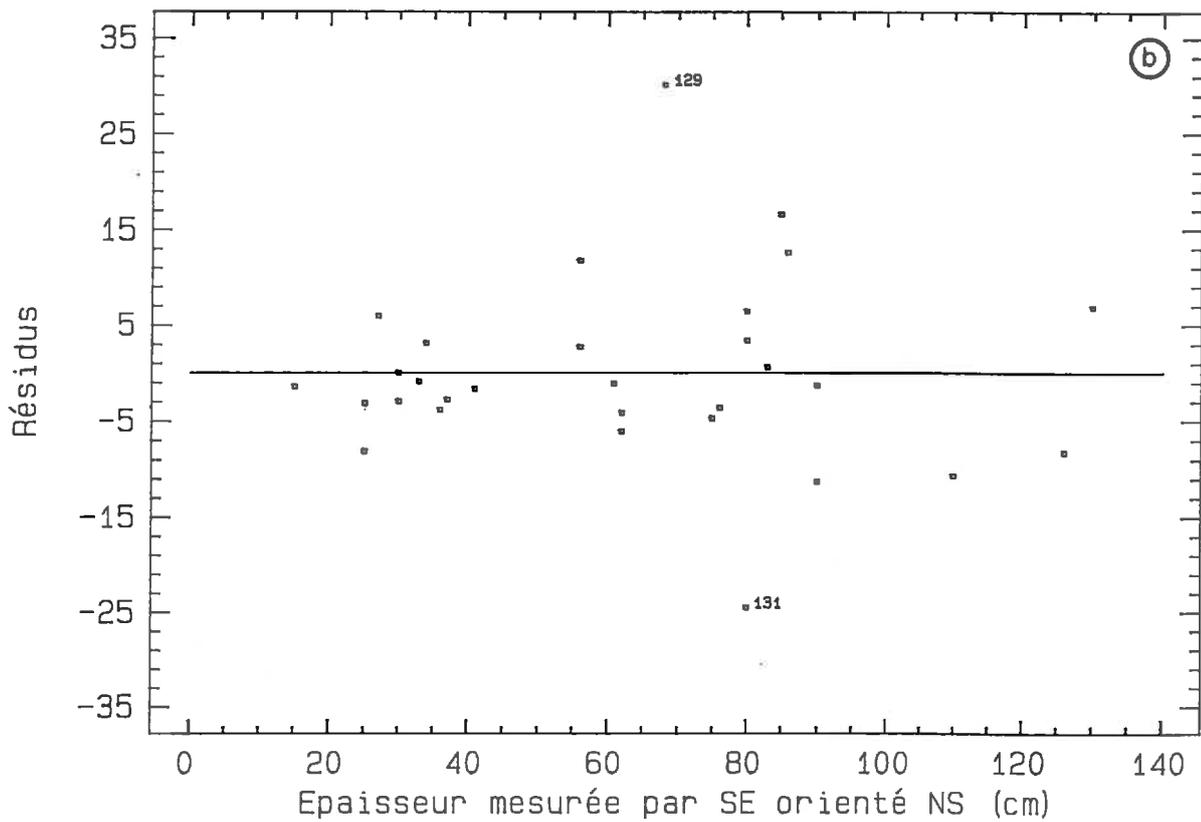


Figure 5.22b : Résidus de la régression.

modèle de régression n'est pas significatif) permet de rejeter H_0 au niveau de probabilité 1% (Niveau Prob. = 0% < 1%). Ainsi, nous ne pouvons pas rejeter le modèle théorique de régression que nous venons d'ajuster au nuage de points avec un risque de 1% d'erreur. D'autre part, l'analyse visuelle des résidus de la régression (figure 5.22b) montre une bonne répartition sans structure. L'analyse paraît convenable.

Le coefficient de corrélation de cette régression est de **0,95** pour 28 degrés de liberté (coefficient significativement différent de 0 au niveau de probabilité de 1%). La variable indépendante explique une forte proportion de la variance ($R^2 = 90,3\%$). Le modèle de régression que nous venons de définir est par conséquent **accepté**. Il reste maintenant à regarder si l'une ou l'autre orientation choisie ne sous- ou sur-estime pas les valeurs d'épaisseur du LA. Pour cela, nous avons testé si le coefficient de régression (b) est statistiquement voisin de 1 et si l'ordonnée à l'origine (a) est proche de 0 (cas d'un modèle théorique parfait) (Vauclin *et al.*, 1983 ; Saporita, 1978). Ceci revient à comparer le modèle théorique de régression à la droite d'équation $y = x$ qui représente l'égalité des valeurs d'épaisseur pour les deux orientations choisies.

Le test t de Student permet de tester si l'ordonnée à l'origine (a) de la droite de régression est nulle (H_0). Au niveau de probabilité de 1%, on ne peut pas rejeter H_0 (Niveau Proba. = 37% > 1%) (tableau 4.2, annexe 4). Ainsi, l'ordonnée à l'origine (a) n'est pas significativement différente de 0. Pour la droite de régression, $a = 3,83 \pm 4,2$. Le coefficient de régression (b) est égal à $0,97 \pm 0,06$ ce qui est très proche de 1. Un test permet de vérifier l'égalité de b à $b_0=1$ (H_0). Pour cela on calcule le rapport $t = |b - b_0| / \sigma_b$ et on le compare au T de Student dans une table de distribution de t pour test bilatéraux (Tomassone, 1983). Au niveau de probabilité 1%, $T_{(28 / 0,005)} = 3,047 > t_{\text{calc.}} = 0,5$. On ne peut donc pas rejeter l'hypothèse H_0 . La pente de la droite de régression n'est donc pas significativement différente de 1.

Les résultats des tests statistiques ne nous permettent pas de rejeter l'hypothèse que le modèle théorique de régression est significativement différent de la droite d'équation $y = x$. **Le dispositif utilisé (sondages croisés perpendiculaires, orientés Nord-Sud et Est-Ouest) n'a pas permis de mettre en évidence de variation de l'épaisseur du LA en fonction de ces deux directions et pour de faibles distances d'échantillonnage.** Ces résultats confirment donc l'analyse variographique quant à l'absence d'anisotropie à courte distance de l'épaisseur du LA. Mais cette constatation peut être nuancée par le fait que les mesures électriques sont plus **intégratrices** que les mesures à la tarière et peuvent de ce fait niveler les variations.

III-3.5 Comparaison des épaisseurs obtenues par sondages électriques et par sondages à la tarière.

1°) Comparaison des épaisseurs

Après avoir comparé les épaisseurs mesurées par les sondages électriques croisés, nous allons maintenant comparer, avec les mêmes méthodes statistiques et sur l'ensemble des données, les épaisseurs calculées par les méthodes électriques et celle mesurées par sondages à la tarière (Chéry *et al.*, 1993 et 1995). Cette comparaison permettra de confirmer les

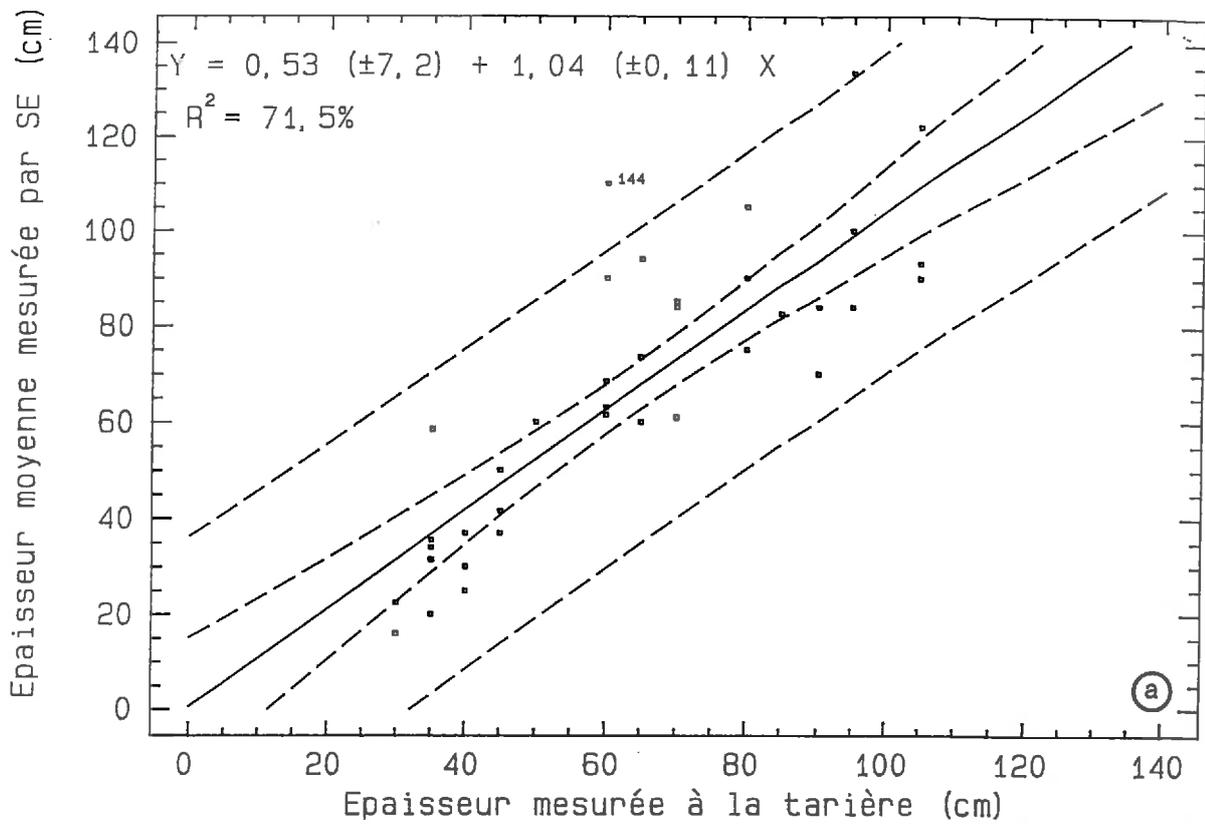


Figure 5.23a : Régression linéaire entre épaisseurs du LA mesurées par sondages électriques et épaisseurs mesurées par sondages à la tarière.

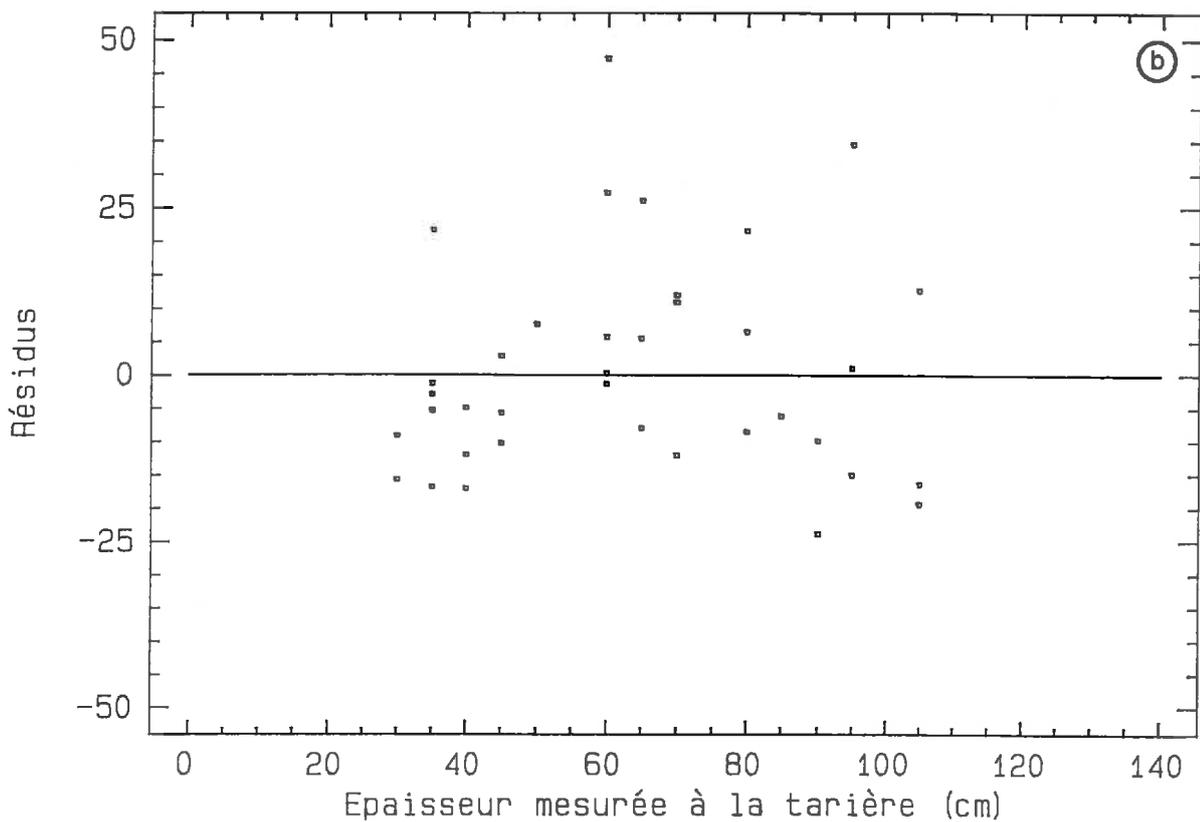


Figure 5.23b : Résidus de la régression.

observations réalisées sur le premier jeu de données des 12 sondages électriques de calage. Nous avons intégré aux 30 sondages précédents, ce premier jeu de 12 sondages. Pour les épaisseurs obtenues pour deux orientations différentes, nous avons calculé la moyenne des épaisseurs pour effectuer la comparaison. Parmi les douze sondages initiaux, deux sondages ont été éliminés de notre jeu de données (sondages 6 et 7) (figure 5.23a). En effet, comme nous l'avons déjà précisé, ces sondages ont été réalisés dans une zone très perturbée résultant d'un ancien parcellaire et d'un déplacement de la limite départementale. De ce fait, nous disposons maintenant d'un jeu de 40 données. Le paragraphe ci-dessous donne en détail les résultats de la régression et de la corrélation réalisées sur les 40 sondages.

La démarche utilisée est identique à la précédente. La table d'analyse de variance nous donne le F de Fisher ($F = 95,34$) qui teste si le coefficient de régression b est nul (H_0). Au niveau de probabilité 1% (Niveau Proba. = 0% < 1%), on rejette H_0 . Nous ne pouvons pas rejeter le modèle théorique de régression ajusté au nuage de points avec un risque d'erreur de première espèce de 1%. La figure 5.23a illustre ces résultats. L'analyse visuelle des résidus de la régression (figure 5.23b) montre une répartition sans structure. L'analyse paraît convenable.

Le coefficient de corrélation de cette régression est de **0,85** pour 38 degrés de liberté (coefficient significativement différent de 0 au niveau de probabilité de 1%). Le coefficient de détermination R^2 est égal à 71,5%. La variable indépendante explique une forte proportion de la variance. Le modèle de régression que nous venons de définir est par conséquent **accepté**. Nous allons maintenant tester si le coefficient de régression (b) est statistiquement voisin de 1 et si l'ordonnée à l'origine (a) est proche de 0.

Le test t de Student permet de tester si l'ordonnée à l'origine (a) de la droite de régression est nulle (H_0). Au niveau de probabilité de 1% (de même à 5%), on ne peut pas rejeter H_0 (Niveau Proba. = 94% > 1%). Ainsi, l'ordonnée à l'origine (a) n'est pas significativement différente de 0. Pour la droite de régression, il est de $0,53 \pm 7,2$. Le coefficient de régression (b) est égal à $1,04 \pm 0,11$ ce qui est très proche de 1. Un test permet de vérifier l'égalité de b à $b_0=1$ (H_0). Pour cela, on calcule le rapport $t = |b - b_0| / \sigma_b$ et on le compare au T de Student dans une table de distribution de t pour test bilatéraux. Au niveau de probabilité 5% $T_{(38,0,025)} = 2,334 > t_{\text{calc.}} = 0,36$. Au niveau de probabilité 1% $T_{(38,0,005)} = 2,981 > t_{\text{calc.}} = 0,36$. On ne peut donc pas rejeter l'hypothèse H_0 . La pente de la droite de régression n'est donc pas significativement différente de 1.

Il n'existe pas de différences significatives entre le modèle théorique de régression et la droite d'équation $y = x$. L'ensemble de ces résultats nous permet de conclure qu'il n'existe pas de différence significative entre l'épaisseur du LA mesurée à la tarière et l'épaisseur du LA mesurée par sondage électrique.

2°) Quantifications des écarts

Mais pour respecter l'homogénéité des comparaisons entre épaisseurs mesurées par sondages à la tarière et épaisseurs mesurées par sondages électriques, nous allons calculer les **écarts quadratiques moyens** entre ces deux épaisseurs obtenues pour les comparer à ceux du premier jeu de 10 données (cf. § III-2.2).

Le tableau 5.11 présente les statistiques sur les valeurs des épaisseurs du LA obtenues par inversion des sondages électriques et celles mesurées par sondages à la tarière au même point.

	E1	E2	(E2- E1)	(E2- E1) ²
Minimum	16	30	-50	0,25
25 ^{ème} %tile	37	40	-10	25
Médiane	66	60	1,8	90,5
75 ^{ème} %tile	90	82,5	8,5	225
Maximum	133,5	105	20	2500
Moyenne	66,2	63,4	-2,9 ^a	256 ^b
Ecart-type	29,8	24,3	15,9	472

E1 : épaisseur du LA calculée d'après les sondages électriques (en cm)

E2 : épaisseur du LA mesurée à la tarière (en cm)

Tableau 5.11 : Comparaison par grandeurs statistiques de l'épaisseur du LA calculée par inversion des sondages électriques et mesurée à la tarière (40 sondages).

L'**écart moyen** entre épaisseur mesurée à la tarière et épaisseur mesurée par sondages électrique [^a = E(E2- E1) = -2,9] montre un **biais systématique**. Ce biais étant négatif, nous pouvons dire qu'en moyenne, la mesure par sondage électrique **surestime légèrement** les épaisseurs du LA. Il est plus élevé que celui constaté avec les douze sondages électriques initiaux. Par contre, l'écart-type de cet écart est nettement moins important (15,9 contre 37,2 cm).

L'**écart quadratique moyen** [^b = EQM = E(E2- E1)²] est de 256 cm² avec n = 40, la racine carrée de cet EQM est de **16 cm** ($\sqrt{256}$). Cette erreur est nettement moins élevée en valeur absolue que celle constatée avec les dix sondages électriques initiaux (21,6 cm), mais reste supérieure aux erreurs de mesure à la tarière (± 5 cm).

III-4 Comparaison des structures spatiales des épaisseurs mesurées par les deux méthodes

Dans ce paragraphe, nous comparons la **structure spatiale** de la variable "épaisseur du LA" lorsqu'elle est mesurée par sondage à la tarière et lorsqu'elle est mesurée par sondage électrique. Pour cela, nous avons établi les variogrammes pour les deux méthodes de mesure. Le pas de ces variogrammes expérimentaux est de **50 m** et ils ont été calculés pour des distances allant jusqu'à 500 m. Certaines classes de distances ont été regroupées de manière à générer un nombre de couples de points le plus proche possible de 50.

Les deux variogrammes (figure 5.24) montrent une structure similaire qui peut être modélisée par un modèle de type **sphérique** de la forme :

$$\gamma(h) = c_0 + c[1,5h/a - 0,5(h/a)^3]$$

Notons que les **effets de pépite** des deux variogrammes sont **identiques** : $c_0 = 220$ cm², de même que les portées : $a = 150$ m. Seuls les "sill" ($c = \text{palier} - \text{pépite}$) sont différents et valent respectivement 440 et 700 cm² pour les variogrammes de l'épaisseur mesurées à la tarière et par sondage électrique. Cette différence de palier s'explique par la différence de variance des deux échantillons ; elle ne traduit pas de différence significative dans la structure spatiale de l'épaisseur mesurée par les deux méthodes. Nous montrons ainsi, à partir du jeu de données dont nous disposons, que **l'utilisation de l'une ou de l'autre méthode de mesure de l'épaisseur du LA n'induit de différence significative de la structure spatiale de la variable étudiée.**

III-5 Conclusion

Une campagne de sondages électriques nous a, dans un premier temps, permis de définir les unités électrostratigraphiques du secteur d'étude. Par la suite, la réalisation de sondages électriques croisés, orientés perpendiculairement l'un par rapport à l'autre, n'a pas permis de mettre en évidence des variations de l'épaisseur du LA en fonction de ces deux directions. **Ce résultat a confirmé, sur ce point, l'analyse variographique.** Enfin, nous avons montré que l'utilisation de méthodes électriques pour la détermination de l'épaisseur du limon-argileux n'a pas introduit de sur- ou sous-estimation significative des valeurs obtenues lors de la comparaison avec les épaisseurs mesurées par sondages à la tarière au même point. De même, l'analyse variographique sur les épaisseurs mesurées par les deux méthodes n'a pas montré de différence dans leur structure spatiale. Ces derniers résultats sont particulièrement intéressants car ils montrent qu'il **n'existe pas de différences significatives entre une mesure ponctuelle (sondage à la tarière) et une mesure intégrant un volume (sondages électriques) pour la variable épaisseur du LA.** Ainsi, une généralisation des méthodes électriques à l'ensemble du secteur serait par conséquent tout à fait envisageable pour un objectif d'échantillonnage plus dense. Une automatisation des sondages électriques (méthodes RATEAU, CRG de Garchy) permettrait d'augmenter le nombre de mesures. Enfin, d'autres méthodes pourront éventuellement être employées pour répondre à ce problème et en particulier les méthodes électro-magnétiques (EM 31).

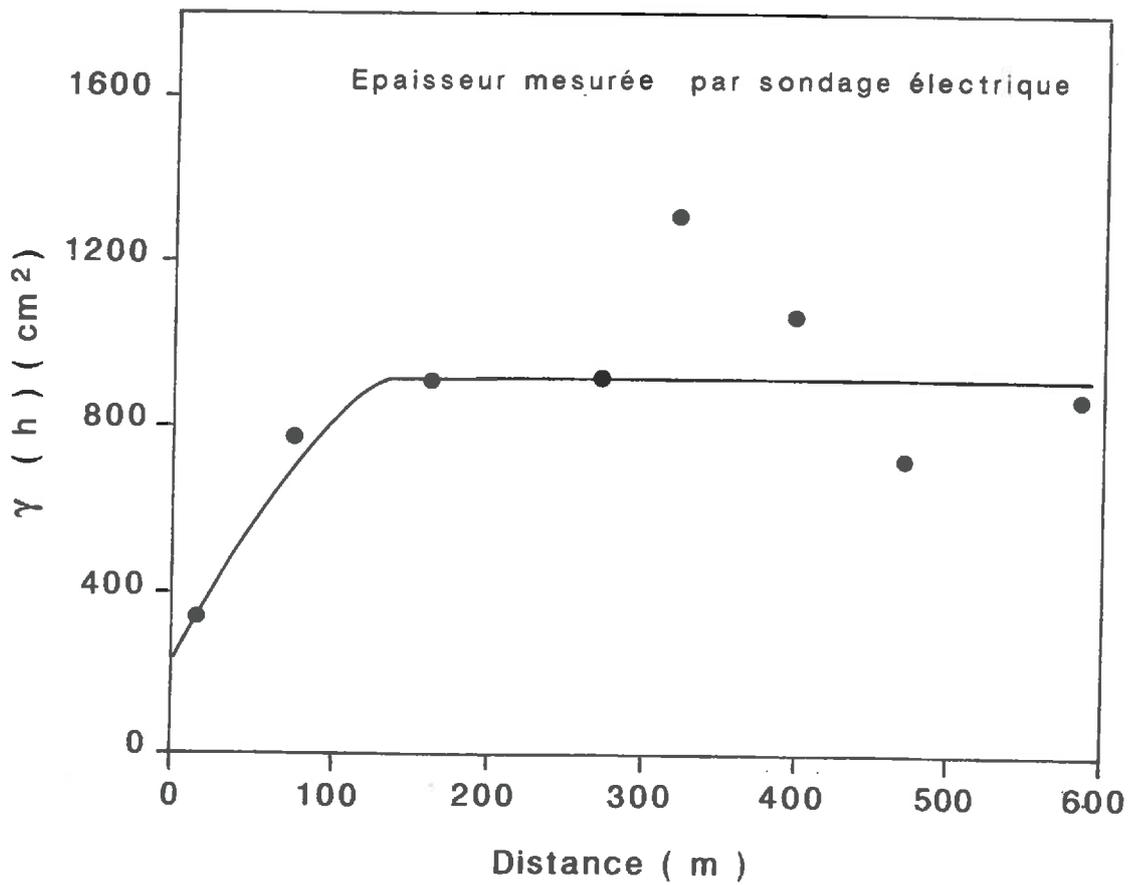
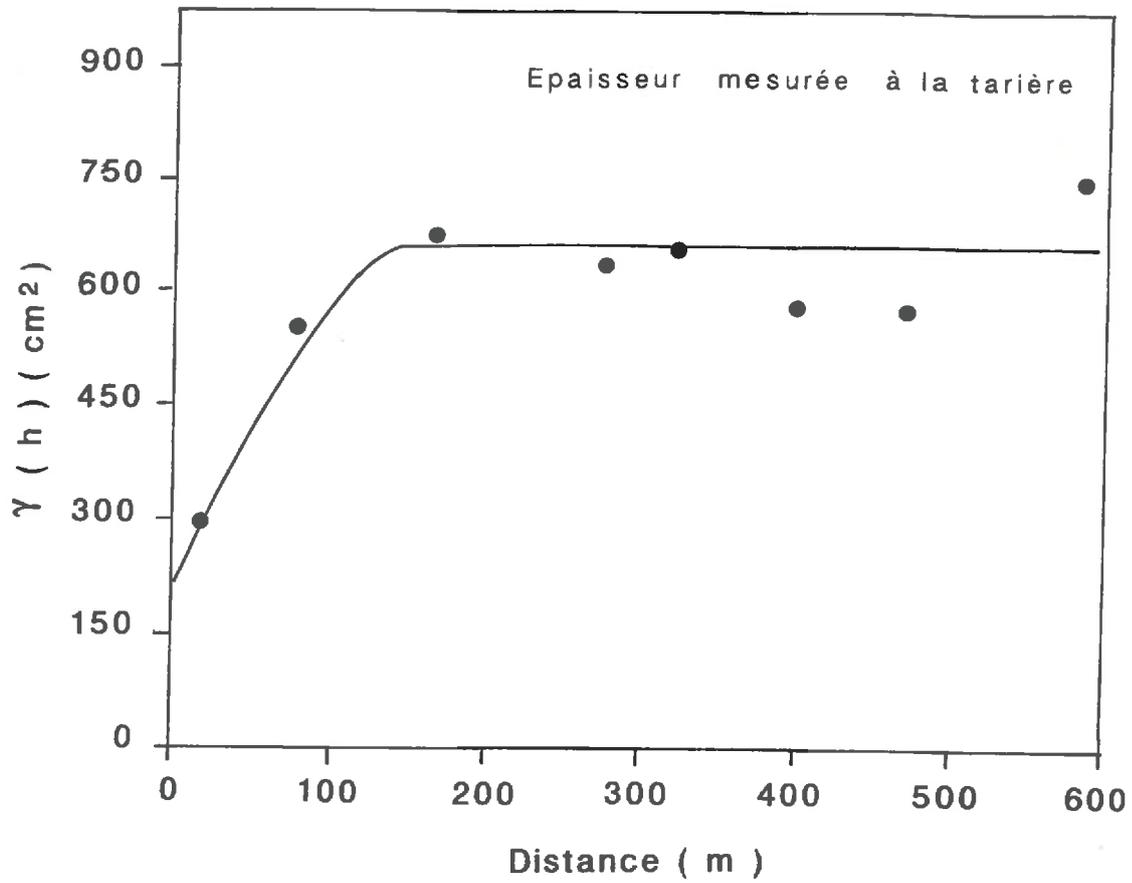


Figure 5.24 : Variogrammes des épaisseurs mesurées par sondages à la tarière et par sondages électriques.

IV. CONCLUSION DU CHAPITRE 5

Dans ce chapitre, nous avons évalué l'épaisseur de la couverture limono-argileuse sur l'ensemble du secteur d'étude. Pour cela, trois types d'échantillonnage ont été employés. Un premier échantillonnage (100 sondages) régulièrement réparti sur le secteur suivant une maille de 106 m, un deuxième semi-aléatoire de 40 sondages et enfin un troisième échantillonnage (50 sondages) régulièrement réparti entre les mailles du premier et servant de jeu de données indépendant pour les validations ultérieures. Nous avons ensuite discuté et analysé la stratégie d'échantillonnage utilisée et montré qu'une première analyse visuelle des données permettait de déceler une **variabilité** de l'ordre de **20 m**.

L'analyse variographique de l'ensemble du jeu de données (190 sondages) a montré l'imbrication de **deux structures** correspondant à une superposition de variabilités d'échelles différentes, **l'absence d'anisotropie** dans la variabilité de l'épaisseur du LA et un effet de pépite qui représentent **15%** de la variance totale de l'échantillon.

Nous avons ensuite comparé, sur la base du jeu de données indépendant, deux méthodes d'interpolation de l'épaisseur du LA à partir du jeu de données comportant 100 sondages régulièrement répartis selon une grille de 106 m. La première méthode, non probabiliste (méthode TIN), a permis d'établir une carte en isovaleurs de l'épaisseur du LA, mais la validation, effectuée à partir du jeu de données indépendant, montre que seulement 13% de la variance se trouve expliquée par le modèle. La deuxième méthode, probabiliste (krigeage), a permis d'améliorer le pourcentage de variance expliquée (22%), mais surtout la précision de l'estimation des données a été nettement améliorée. De plus, l'analyse de critères statistiques a fait apparaître une **nette préférence** pour la méthode d'interpolation **probabiliste**.

Nous avons alors réalisé l'interpolation par krigeage de l'épaisseur du LA sur la totalité des sondages (190) pour aboutir à une carte des isopaches du LA définitive. Les valeurs des différents indices de la validation croisée montrent que les données ont été correctement réestimées lors de l'interpolation par krigeage. La prise en compte de la totalité des sondages a **amélioré la qualité de l'estimation de l'épaisseur du LA** sur le secteur d'étude.

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'évaluation de la densité d'échantillonnage optimale pour obtenir des écarts-types d'estimation par krigeage de l'ordre de 15 cm. Les résultats obtenus ont montré qu'un **échantillonnage plus resserré** que celui déjà réalisé, est nécessaire pour diminuer ces écarts-types.

Plutôt que de procéder à de nouveaux sondages à la tarière pour effectuer un échantillonnage complémentaire, nous avons choisi de mettre en oeuvre des méthodes géophysiques. Nous avons alors comparé les épaisseur du LA mesurées par sondages à la

tarière et par sondage électrique. Ainsi, les résultats obtenus par ces deux méthodes n'étant pas différents, une **automatisation des méthodes électriques** devient envisageable ultérieurement pour atteindre la densité optimale d'échantillonnage.

Sur 30 points de mesure, nous avons réalisé, en plus du sondage à la tarière, deux sondages électriques orientés perpendiculairement. Les résultats concernant les sondages électriques, n'ont pas révélé, d'une part, de différences significatives d'épaisseurs du LA entre les sondages électriques croisés et d'autre part, de mettre en évidence des différences significatives entre les méthodes mécaniques et les méthodes électriques bien que ces dernières soient plus intégratrices. Les résultats montrent que la couche limono-argileuse (ρ_2 - e_2) est la mieux définie et la plus conductrice. La résistivité moyenne est de **36,7 Ωm** avec un écart-type de 5,1 Ωm ce qui indique une grande **homogénéité** tant du point de vue de sa constitution que de sa teneur en eau au moment des mesures. L'épaisseur de cette couche varie entre 0,4 et 1,4 m. La couche résistante sous-jacente possède une résistivité qui fluctue dans un rapport important (de 1 à 5) indiquant une **variabilité horizontale importante**.

DELIMITATION DES MATERIAUX ARGILO-SABLEUX PAR TRAINES ELECTRIQUES

Lors de la prospection pour la réalisation de la carte pédologique au 1/10 000^{ème}, des sondages à la tarière ont montré que dans la partie centrale du secteur d'étude, le LA reposait soit directement sur des calcaires aquitaniens cryoturbés, soit sur des formations argilo-sableuses de plus de 6 m d'épaisseur directement sus-jacentes au calcaire de Beauce. Dans le chapitre précédent, nous avons évalué l'épaisseur du LA en **tout point** du secteur d'étude en utilisant des méthodes mécaniques et géophysiques car la connaissance de l'épaisseur de la couverture de sol est une caractéristique essentielle pour la prise en compte des transferts d'eau.

Cependant, la présence de **matériaux argilo-sableux** intercalés entre le LA et le calcaire de Beauce, influencera **très sensiblement** ces transferts. En effet, la **forte teneur en argile** de certains niveaux de ces matériaux pourra jouer un rôle de barrière dans l'écoulement des fluides vers l'aquifère. Il est donc important, pour la localisation des zones du secteur où les écoulements seront modifiés, de déterminer l'extension et l'épaisseur de ces matériaux argilo-sableux. C'est ce que nous nous proposons de faire dans ce chapitre.

Nous avons déjà décrit, dans le troisième chapitre de ce travail, les caractéristiques physico-chimiques de ces matériaux argilo-sableux que nous nous proposons à présent de délimiter de façon détaillée. Pour cela, nous avons sélectionné une zone de **30 ha** sur laquelle nous avons repéré, par sondages à la tarière, la présence de ces matériaux. Nous allons donc, dans un premier temps, essayer de décrire l'**extension latérale** de ces matériaux à l'aide de méthodes électriques, puis, par la suite, nous essaierons d'évaluer leur **épaisseur** en déterminant la profondeur d'apparition du calcaire sous-jacent. Enfin, nous essaierons d'établir une carte des isopaques de ces formations sur la zone de 30 ha en **intégrant** les résultats obtenus au sein du S.I.G Arc/Info.

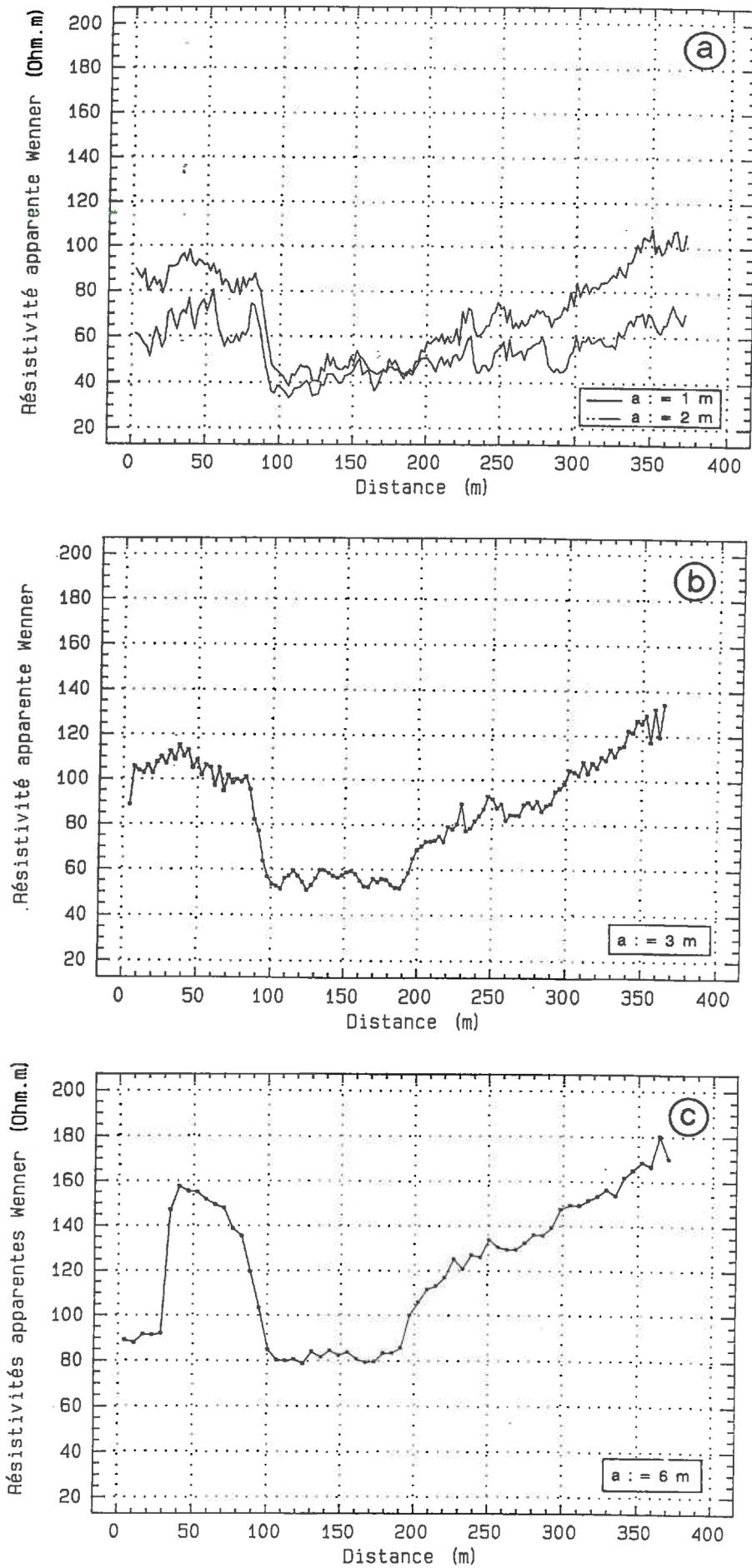


Figure 6.1 : Profils électriques ($a = 1, 2, 3$ et 6 m). Représentation de la résistivité apparente en fonction de la distance.

I. APPROCHE PAR UN TRAINÉ ELECTRIQUE

I-1 Mise en oeuvre

Les mesures par trainés électriques consistent à déplacer un quadripôle, à écartement constant a des électrodes, le long de lignes parallèles et équidistantes appelées "transects". Les mesures sont portées sur des cartes où sont tracées les courbes d'égale valeur de résistivité apparentes appelées "courbes d'isorésistivité". Ces cartes mettent en évidence des structures, nommées "anomalies", caractérisées par leur géométrie et leurs gradients de résistivité apparente. Ces anomalies sont situées dans un volume de terrain compris entre la surface et a ou $3a/4$.

Sur la zone de 30 ha étudiée, nous avons réalisé un **profil électrique** de 400 m orienté Nord-Sud (cf. figure 6.3, trainé n°1). Plusieurs espacements d'électrodes ont été choisis ($a = 1, 2, 3$ et 6 m) afin de tester les **variations de résistivité apparente** avec la profondeur. Les mesures ont été effectuées systématiquement avec un quadripôle Wenner et Dipôle-Dipôle (DD). Les figures 6.1a, b et c représentent les courbes obtenues pour chaque écartement avec la méthode Wenner. La mesure DD est plus **chaotique** par rapport à la mesure Wenner qui **lisse** les anomalies. La mesure Wenner est donc moins sensible aux hétérogénéités latérales. Cette différence est cohérente avec les modélisations théoriques (Dabas, 1992 et 1993). La mesure DD sera par conséquent mieux adaptée pour définir au mieux les **discontinuités horizontales** sur le profil électrique, alors que la mesure Wenner facilitera la lecture des **variations de grande amplitude**.

I-2 Résultats

Les mesures en $a = 1$ m sont celles qui intègrent le moins de volume de terrain et qui sont donc le plus sujettes aux faibles variations de la topographie en surface. Ainsi, un simple changement de parcelle, marqué par une raie de labour plus importante, est détectable avec cet écartement (figure 6.1a). En étudiant le profil en $a = 2$ m (figure 6.1a) et $a = 3$ m (figure 6.1b), on remarque que l'on débute dans la partie Nord par une valeur de résistivité voisine de 90Ω m qui **diminue** lentement jusqu'à $x = 80$ m où la valeur chute brusquement à 40Ω m. Puis on atteint un **palier** de résistivité (vers 45Ω m) jusqu'à $x = 200$ m, suivi par une **remontée** lente de résistivités jusqu'à $x = 350$ m. Cette **anomalie** se retrouve sur tous les profils effectués et possède une amplitude plus forte en quadripôle Wenner qu'en DD. Le profil en $a = 6$ m (figure 6.1c) nous donne une image de l'anomalie détectée nettement plus lissée, le volume de terrain intégré étant beaucoup plus important. Une **pseudo-section** résume l'ensemble de ces résultats (figure 6.2). Rappelons que la pseudo-section (Hallof, 1957 ; Edwards, 1977) est tracée en associant les mesures de résistivité électrique apparente sur un même profil mais avec différents écartements d'électrodes (dans notre étude $a = 1, 2, 3$ et 6 m). Les valeurs des

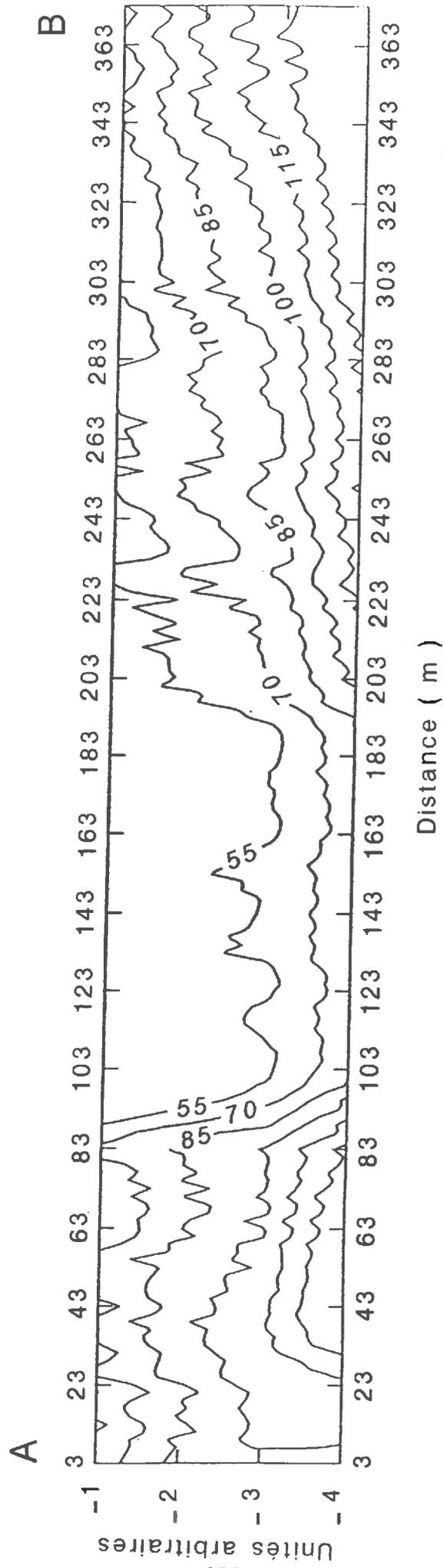


Figure 6.2 : Pseudo-section électrique Wenner ($a = 1, 2, 3$ et 6 m).
 (Courbes d'égale résistivité en Ωm).

résistivités électriques apparentes sont représentées avec une échelle arbitraire pour l'axe des ordonnées qui correspond à la profondeur. Cette pseudo-section révèle un **épaississement local** des matériaux recouvrant le calcaire dans la zone sélectionnée.

I-3 Interprétation

En étudiant les résistivités électriques obtenues, on remarque que la plage de résistivités apparentes la plus basse se situe vers **35-40 Ωm** pour $a = 1$ m et $x = 100$ m. La résistivité la plus forte atteint **150 Ωm** au Nord et plus de **170 Ωm** au Sud du profil en $a = 6$ m. Si l'on se reporte aux sondages électriques réalisés précédemment (cf. chapitre 5), la résistivité du LA calculée par le modèle tabulaire était d'environ 35 Ωm , celle du calcaire cryoturbé se situait vers 130-140 Ωm et celle du calcaire non fragmenté entre 160 et 170 Ωm . Nous pouvons proposer l'interprétation suivante relative au jeu de données que nous possédons. En $x = 100$ m, le quadripôle de plus petit écartement n'est pas capable de repérer le substratum calcaire, la résistivité apparente mesurée est la **résistivité vraie** du LA. Nous sommes donc soit en présence d'une épaisseur **anormale** de LA ($>1\text{m}$) ou d'une **superposition** de LA et d'un matériau possédant une résistivité analogue ou s'en approchant. Par contre, au Nord et au Sud de ce profil, l'anomalie n'est plus repérable et c'est le plus grand quadripôle ($a = 6$ m) qui intègre le plus de substratum calcaire. Nous enregistrons alors des résistivités apparentes qui tendent vers celles du calcaire cryoturbé au Nord et des résistivités apparentes encore plus élevées au Sud qui correspondent à un calcaire moins cryoturbé, voire plus massif (valeurs malgré tout faibles car intégrant celles d'un recouvrement de LA d'au moins 50 cm). L'analyse des profils réalisés nous indiquent la nette **dissymétrie** que présente l'anomalie ainsi repérée. Le pendage des couches mis en évidence est plus important au Nord du profil qu'au Sud.

I-6 Conclusion

La structure décrite précédemment est suffisamment nette pour envisager une prospection systématique afin de définir son extension horizontale. La pseudo-section discutée au paragraphe précédent a permis de définir l'**écartement optimum** des électrodes pour la généralisation de ces profils. L'écartement en $a = 6$ m étant trop intégrateur, car il gêne ainsi le repérage de la couche superficielle (LA) et celui en $a = 1$ m l'étant trop peu, car trop sensible aux variations de micro-topographie, seuls deux écartements testés restaient envisageable. Nous avons choisi l'écartement en $a = 3$ m de manière à intégrer le plus de terrain possible sans prendre en compte la micro-topographie qui gênerait le repérage de la couche superficielle. D'autre part, un ensemble de sondages mécaniques, complétant ceux dont nous disposons déjà, permettra un calage plus fin des trainés électriques et l'évaluation de la profondeur du substratum calcaire.

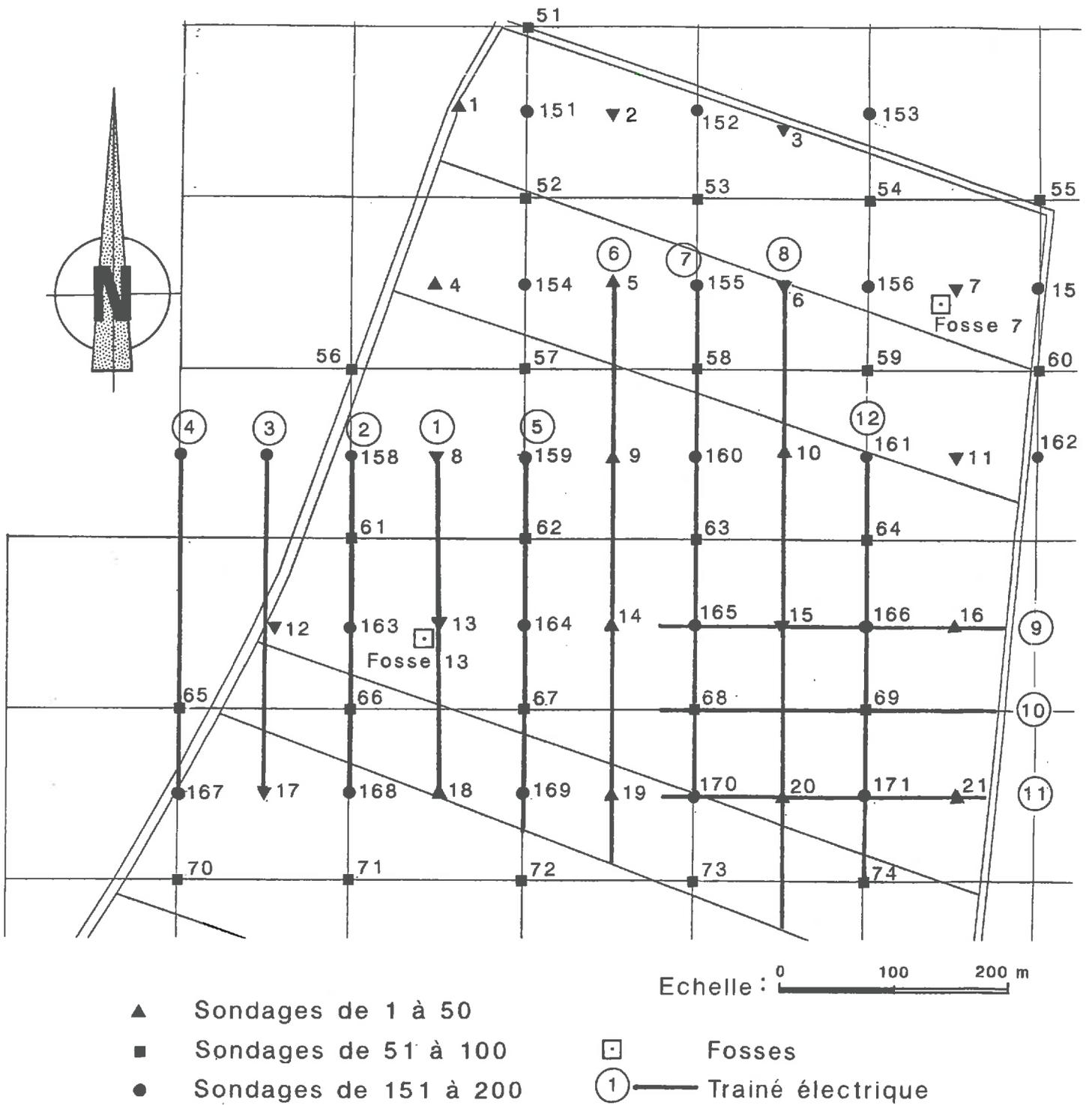


Figure 6.3 : Situation des trainés électriques, des sondages mécaniques et des fosses réalisés sur la zone de 30 ha.

II. GENERALISATION DES TRAINES ELECTRIQUES

L'objectif de ce paragraphe est de mettre en place une **généralisation** des trainés électriques sur l'ensemble de la zone de 30 ha choisie, puis de discuter et analyser les résultats de résistivités apparentes ainsi obtenus. La carte en **isovaleurs des résistivités apparentes** qui sera établie permettra, ensuite, de définir une relation entre la profondeur d'apparition du substratum calcaire et les valeurs de résistivité.

II-1 Mise en place du dispositif

Le dispositif mis en place comporte **douze trainés électriques** espacés de **75 m**. Il a été réalisé avec un quadripôle Wenner d'écartement $a = 3$ m (figure 6.3). Nous avons pris soin de débiter notre expérimentation par la reprise du premier trainé électrique (n°1) réalisé précédemment (§ I) de manière à recalculer nos résultats antérieurs pour éventuellement tenir compte des variations de teneur en eau du terrain. Sur les 12 trainés réalisés, 9 l'ont été selon une direction Nord-Sud et 3 selon une direction Est-Ouest. Cette configuration a été adoptée pour recouper au maximum la structure déjà repérée par les sondages à la tarière. Les mesures de résistivité apparente ont été effectuées avec un résistivimètre RMCA4 (SEPTA/CNRS).

II-2 Résultats

II-2.1 Description des trainés

Les 12 trainés électriques montrent que d'une manière générale, les mesures Wenner et Dipôle-Dipôle sont **analogues** (cf. les 12 profils en annexe 3). Sur la presque totalité des trainés, on note la présence de zones où les résistivités apparentes chutent très nettement (jusqu'à $15 \Omega\text{m}$) avant de remonter plus ou moins rapidement. Ces zones de faible résistivité peuvent être pour chacun des trainés : uniques et peu étendues sur l'ensemble du trainé (trainés 1, 2, 3), uniques et très étendues (trainés 5, 6, 7) ou en plusieurs parties (trainés 4, 8, 9, 11, 12). Seul le trainé 10 ne présente pas de zones nettes où la résistivité apparente atteint 15 à $20 \Omega\text{m}$. L'analyse visuelle de l'ensemble de ces trainés permet donc de **confirmer la présence de la structure** déjà mise en évidence par le trainé électrique initial et par les sondages à la tarière et d'en préciser les contours. Ainsi, nous pouvons noter qu'au niveau des trainés 5, 6, 7, c'est-à-dire vers le milieu de la zone étudiée, la structure s'élargit très sensiblement, alors que vers les limites du secteur, la structure se rétrécit très nettement. Quant aux "trous" que l'on peut observer sur les trainés 2 et 3, ils sont dus à l'absence de mesures résultant du passage de la route goudronnée.

Histogramme de fréquence

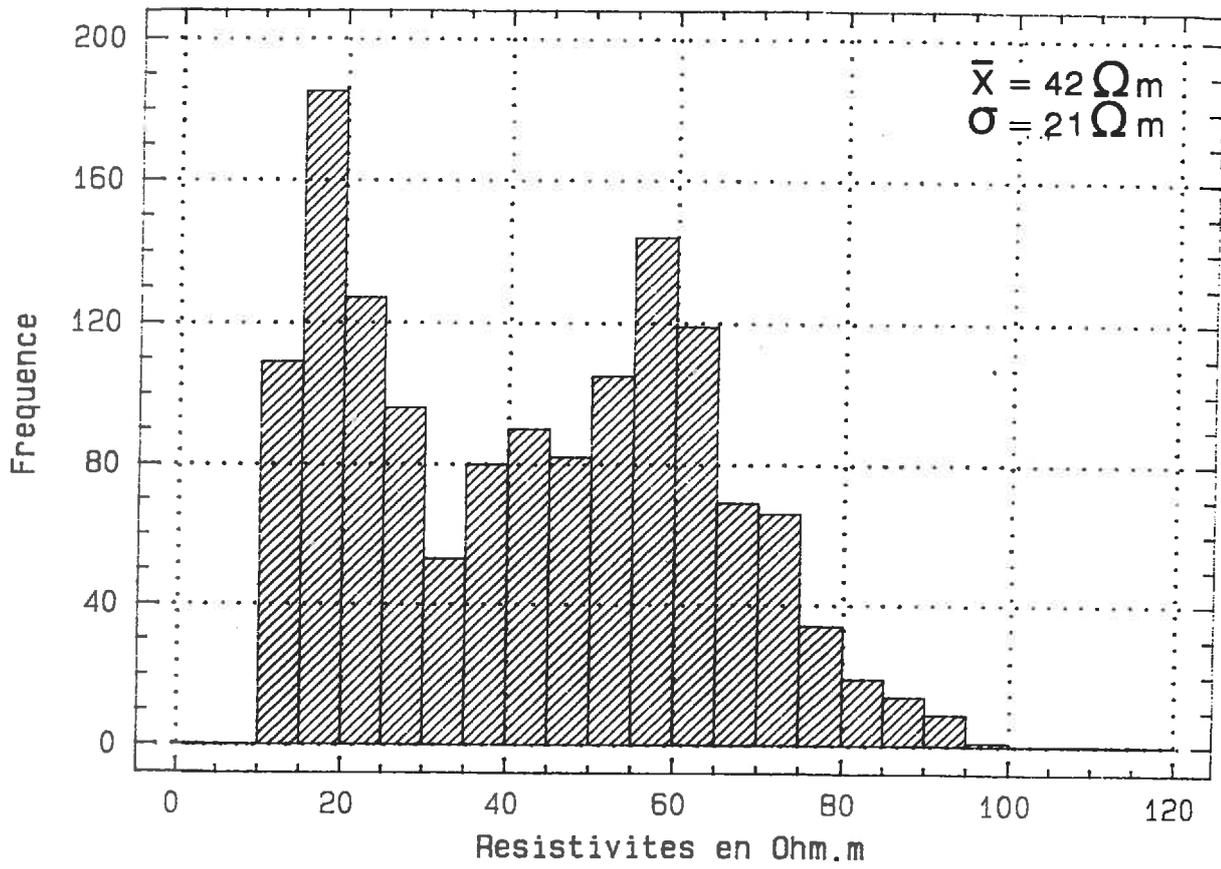


Figure 6.4 : Histogramme de fréquence des résistivités apparentes.

II-2.2 Analyse statistique des données de résistivités apparentes

L'analyse statistique élémentaire des données de résistivité apparente indique que **moyenne** et **médiane** sont équivalentes (**42,4 Ωm**), et que l'**écart-type** est de **21 Ωm** pour un effectif total de 1402 (tableau 6.1). Les résistivités apparentes maximale et minimale sont respectivement de 96 Ωm et de 10 Ωm . Les données de résistivités apparentes ont été regroupées par classes de 5 Ωm (18 classes). L'**histogramme de fréquence** montre une distribution **bimodale** le premier mode correspondant à la classe 15-20 Ωm et le second à la classe 55-60 Ωm (figure 6.4).

	$\rho_{app.} (\Omega\text{m})$	$\rho_{app.} \leq 35 \Omega\text{m}$	$\rho_{app.} > 35 \Omega\text{m}$
Effectifs	1402	570	832
Moyenne	42	21	57
Médiane	42	20	57
Variance	434	37	166
Ecart-type	21	6	13
Minimum	10	10	35
Maximum	96	35	96
1 ^{er} Quartile	23	15	47
2 ^{ème} Quartile	59	25	65
Coeff.de variation	49%	29%	22%

Tableau 6.1 : Résultats de l'analyse statistique élémentaire des données de résistivités apparentes.

L'analyse visuelle de cet histogramme montre que la population des résistivités apparentes étudiées peut être divisée en **deux échantillons distincts**. En considérant les résistivités inférieures ou égales à 35 Ωm d'une part et celles supérieures à 35 Ωm d'autre part, nous obtenons pour ces deux échantillons une distribution **unimodale**. Pour le premier échantillon ($\rho \leq 35 \Omega\text{m}$), l'effectif est de 570, la moyenne est égale à 21 Ωm , la médiane à 20 Ωm et l'écart-type à 6 Ωm . Pour le deuxième échantillon ($\rho > 35 \Omega\text{m}$), ces valeurs sont respectivement de 57 Ωm , 57 Ωm et 13 Ωm pour un effectif de 832.

II-2.3 Carte des isorésistivités

La réalisation des trainés électriques nous a permis d'établir la **carte en isovaleurs de résistivités apparentes** présentée figure 6.5. Sur cette carte sont représentés en pointillés les 12 transects mesurés. Le transect noté A B correspond au trainé électrique originel (trainé n°1). On observe une grande **zone de faible résistivité** (inférieure à 30 Ωm) étendue sur

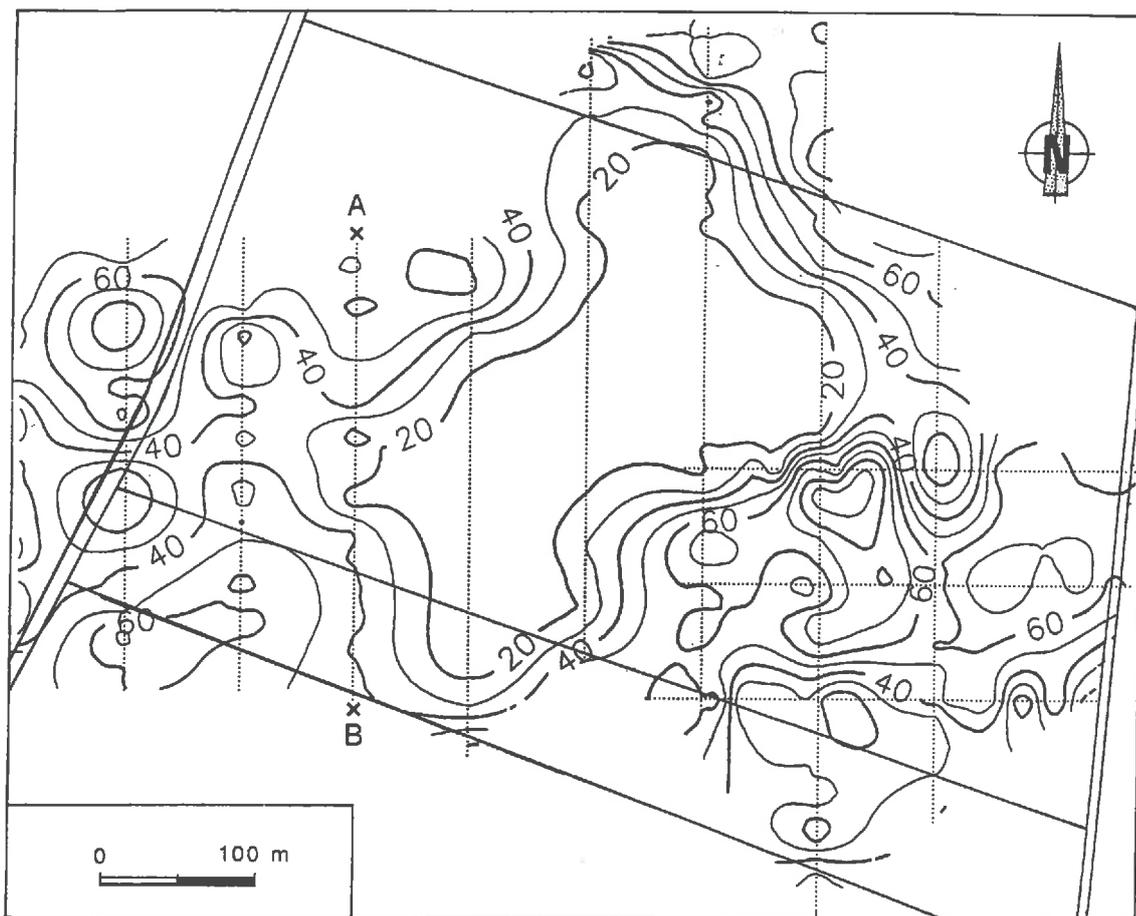


Figure 6.5 : Carte des isorésistivités électriques apparentes. Equidistance : 10 Ω m.
 (Les limites de parcelles et les routes sont figurées en trait plein.
 Les profils de mesure sont figurés en traits pointillés.)

presque toute la largeur du secteur et orientée Est-Ouest. Cette zone s'élargit très nettement dans la partie centrale de la zone étudiée et s'amincit aux extrémités.

II-2.4 Remarque : comparaison multodate des trainés électriques sur le transect n°1

Sur le transect 1, les deux trainés électriques ont été réalisés à des **dates différentes** avec un quadripôle Wenner d'écartement $a = 3$ m. Le premier trainé électrique, d'une longueur totale de 400 m, a été réalisé durant le mois d'octobre, période pendant laquelle les sols ne sont pas encore totalement réhumectés et la teneur en eau généralement la plus basse. Le deuxième trainé, d'une longueur totale de 320 m, a été effectué au même endroit, durant le mois de janvier où les teneurs en eau des sols sont nettement plus élevées. Ces deux trainés ont été reportés sur le même graphique pour être comparés (figure 6.6). Il ressort de cette comparaison que le trainé réalisé au mois d'octobre montre sur tout le profil, des résistivités apparentes nettement **plus élevées**. Il existe donc un **décalage** des résistivités apparentes pour des mesures effectuées à des dates différentes. Nous pouvons noter également que la structure mise en évidence par le premier profil est nettement visible sur le second avec un contraste un peu moins net.

Ces remarques expliquent les valeurs différentes de résistivités apparentes obtenues pour le limon argileux lors des deux campagnes de sondages électriques. La résistivité apparente moyenne du LA est comprise entre 30 et 35 Ωm pour les mesures effectuées en octobre et elle est de 21 Ωm pour les mesures réalisées au mois de janvier.

II-2.5 Interprétation

La zone centrale de faible résistivité que nous venons de mettre en évidence pourrait correspondre à l'apparition des matériaux argilo-sableux déjà repérés par les sondages à la tarière. Les très faibles valeurs de résistivité (jusqu'à 15 Ωm) sont en effet en accord avec l'existence de matériaux argileux. Cette zone pourrait ainsi définir l'**extension latérale** de ces matériaux.

D'autre part, l'étude de la distribution de l'ensemble des résistivités apparentes a permis de mettre en évidence deux populations bien distinctes qui pourraient caractériser l'une le limon-argileux (pour les résistivités apparentes $>$ à 35 Ωm) et l'autre la superposition limon argileux sur matériaux argilo-sableux (pour les résistivités apparentes $<$ à 35 Ωm). La réalisation de sondages à la tarière où sera mesurée la profondeur d'apparition des différents matériaux permettra de rechercher une **relation** entre la profondeur d'apparition du calcaire et les valeurs de résistivité apparente, utilisable pour passer ensuite de la résistivité à l'épaisseur.

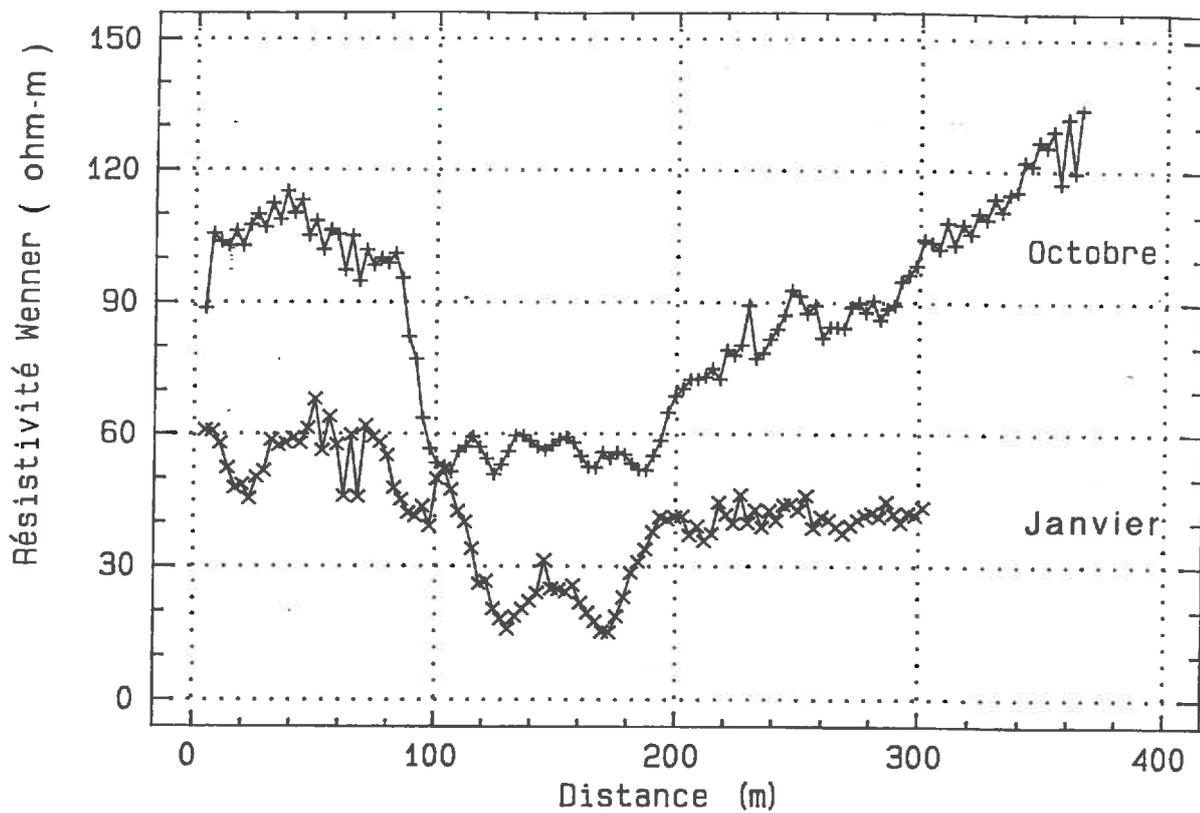


Figure 6.6 : Comparaison multidade de deux trainés réalisés sur le transect n°1

III. MISE EN EVIDENCE DE LA STRUCTURE

Dans ce paragraphe, nous allons, à partir des résultats obtenus précédemment, établir une **relation** entre la **résistivité apparente** mesurée par sondage électrique et la **profondeur d'apparition du calcaire** mesurée par sondage à la tarière. Cette relation sera discutée puis validée à partir d'un échantillonnage de valeurs de résistivité apparente indépendant. Nous calculerons ensuite, à l'aide de la relation établie, les profondeurs d'apparition du substratum calcaire à partir des données de résistivité apparente pour réaliser la **carte des isohypses du toit du calcaire**. Enfin, nous validerons également cette carte à partir d'un jeu de données indépendant, constitué par des mesures de profondeur du calcaire effectuées par sondages à la tarière.

III-1 Etude du trainé n°1

III-1.1 Relation entre la résistivité apparente et la profondeur d'apparition du calcaire

1°) Réalisation des sondages à la tarière

Le long du trainé n°1, des sondages à la tarière ont été réalisés tous les 25 m sur une longueur totale de 300 m, soit 13 sondages au total identifiés par leur distance à l'origine du trainé (numérotation de 0 à 300). Deux sondages supplémentaires ont été effectués à 119 et 120 m et numérotés respectivement 119 et 120. Pour cet ensemble de **15 sondages à la tarière**, nous avons essayé d'atteindre à chaque fois le substratum calcaire dur et, lorsque cela n'était pas possible, jusqu'à ce que nous ne puissions plus pénétrer faute de rallonges. Ainsi, pour chaque sondage, nous avons noté la profondeur d'apparition du calcaire et la résistivité apparente mesurée à la verticale de ces sondages, avec un écartement de $a = 3$ m, lors de la réalisation du trainé électrique n°1. Quatorze couples de valeurs ont ainsi été obtenus car pour le sondage 150 nous n'avons pas pu atteindre le calcaire du fait de la forte épaisseur des matériaux argilo-sableux ($> 6,20$ m) à cet endroit.

2°) Comparaison de la résistivité apparente et de la profondeur d'apparition du calcaire

Nous avons comparé la **résistivité apparente** et la **profondeur d'apparition du calcaire** tout au long du transect (figure 6.7a), puis nous avons reporté sur un graphique les résistivités apparentes Wenner en abscisse et la profondeur d'apparition du calcaire en ordonnée (figure 6.7b). Ce graphique montre qu'il existe une **relation** entre ces deux variables.

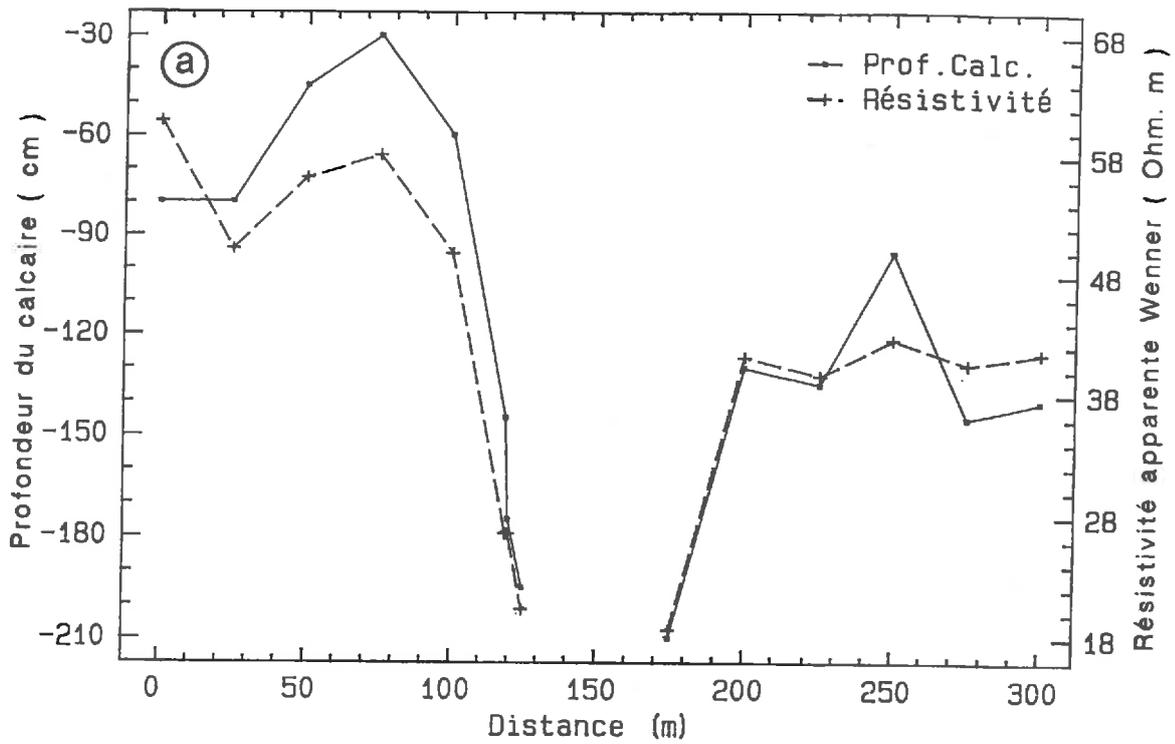


Figure 6.7a : Comparaison de la résistivité apparente et de la profondeur d'apparition du calcaire le long du transect n°1.

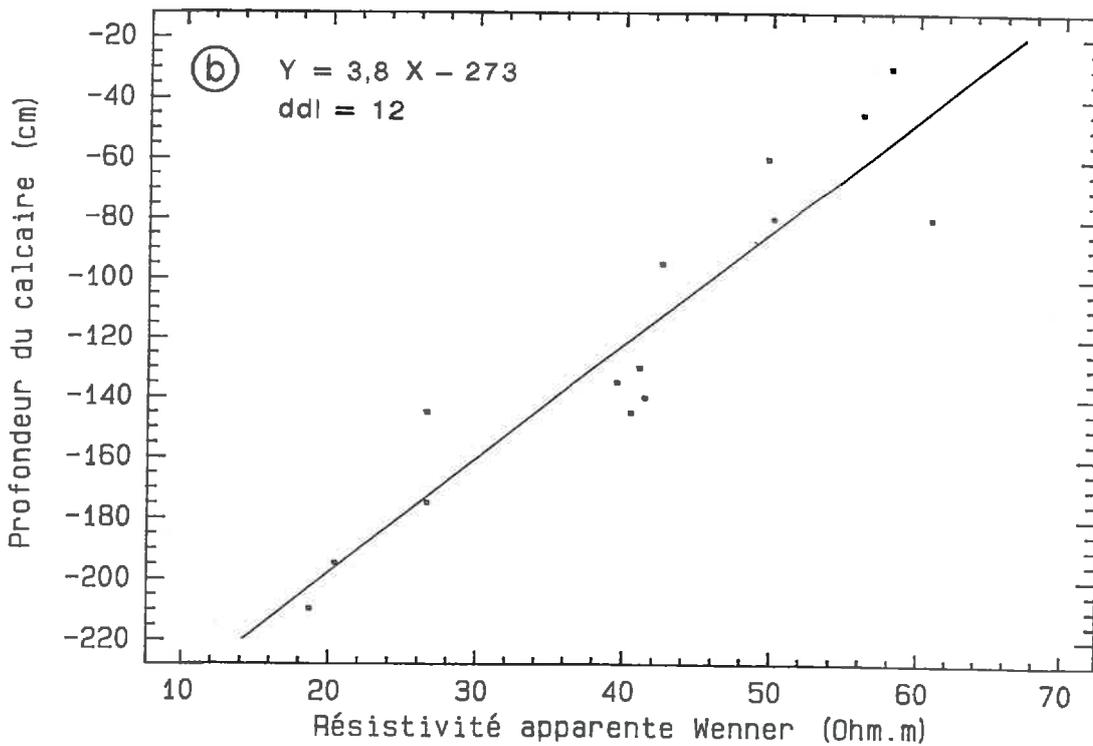


Figure 6.7b : Régression linéaire entre les résistivités apparentes Wenner et la profondeur d'apparition du calcaire sur un jeu de 14 données.

Numéro Trainé	Numéro Sondage	Distance sur le trainé (en m)	Profondeur du calcaire (en cm)	Résistivités WENNER (en Ohm.m)	Prof. calcaire calculée par (7) (cm)	Différence mes.-calc. (en cm)	Remarques
1	8	0	-80	60.88	-41.74	-38.3	
1	8	25	-80	50.14	-82.57	2.6	
1	8	50	-45	56.17	-59.65	14.7	
1	8	75	-30	58.06	-52.48	22.5	
1	8	100	-60	49.76	-84.00	24.0	
1	8	119	-145	26.58	-172.10	27.1	
1	8	120	-175	26.58	-172.10	-2.9	
1	8	125	-195	20.36	-195.74	0.7	
1	8	150	*	24.88	*	*	< -620
1	8	175	-210	18.66	-202.19	-7.8	
1	8	200	-130	41.09	-116.95	-13.0	
1	8	225	-135	39.58	-122.68	-12.3	
1	8	250	-95	42.60	-111.22	16.2	
1	8	275	-145	40.53	-119.10	-25.9	
1	8	300	-140	41.47	-115.52	-24.5	

Tableau 6.2a : Description des sondages à la tarière réalisés sur le trainé 1

2	158	0	-75	52.21	-74.69	-0.3	
2	61	75	-220	20.92	-193.60	-26.4	
2	163	158	-50	51.46	-77.55	27.6	
2	66	225	-70	62.77	-34.58	-35.4	
2	168	300	-100	53.16	-71.11	-28.9	
3	12	150	*	21.68	*	*	< -260
3	17	300	-100	61.64	-38.88	-61.1	
4	65	225	*	22.05	*	*	< -520
4	167	300	-105	44.11	-105.49	0.5	
5	159	0	-65	53.72	-68.96	4.0	
5	62	75	*	25.45	*	*	= -300
5	164	150	*	11.88	*	*	< -260
5	67	225	*	14.33	*	*	= -315
5	169	300	-225	24.88	-178.55	-46.4	
6	5	0	-35	68.80	-11.66	-23.3	
6	9	126	-210	19.98	-197.17	-12.8	
6	14	276	*	17.34	*	*	< -260
6	19	350	-135	44.67	-103.34	-31.7	
7	155	0	-40	73.51	6.25	-46.3	
7	58	75	-155	35.06	-139.87	-15.1	
7	160	150	*	22.43	*	*	< -260
7	63	225	*	14.33	*	*	< -320
7	165	300	-260	19.23	-200.03	-60.0	
7	68	375	-70	58.25	-51.77	-18.2	
7	170	450	-65	57.68	-53.92	-11.1	
8	6	0	-30	59.94	-45.33	15.3	
8	10	150	-45	62.39	-36.01	-9.0	
8	15	300	-35	66.16	-21.68	-13.3	
8	20	450	*	24.50	*	*	< -260
8	26	600	-75	53.16	-71.11	-3.9	
9	16	65	-90	62.96	-33.86	-56.1	
9	166	140	-235	15.83	-212.93	-22.1	
9	15	215	-35	70.31	-5.93	-29.1	
9	165	290	-260	18.85	-201.47	-58.5	
10	68	286	-70	64.09	-29.56	-40.4	
11	21	55	-205	15.08	-215.80	10.8	
11	20	205	*	22.24	*	*	< -260
11	170	280	-65	59.56	-46.75	-18.2	
12	161	10	-40	62.77	-34.57	-5.4	
12	64	75	-85	55.42	-62.51	-22.5	
12	166	150	-235	15.27	-215.08	-19.9	
12	69	225	-35	58.62	-50.34	15.3	
12	171	300	-190	32.04	-151.35	-38.7	
12	74	375	-130	39.02	-124.83	-5.2	

Tableau 6.2b : Description des 44 sondages de validation

Tableau 6.2 : Description des sondages à la tarière réalisés sur les profils électriques

Nous avons ensuite qualifié cette relation en utilisant un coefficient de corrélation. Avec le jeu de données dont nous disposons, ce coefficient est égal à **0,93** pour 12 degré de liberté. Il est significativement différent de 0 au niveau de probabilité $\alpha = 5\%$. Le coefficient de détermination R^2 montre que **86%** de la variance est ainsi expliquée.

Nous avons par la suite quantifié la relation entre la résistivité apparente et de la profondeur d'apparition du calcaire en utilisant les méthodes de régression linéaire. L'analyse de la variance permet de tester si la variabilité prise en compte par le modèle de régression est significative. Le test F de Fisher ($F = 76,5$) qui teste si le coefficient de régression b est nul (H_0) permet de rejeter H_0 au niveau de probabilité 1% ($\text{Prob.Level} = 0,00\% < 1\%$). Ainsi, nous ne pouvons pas rejeter le modèle théorique de régression que nous venons d'ajuster au nuage de points avec un risque de 1% d'erreur. D'autre part, l'analyse visuelle des résidus de la régression montre une répartition sans structure. Nous pouvons considérer l'analyse comme acceptable.

Ces résultats permettent donc d'établir une relation linéaire entre la résistivité apparente Wenner en Ωm et la profondeur d'apparition du calcaire en cm. Cette relation s'écrit :

$$P = 3,8 (\pm 0,4) W - 273,1 (\pm 18,5) \quad (7)$$

avec : P = Profondeur d'apparition du calcaire en cm
 W = Résistivité apparente Wenner en Ωm avec $a = 3$ m

III-1.2 Domaine de validité de la relation (7)

1°) Limite inférieure

La relation (7) a été établie en prenant en compte les sondages pour lesquels la profondeur d'apparition du calcaire était supérieure ou égale à -210 cm. Les sondages pour lesquels cette profondeur était inférieure ont été exclus du fait de la géométrie du dispositif utilisé (la configuration géométrique du dispositif utilisé - avec $a = 3$ m - ne permet pas une investigation en deçà d'une profondeur comprise entre a et $3a/4$, cf. § III-2.1). Cette exclusion a concerné notamment le sondage 150 du trainé 1 pour lequel la profondeur d'apparition du calcaire était inférieure à -620 cm (tableau 6.2a). Ainsi, nous nous sommes imposés une **limite inférieure** pour la validité de la relation (7). Nous avons fixé arbitrairement cette limite inférieure à **-260 cm** de manière à tenir compte non seulement de la configuration des électrodes mais aussi des conditions du milieu (teneur en eau) qui peuvent influencer les mesures. Cette limite inférieure représente les 4/5ème de a ($a = 3$ m).

2°) Limite supérieure

La **limite supérieure** de la relation (7) a été déterminée en considérant que les erreurs de détermination de la limite limon argileux / calcaire sous-jacent les plus importantes sont

commises dans les zones où le limon argileux est le moins épais. En effet, nous avons déjà vu que la résistivité apparente de la couche limono-argileuse pouvait être considérée comme constante (env. 35 Ωm). Par contre, celle du calcaire sous-jacent est nettement plus variable. Ainsi, pour les couches de faible épaisseur, la résistivité apparente mesurée sera nettement plus influencée par le calcaire que par le limon argileux et par conséquent nettement plus variable. Comme la résistivité du calcaire est variable, la détermination de la limite entre limon-argileux et calcaire sous-jacent sera plus difficile pour les couches peu épaisses que pour les couches d'épaisseur plus élevée. Ces remarques nous ont conduit à fixer la limite supérieure de notre relation à **-20 cm** car nous avons considéré qu'au delà de cette valeur, il n'était plus possible de distinguer par les méthodes électriques employées, la limite entre limon argileux et calcaire.

III-1.3 Validation de la relation (7)

1°) Constitution du jeu de données indépendant

Les sondages à la tarière, réalisés lors de l'échantillonnage des données utilisées en géostatistique (cf. chapitre 5), ont permis de constituer un jeu de données indépendant et régulièrement réparti sur l'ensemble de la zone de 30 ha déjà délimitée (figure 6.3). Sur chacun de ces sondages, les résistivités apparentes (mesurées avec $a = 3$ m) et la profondeur d'apparition du calcaire ont été mesurées. **44 sondages** ont été ainsi retenus pour établir la comparaison (les sondages 15, 20, 68, 165, 166 et 170 ont été doublés). Le tableau 6.2b donne, pour chacun des 44 sondages retenus, leur position sur la zone (n° du trainé) et sur le trainé (distance sur le trainé), la profondeur d'apparition du calcaire et la valeur de résistivité apparente correspondante calculée par la méthode Wenner et la méthode Dipôle-Dipôle. Sur ces 44 sondages, 10 ont été exclus du jeu de données car la profondeur d'apparition du calcaire était inférieure à -260 cm (limite inférieure fixée au § III-1.2). La comparaison entre résistivités apparentes et profondeur d'apparition du calcaire se fera donc sur un jeu de données de **34 sondages**.

2°) Résultats

Nous avons ensuite reporté dans le tableau 6.2 pour chacun de ces 34 sondages, la mesure de la résistivité apparente Wenner, la profondeur d'apparition du calcaire mesurée à la tarière et celle calculée par la relation (7). Par les méthodes de régression, nous avons alors comparé les profondeurs d'apparition du calcaire mesurées à la tarière et celles calculées par le modèle. La variable indépendante de cette régression est constituée par la profondeur mesurée à la tarière. La variable dépendante est représentée par la profondeur calculée par la relation (7) (figure 6.8a).

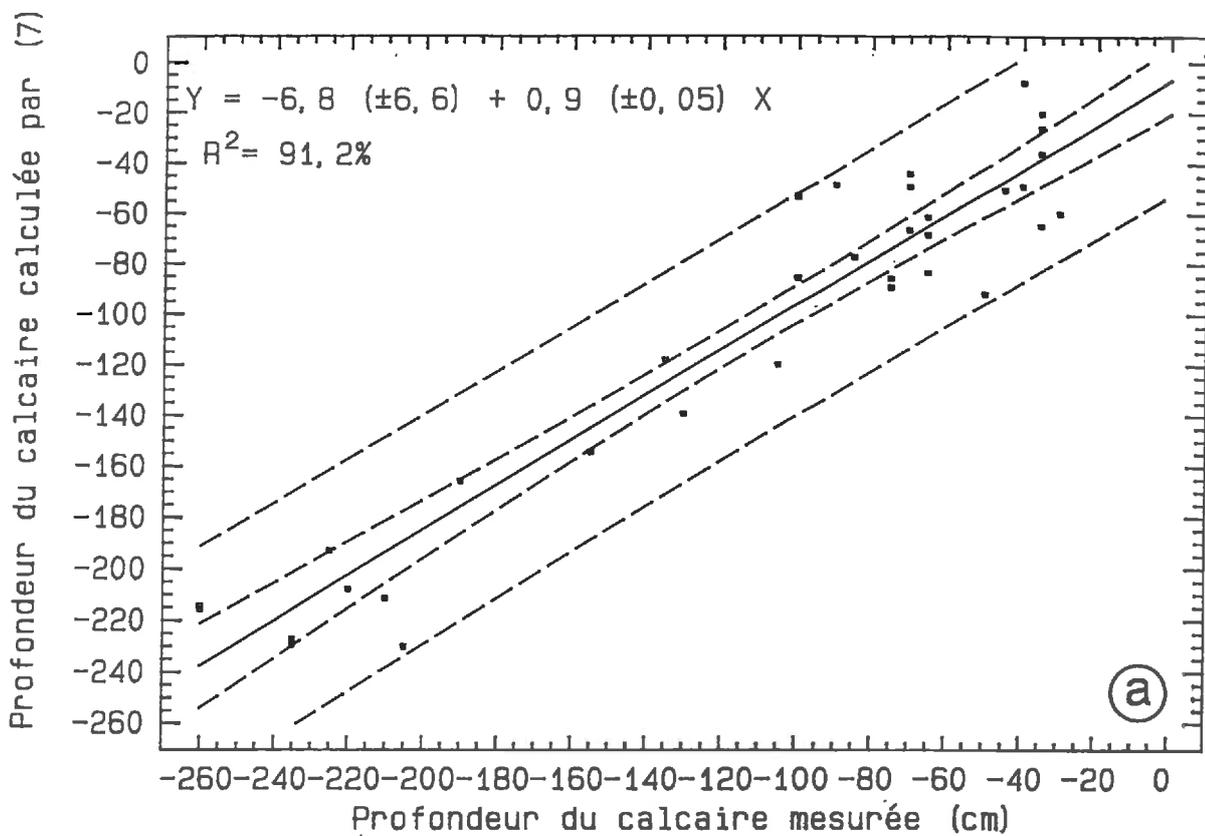


Figure 6.8a : Validation par régression linéaire entre la profondeur d'apparition du calcaire mesurée à la tarière et la profondeur d'apparition du calcaire calculée par la relation (7) sur un jeu de 34 données indépendantes.

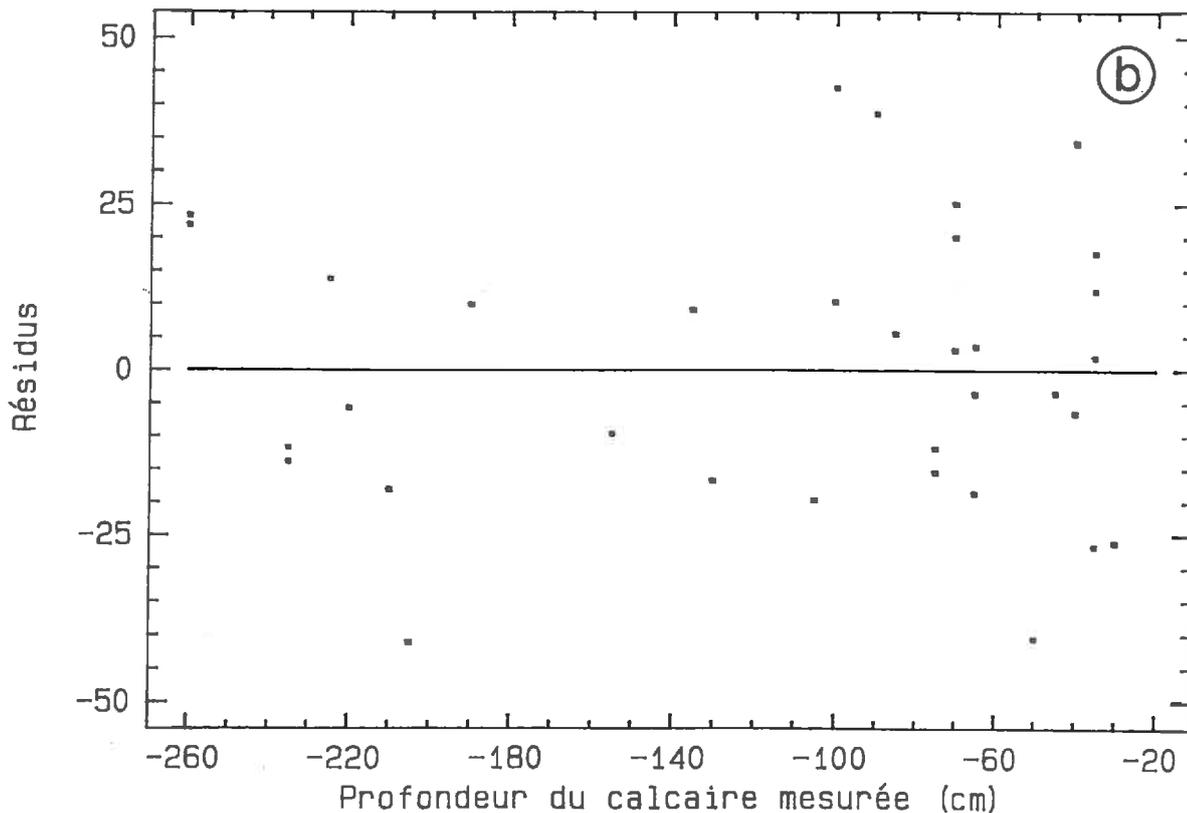


Figure 6.8b : Résidus de la régression.

L'analyse de la variance permet de tester si la variabilité prise en compte par le modèle de régression est significative. Le test F de Fisher ($F = 331,2$) teste si le coefficient de régression b est nul (H_0). Le résultat de ce test permet de rejeter H_0 au niveau de probabilité 1% (Prob.Level = 0,00% < 1%). Le modèle théorique de régression que nous venons d'ajuster au nuage de points ne peut pas être rejeté avec un risque de 1% d'erreur. De plus, l'analyse visuelle des résidus de la régression (figure 6.8b) montre une répartition sans structure apparente.

Le coefficient de corrélation de cette régression est de **0,95** pour 32 degrés de liberté. Ce coefficient est significativement différent de 0 au niveau de probabilité de 1%. La qualité globale de l'approximation de la profondeur calculée par la relation (7) est donnée par le coefficient de détermination. L'analyse de ce coefficient ($R^2 = 91,2\%$) montre une prédiction des profondeurs mesurées par les profondeurs calculées satisfaisante. Mais, pour que cette qualité reste valable hors de l'échantillon, il faut s'assurer de l'indépendance spatiale des résidus (Goulard et al., 1987).

D'autre part, pour mettre en évidence d'éventuelles sur- ou sous-estimations induites par le modèle, on considère la droite d'équation $y = x$ qui représente l'égalité des profondeurs calculées aux profondeurs mesurées et on teste si le coefficient de régression est statistiquement voisin de 1 et si l'ordonnée à l'origine est proche de 0 (cas d'un modèle théorique parfait).

Un test t de Student permet de tester si l'ordonnée à l'origine (a) de la droite de régression est nulle (H_0). Au niveau de probabilité de 5%, on ne rejette pas H_0 (Niveau Proba. = 31% > 5%). Ainsi, l'ordonnée à l'origine (a) n'est pas significativement différente de 0. Pour la droite de régression, elle est de $-6,8 \pm 6,6$. Le coefficient de régression b est égal à $0,9 \pm 0,05$. Un test permet de vérifier l'égalité de b à $b_0 = 1$ (H_0) (Tomassone, 1983) en calculant le rapport $t = |b - b_0| / \sigma_b$ et on le compare au t de Student dans une table de distribution de t pour test bilatéraux. Ce test ne permet pas de rejeter l'hypothèse H_0 au niveau de probabilité 5% ($T_{(32 / 0,025)} = 2,35 > t_{\text{calc.}} = 2,30$). La pente de la droite de régression n'est donc pas significativement différente de 1.

L'ensemble de ces résultats nous permet de conclure qu'il n'existe pas de différence significative entre les profondeurs d'apparition du calcaire calculées par la relation (7) et celles mesurées à la tarière sur un jeu de données indépendant de celui ayant servi à établir la relation (7).

III-2 Passage des résistivités apparentes aux profondeurs d'apparition du calcaire.

Dans un premier temps, la relation (7) permet, à partir de l'ensemble des données de résistivité (1402 mesures), de calculer la profondeur d'apparition du calcaire tout en respectant le domaine de variation des profondeurs que nous nous sommes fixés. Puis, dans un second temps, nous établirons la carte des isohypses du toit du calcaire sur la zone de 30 ha que nous avons délimitée.

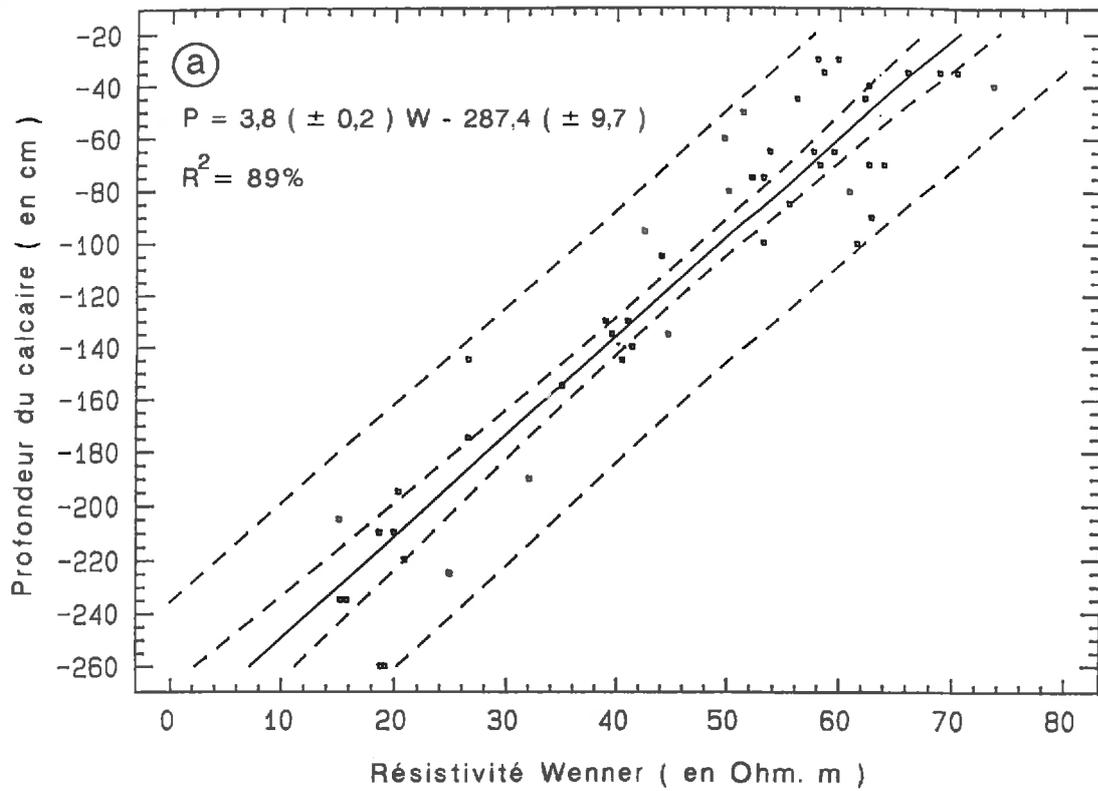


Figure 6.9a : Régression linéaire entre les résistivités apparentes Wenner et la profondeur d'apparition du calcaire sur l'ensemble du jeu de données (48 données).

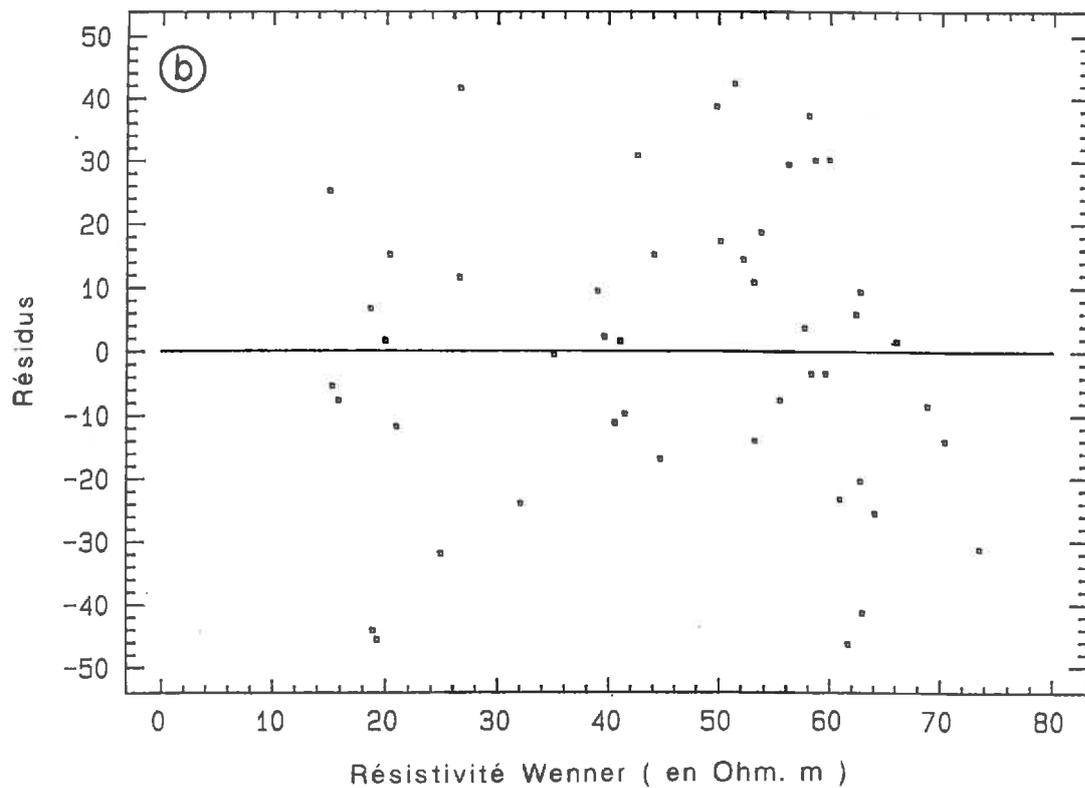


Figure 6.9b : Résidus de la régression.

III-2.1 Généralisation de la relation (7)

La relation (7) obtenue précédemment a été établie à partir du trainé électrique n°1 et ne comprend donc qu'une dizaine de mesures. De manière à établir une relation entre résistivité apparente et profondeur d'apparition du calcaire plus représentative de la zone de 30 ha sur laquelle nous avons travaillé, nous avons pris en compte l'ensemble des mesures dont nous disposons soit au total **48 sondages** pour lesquels ont été mesurés la résistivité apparente (méthode Wenner) et la profondeur d'apparition du calcaire. Par la suite, nous comparerons les relations ainsi obtenues à la relation (7) déjà validée. Ainsi, si les relations ne sont pas **statistiquement différentes**, les nouvelles relations établies seront utilisées pour évaluer la profondeur d'apparition du calcaire à l'ensemble de la zone étudiée.

La comparaison entre résistivités apparentes et profondeur d'apparition du calcaire a été réalisée à l'aide d'une régression linéaire (figure 6.9a). La variable dépendante de cette régression est constituée par la profondeur d'apparition du calcaire et la variable indépendante par les résistivités apparentes Wenner.

L'analyse de la variance permet de tester si la variabilité prise en compte par le modèle de régression est significative. Le test F de Fisher ($F = 364,3$) qui teste si le coefficient de régression b est nul (H_0) (donc que le modèle de régression n'est pas significatif) permet de rejeter H_0 au niveau de probabilité 1% (Prob. Level = $0,00\% < 1\%$). Ainsi, nous ne pouvons pas rejeter le modèle théorique de régression que nous venons d'ajuster au nuage de points avec un risque de 1% d'erreur. D'autre part, l'analyse visuelle des résidus de la régression (figure 6.9b) montre une répartition sans structure. Nous pouvons considérer l'analyse comme convenable.

Le coefficient b de cette régression est égal à $3,8 \pm 0,2$. L'ordonnée à l'origine a est de $-287,4 \pm 9,7$. Le coefficient de corrélation de cette régression est de 0,94 pour 46 degrés de liberté. Ce coefficient est significativement différent de 0 au niveau de probabilité de 5% au vu des tables de signification des coefficients de corrélation. La valeur du coefficient de détermination (R^2) montre une forte prédiction de la variable dépendante (profondeur du calcaire) par la variable indépendante (résistivité) (88,8% de la variance est expliquée).

Les résultats précédents permettent donc d'établir une **relation** linéaire entre la résistivité apparente Wenner en Ωm et la profondeur d'apparition du calcaire en cm. Cette relation s'écrit :

$$P = 3,8 (\pm 0,2) W - 287,4 (\pm 9,7) \quad (8)$$

avec : P = Profondeur d'apparition du calcaire en cm

W = Résistivité apparente Wenner en Ωm avec $a = 3$ m

Le domaine de validité de la relation (8) que nous venons d'établir est le même que celui de la relation (7), c'est-à-dire une limite inférieure fixée à **-260 cm** et une limite supérieure de **-20 cm**. L'ordonnée à l'origine $a = -287,4$ est importante car elle permet d'estimer la résistivité apparente moyenne du calcaire de Beauce en l'absence de LA ($P = 0$ $W_0 = 287 / 3,8 = 75$ m). Cette valeur de résistivité apparente, que nous avons déjà rencontrée sur les profils électriques et qui est plus faible que les valeurs généralement rencontrées pour

des calcaires, s'explique par le caractère très fragmenté de ces calcaires, plus ou moins cryoturbés et associé à une phase pulvérulente.

Les résultats de cette régression sont à comparer à ceux concernant la relation (7). Le tableau 6.3 résume les différentes relations établies entre la profondeur d'apparition du calcaire et la résistivité apparente. En comparant les coefficients a (ordonnée à l'origine de la droite de régression) et b (pente de la droite de régression) et leurs écarts-types respectifs, on constate qu'il n'existe pas de différences significatives. **Les relations (7) et (8) sont statistiquement identiques.**

	Coefficient a	Ecart-type	Coefficient b	Ecart-type	R	R ²
Relation (7)	-273,1	18,5	3,8	0,4	0,93	86,5%
Relation (8)	-287,4	9,7	3,8	0,2	0,94	88,8%

Tableau 6.3 : Comparaison des différentes relations entre la profondeur d'apparition du calcaire et la résistivité apparente.

Remarques sur la régression linéaire :

Dans un premier temps, nous avons considéré un modèle théorique bi-couche avec une couche superficielle de résistivité voisine de 35 Ωm et un substratum plus résistant de 282 Ωm. Le choix de $\rho_{LA} = 35 \Omega m$ correspond à la résistivité moyenne du LA déterminée lors de la campagne de sondages électriques. Quant à $\rho_{calc.} = 282 \Omega m$, cette valeur est comprise entre les résistivités de 100 Ωm et 400 Ωm rencontrées lors de l'interprétation de ces mêmes sondages électriques. A partir de ce modèle, nous avons calculé une courbe théorique qui donne la résistivité électrique apparente pour un quadripôle Wenner d'écartement $a = 3 m$ en fonction de l'épaisseur du LA (figure III.14 annexe 3). La courbe obtenue de cette façon n'est pas de forme linéaire contrairement au modèle que nous avons établi par régression linéaire. On remarque que pour une profondeur importante (>3 m), la résistivité tend vers 35 Ωm c'est-à-dire la résistivité vraie du LA. Pour des profondeurs qui tendent vers 0, c'est-à-dire quand le LA disparaît, la résistivité du calcaire tend vers une asymptote de 282 Ωm. Entre ces deux asymptotes, la variation n'est pas constante. De plus, si on fixe une valeur de profondeur, on obtient des valeurs de résistivités totalement différentes entre le modèle établie par régression et le modèle théorique. De ces constatations se dégagent donc deux problèmes inhérents au modèle régressif : l'amplitude des résistivités et la linéarité du modèle.

Le fait que l'on obtienne des résistivités de l'ordre de 15 Ωm est incompatible avec ce que l'on connaît des LA. En effet, nous avons déjà mis en évidence que la résistivité de ce type de matériaux était de l'ordre de 35 Ωm ± 5 Ωm. Ce résultat est classique pour tous les limons-argileux d'Europe (Tabbagh et Dabas, communication orale). Le type de résistivité obtenue fait plutôt penser à des formations plus ou moins argileuses intercalées, ce qui serait en rapport avec les formations argileuses détectées par les sondages à la tarière. Le modèle qui rendrait compte de cette succession serait alors un modèle tricouche et non bicouche comme celui utilisé. Cependant avec ce type de modèle, il y a trop de paramètres pour pouvoir tenter une modélisation théorique.

III-2.2 Carte des isohypses du toit du calcaire

Nous avons alors choisi d'utiliser la relation (8) pour établir une **carte des isohypses du toit du calcaire** sur la zone de 30 ha étudiée. Ce choix est motivé par le fait que la relation (8) a été établie avec un nombre de données plus important et avec des mesures mieux réparties sur l'ensemble des 30 ha que pour la relation (7).

Pour établir la carte des isohypses du toit du calcaire, nous avons calculé à l'aide de la relation (8) les profondeurs d'apparition du calcaire à partir de la moitié des 1402 données de résistivité apparente. L'échantillonnage de ces 701 valeurs a été réalisé en prenant une donnée sur deux, c'est-à-dire une valeur tous les 6 m. Cette façon de procéder nous a permis de répartir l'échantillonnage sur l'ensemble de la zone et de garder un **jeu de données indépendant** pour une validation ultérieure.

Rappelons, d'autre part, que nous avons fixé un domaine de validité pour la relation (8) qui est le même que celui de la relation (7), c'est-à-dire une limite inférieure pour la profondeur d'apparition du calcaire fixée à -260 cm et une limite supérieure fixée à -20 cm. Pour des profondeurs d'apparition du calcaire allant de -20 cm à -260 cm correspondent respectivement des résistivités apparentes de $7 \Omega\text{m}$ et de $70 \Omega\text{m}$. Nous obtenons ainsi, les limites inférieure et supérieure des résistivités apparentes. Nous avons donc éliminé du jeu de données initial toutes les résistivités inférieures à $7 \Omega\text{m}$ et supérieures à $70 \Omega\text{m}$.

La méthode d'interpolation que nous avons utilisée pour établir la carte des isohypses du toit du calcaire est celle du TIN (chap.1 § III-1). Pour la clarté du document, les courbes isovales inférieures à -200 cm n'ont pas été représentées. Cette carte montre, dans sa partie centrale, un net épaissement des matériaux sus-jacents au calcaire de Beauce (figure 6.10). La profondeur d'apparition du calcaire, dans cette zone, est inférieure à -200 cm. Les sondages à la tarière sur cette partie centrale ont montré que cette profondeur pouvait être inférieure à -620 cm. Remarquons que, dans la partie sud-est, il existe une autre zone sur laquelle le toit du calcaire se situe en deçà de -160 cm.

III-3 Validation à partir d'un jeu de données indépendant

La carte des isohypses du toit du calcaire a été établie en interpolant, sur l'ensemble de la zone de 30 ha, la moitié des valeurs de la profondeur du toit du calcaire calculées à l'aide de la relation (8). Les valeurs de résistivité apparente qui constituent l'autre moitié du jeu de données ont été transformées en profondeur d'apparition du calcaire à l'aide de la relation (8). Les profondeurs ainsi calculées vont être **comparées** à celles déduites de la carte des isohypses.

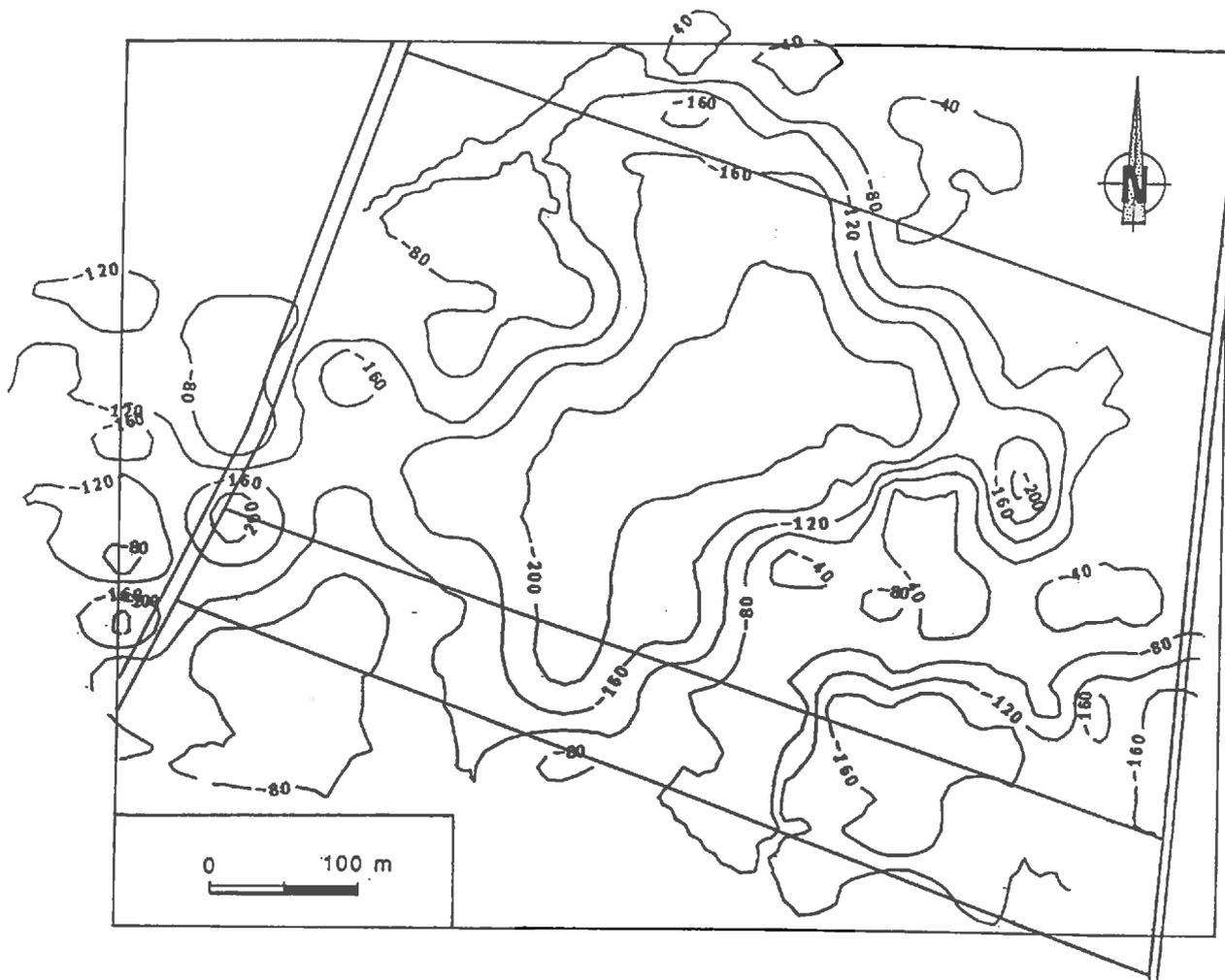


Figure 6.10 : Carte des isohypses du toit du calcaire (profondeur en cm)

Régression entre valeurs estimées et valeurs observées :

Cette comparaison se fera à l'aide d'une régression linéaire (figure 6.11a) dont les résultats seront discutés ci-dessous. Les profondeurs calculées par la relation (8) constitueront la variable indépendante de la régression. Les profondeurs estimées par l'interpolation constitueront la variable dépendante.

L'analyse de la variance permet de tester si la variabilité prise en compte par le modèle de régression est significative. Le test F de Fisher ($F = 19979$) permet de rejeter l'hypothèse que le coefficient de régression b est nul (H_0) au niveau de probabilité 1% (Prob. Level = $0,00\% < 1\%$). Ainsi, nous ne pouvons pas rejeter le modèle théorique de régression que nous venons d'ajuster au nuage de points avec un risque de 1% d'erreur. Les résidus de la régression ne montrent pas de structure apparente (figure 6.11). Le coefficient b de cette régression est égal à $0,96 \pm 0,01$. L'ordonnée à l'origine a est de $-5,5 \pm 1,1$. L'erreur standard de l'estimation est de 11,5 cm.

Le coefficient de corrélation de cette régression est de **0,985** pour 618 degrés de liberté. Ce coefficient est significativement différent de 0 au niveau de probabilité de 1%. L'analyse du coefficient de détermination (R^2) montre une forte prédiction de la variable dépendante (profondeur du calcaire estimée par interpolation) par la variable indépendante (profondeur calculée par le modèle) (**97%** de la variance est expliquée).

Quantification des écarts : test de la qualité de l'interpolation

Nous venons de mettre en évidence une forte prédiction des profondeurs du calcaire estimées par interpolation par les profondeurs calculées par le modèle. Mais il nous reste maintenant à **quantifier les écarts** entre profondeurs calculées et profondeurs estimées pour évaluer l'**erreur moyenne** commise lors de l'estimation (tableau 6.4).

	$P_{\text{calc.}}$	$P_{\text{est.}}$	$(P_{\text{est.}} - P_{\text{calc.}})$	$(P_{\text{est.}} - P_{\text{calc.}})^2$
Minimum	-247	-245	-52	0
25 ^{ème} %tile	-208	-203	-5	4
Médiane	-139	-140	-0,1	22
75 ^{ème} %tile	-77	-78	5	124
Maximum	-22	-25	54	2922
Moyenne	-141,4	-141,5	-0,1^a	138^b
Ecart-type	68	66	12	306

Tableau 6.4 : Comparaison par grandeurs statistiques des profondeurs du toit du calcaire calculées par le modèle (8) et les profondeurs estimées par l'interpolation TIN (620 données).

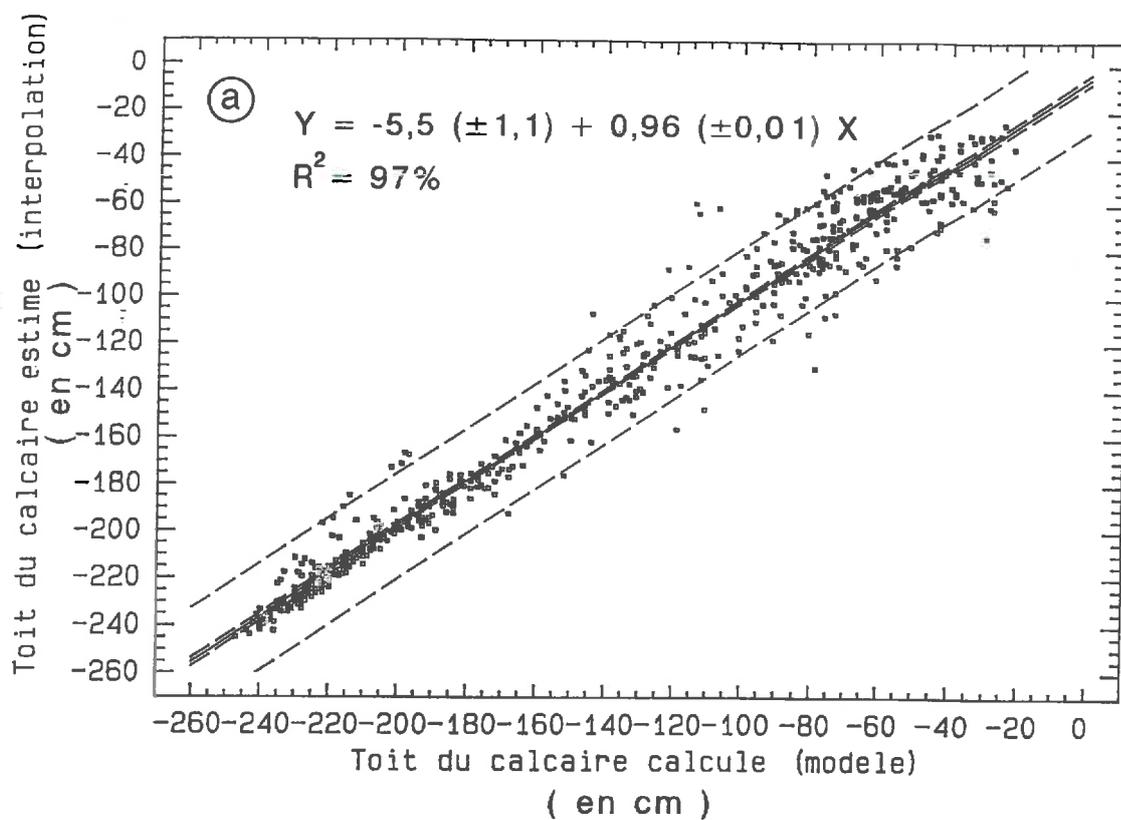


Figure 6.11a : Régression linéaire entre les profondeurs du toit du calcaire calculées par la relation (8) et celles estimées par l'interpolation au même point.

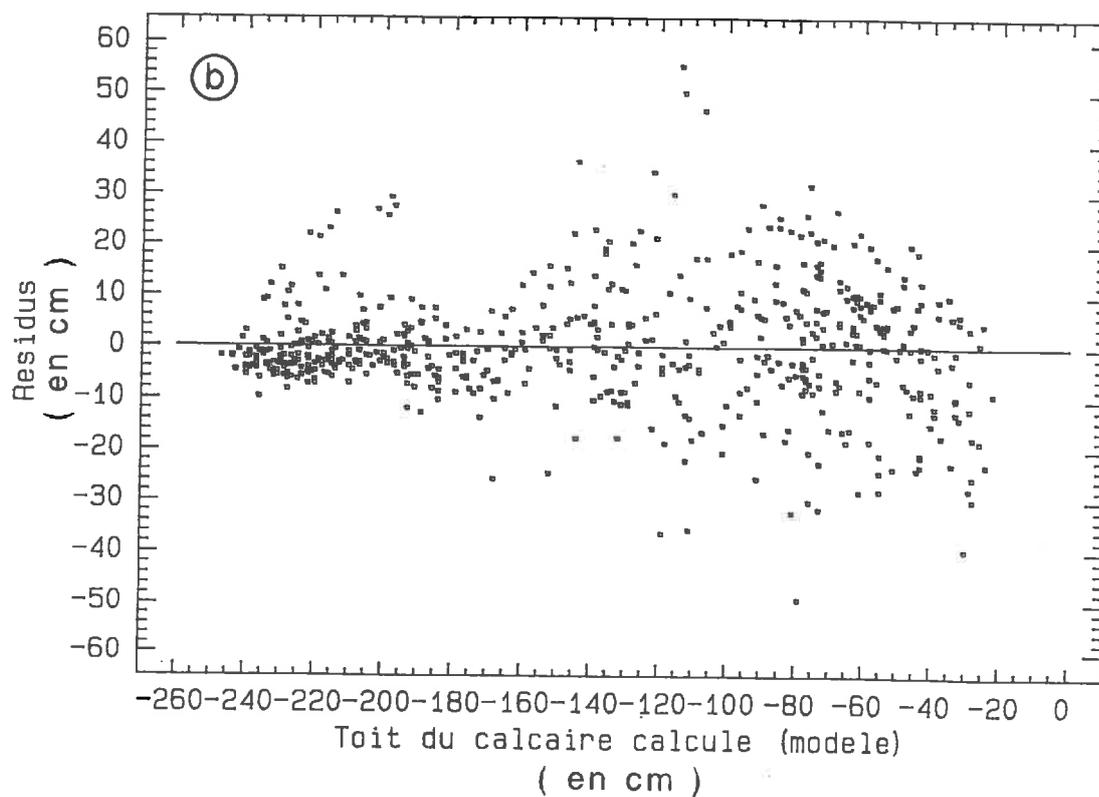


Figure 6.11b : Résidus de la régression.

On remarque, tout d'abord que les échantillons de valeurs calculées et de valeurs estimées possèdent une **distribution quasi identique** car les grandeurs statistiques qui la quantifie sont tout à fait similaires (tableau 6.4).

L'**écart moyen** entre profondeurs calculées par le modèle (8) et profondeurs estimées par l'interpolation [$a = -0,1$] **ne présente pas de biais systématique**. L'écart-type de cet écart est 12 cm).

L'**écart quadratique moyen** (b) est de 138 cm² avec $n = 620$, la racine carrée de cet EQM est de 11,7 cm. Nous pouvons en conclure que les sous- et sur-estimations restent faibles et que physiquement les erreurs commises par interpolation par la méthode TIN sont négligeable.

N.B. : Pour une meilleure compréhension, le tableau 6.5 récapitule la démarche utilisée dans le chapitre 6 pour établir et valider la carte des isohypses du toit du calcaire.

IV. CARTOGRAPHIE DES MATERIAUX ARGILO-SABLEUX

Dans le chapitre 5, l'analyse des sondages mécaniques à la tarière et des sondages électriques a permis de définir en tout point du secteur d'étude de 100 ha l'**épaisseur du LA**. Dans les paragraphes précédents de ce chapitre, nous avons évalué l'épaisseur totale des formations (sur la zone de 30 ha dans laquelle ont été mis en évidence les matériaux argilo-sableux) en réalisant une carte des **isohypses du toit du calcaire**. Nous allons maintenant, établir la **carte des matériaux argilo-sableux** intercalés entre le LA et le calcaire sur la zone de 30 ha. Cette cartographie sera réalisée en combinant au sein d'un système d'information géographique, les résultats de la campagne de sondages mécaniques et ceux de la prospection géophysique. Enfin, des sondages électriques de calage seront réalisés sur la zone de 30 ha pour permettre de vérifier les résultats obtenus et en particulier pour déterminer la **résistivité vraie des matériaux argilo-sableux**.

IV-1 Isopaches des matériaux argilo-sableux

L'évaluation de l'épaisseur des matériaux argilo-sableux a été réalisée en combinant, au sein du S.I.G. Arc/Info, la carte des isopaches du limon-argileux obtenue par krigeage et la carte des isohypses du toit du calcaire obtenue à partir des données de résistivités des trains électriques. Ainsi, nous avons calculé pour chaque point, l'**épaisseur des matériaux argilo-sableux (AS)** en soustrayant de la profondeur d'apparition du calcaire, l'épaisseur du limon argileux.

Récapitulatif de la démarche utilisée

1

Comparaison des épaisseurs du LA mesurées à partir de sondages mécaniques et de sondages électriques sur la base de 14 données (transect 1)



Relation (7)

2

Validation de la relation (7) à partir de 34 sondages à la tarière
Comparaison des épaisseurs mesurées et des épaisseurs calculée par (7)

3

Généralisation de la relation (7) en prenant en compte la totalité des données (48)
Comparaison des données mesurées à partir de sondages mécaniques et de sondages électriques



Relation (8)

4

Etablissement de la carte des isohypses du toit du calcaire à l'aide de la relation (8)
Prise en compte de la moitié des données de résistivités disponibles (701)

5

Validation de la carte des isohypses du toit du calcaire
Prise en compte de l'autre moitié des données de résistivités (701)

Tableau 6.5 : Récapitulatif de la démarche utilisée dans le chapitre 6

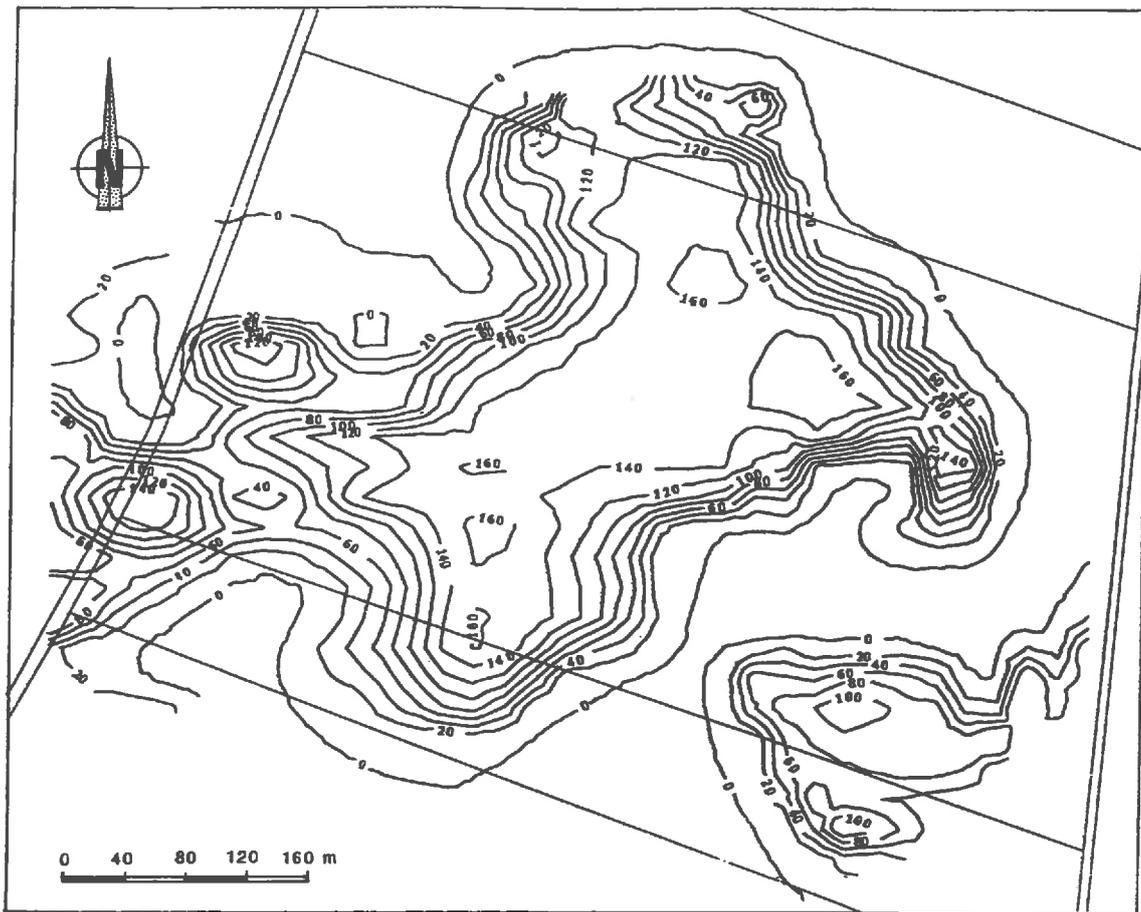


Figure 6.12 : Carte des isopaches des matériaux argilo-sableux.

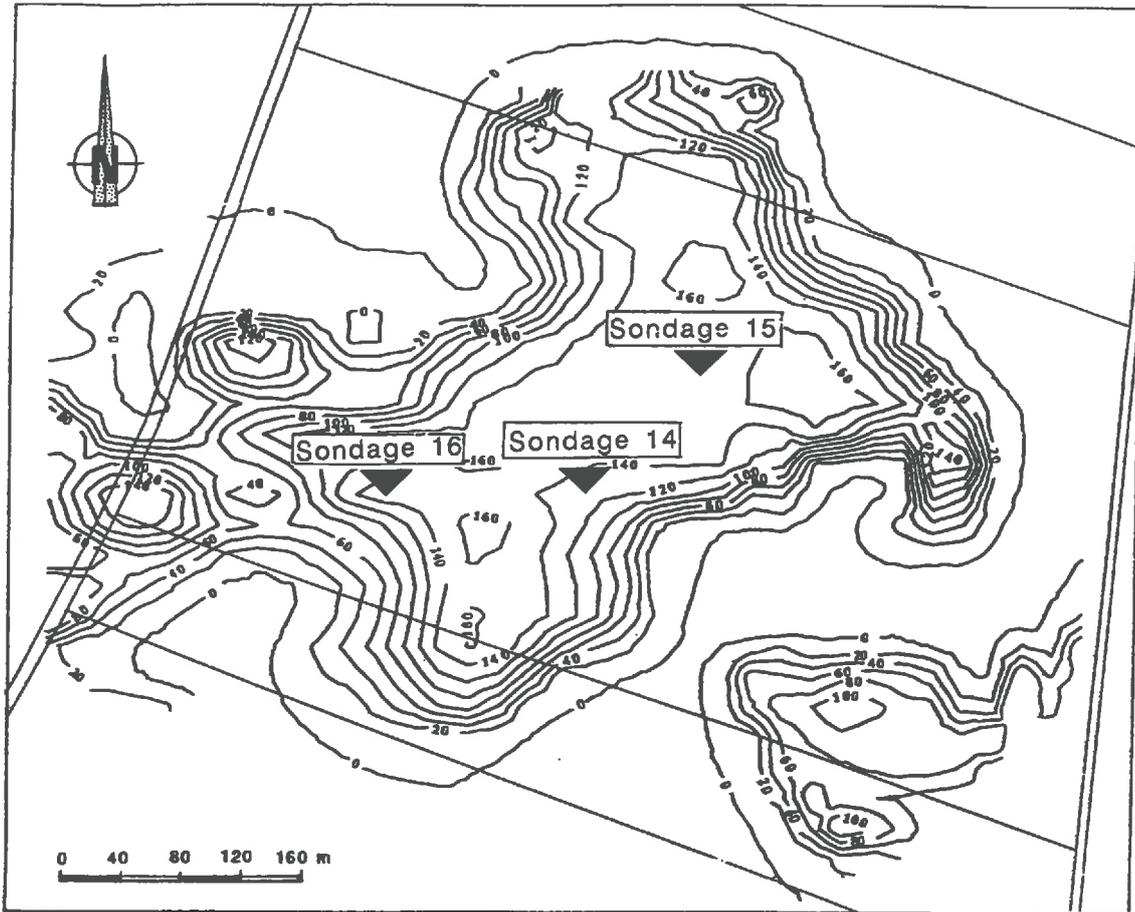


Figure 6.13 : Situation des sondages électriques de calage sur la structure argilo-sableuse la plus étendue.

Nous avons ensuite **interpolé** cette nouvelle variable en utilisant la méthode TIN pour établir la carte des **isopaques des matériaux argilo-sableux** (figure 6.12). Cette carte montre la présence de **deux structures** renfermant ces matériaux argilo-sableux. La première structure, la plus étendue, révèle dans sa partie centrale des épaisseurs élevées de matériaux AS (> à 1,6 m) comme le révélait la carte des isohypses du toit du calcaire. La seconde structure est plus réduite et révèle des épaisseurs plus faibles de matériaux AS (jusqu'à 1 m). L'intérêt de cette carte est double :

- elle précise l'**extension latérale** des matériaux argilo-sableux en suivant l'**isopaque 0**. Ceci n'était pas possible avec les cartes établies précédemment.
- et, d'autre part, elle renseigne sur l'**extension verticale** de ces matériaux.

Cependant, il faut garder à l'esprit que ce document final a été établie à partir de la carte des isohypses du toit du calcaire et de la carte des isopaques du LA. Si sur la première carte, les erreurs réalisées peuvent être considérée comme faibles (environ 12 cm), il en va tout autrement de la carte des isopaques du LA. Il faut en effet rappeler que la méthode d'interpolation choisie (krigeage) donne une précision moyenne de la réestimation de l'ordre 21 cm lors du test de validation croisée. Ainsi, **la fiabilité du document final sera au plus égale à celle du document le moins fiable c'est-à-dire la carte des isopaques du LA.**

IV-2 Sondages électriques de calage sur la structure la plus étendue

De manière à confirmer la présence et l'extension verticale maximale des matériaux argilo-sableux sur la zone considérée, nous avons réalisé **3 sondages électriques de calage** (doublés par des sondages à la tarière) sur la structure mise en évidence par les trainés électriques (figure 6.13). Ces sondages vont nous permettre par inversion d'obtenir les **résistivités vraies** des différentes formations et en particulier de la formation argilo-sableuse pour laquelle nous n'avions que des résistivités apparentes.

Sondages	14	15	16
ρ_1 (Ωm)	50,6	-	-
e_1 (m)	0,3	-	-
ρ_2 (Ωm)	27	45,7	45,4
e_2 (m)	0,2	0,6	0,6
ρ_3 (Ωm)	14	10,4	9,8
e_3 (m)	0,6	5	7,3
ρ_4 (Ωm)	77	158	208

Tableau 6.6: Interprétation des sondages électriques effectués sur la structure.

Trois sondages électriques ont été effectués (sondages notés A, B et C sur la figure 6.3). Les résultats de ces sondages (tableau 6.5) montrent la présence de **trois couches** : ρ_2-e_2 , ρ_3-e_3 et ρ_4-e_4 , la couche ρ_1-e_1 du sondage 14 n'étant que la conséquence d'une réhumectation superficielle de la couche supérieure. Ces couches, successivement notées 1 pour la couche ρ_2-e_2 , 2 pour la couche ρ_3-e_3 , et 3 pour la couche ρ_4-e_4 , sont nettement définies par des résistivités moyennes de 42 Ωm pour la couche 1, de 11 Ωm pour la couche 2 et de résistivité beaucoup plus variable (de 77 à 208 Ωm) pour la couche 3.

Le tableau 6.6 présente les valeurs d'épaisseur du limon-argileux (LA) et des matériaux argilo-sableux (AS) mesurées par sondages à la tarière et celles obtenues par inversion des sondages électriques au même point.

Sondages	14E	14T	15E	15T	16E	16T
Epais LA (m)	0,5	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6
Epais AS (m)	0,6	0,6	5,0	> 3,5	7,3	> 5,6
Calcaire à (m)	-1,1	-1,2	-5,6	<-4,2	-7,9	<-6,2

Tableau 6.7 : Comparaison des épaisseurs obtenues par sondages à la tarière (T) et par sondages électriques (E).

Cette comparaison permet de faire correspondre la couche 1 de résistivité moyenne 42 Ωm au **limon-argileux**, la couche 2 de résistivité moyenne 11 Ωm aux **matériaux argilo-sableux** et la couche 3 de résistivité variable au **calcaire de Beauce**. Notons que l'évaluation de l'épaisseur des formations par sondages à la tarière n'a pu être réalisé en deçà de -6,20 m. Ces résultats confirment la présence des matériaux argilo-sableux ainsi que leur extension verticale sur la zone de 30 ha et permettent surtout de préciser la résistivité vraie des matériaux argilo-sableux pour une automatisation ultérieure des mesures de résistivités.

V. CONCLUSION DU CHAPITRE 6

L'objectif de ce chapitre était de préciser l'**extension latérale et verticale des matériaux argilo-sableux** mis en évidence lors de l'étude des sols du secteur. Mais du fait de l'intercalation de ces matériaux entre le LA et le calcaire de Beauce, de leur hétérogénéité importante et de leur épaisseur par endroit élevée (> 6,2 m), les méthodes d'investigation par

sondages à la tarière et la méthode d'interpolation par krigeage ne pouvaient être utilisés directement. La démarche employée a consisté à déterminer à l'aide de **méthodes de prospection électrique** le toit de la formation calcaire sous-jacente et de soustraire l'épaisseur des formations limono-argileuses que nous avons déterminée par krigeage au chapitre 5. La carte en isovalues ainsi obtenue a permis de mettre en évidence **deux structures** dans lesquelles on rencontre les matériaux AS. Toutefois, une validation de terrain concernant ce document serait nécessaire car **l'intervalle de confiance des estimations cartographiques reste important** du fait de la précision moindre de la cartographie de l'épaisseur du LA par rapport à celle des isohypses du toit du calcaire.

Nous avons ensuite réalisé des sondages électriques sur la structure pour confirmer les résultats obtenus. Ces sondages ont, en outre, révélé la **résistivité vraie moyenne** des matériaux argilo-sableux qui est de 11 Ωm pour la période de mesure considérée. Malgré leur hétérogénéité, la valeur de résistivité vraie des matériaux AS est vraisemblablement due à la présence de **niveaux argileux saturés d'eau** et par conséquent très conducteur.

L'ensemble des résultats des chapitres 3 (analyses et coupe dans les matériaux AS) et 6 montre que les matériaux argilo-sableux sont des **matériaux de remplissage de dépressions d'origine karstique** et que les deux structures mises en évidence par la prospection électrique sont des **karsts**. Cette hypothèse est confirmée par le fait que de telles structures ont été décrites par Gigot (1973) près de Villeneuve/Conie à 2 km à l'Est du secteur d'étude.

Troisième Partie

Fonctionnement Hydrique Hivernal de la Couverture de Sol

TERMES DU BILAN HYDRIQUE ET BILAN

L'objectif de ce chapitre est d'établir un **bilan hydrique décadaire** de façon à calculer les quantités d'eau qui s'infiltreront à la **base de la couverture limono-argileuse** au cours de la **période hivernale** (du 1/10 au 31/03). Ce bilan tiendra compte principalement de l'**épaisseur** de la couverture de sol, de l'**état hydrique initial** du sol, de l'**occupation du sol** et des **conditions climatiques**. Ce bilan sera effectué pour les deux hivers 91-92 et 92-93.

Nous allons, dans un premier temps, analyser et discuter les variables climatiques nécessaires au calcul du bilan. Dans un deuxième temps, nous définirons les conditions initiales et finales qui seront alors calculées en discutant de l'influence de l'occupation du sol, des antécédents cultureux et de l'épaisseur de la couverture de sol sur ces conditions. Ensuite, une fois les termes du bilan posés, nous calculerons par **décades** les quantités d'eau qui se sont infiltrées à la base du LA pour établir une **carte des quantités d'eau percolées** à la fin des deux hivers étudiés.

Année 90-91

Mois et Décade	Pluie (mm)	ETP (mm)	ETRnu (mm)	ETRblé (mm)
10-1	2.1	18.2	13.4	13.4
10-2	7.3	18.3	7.7	7.7
10-3	55.6	14.7	12.7	12.7
11-1	10.9	5.0	5.0	4.5
11-2	25.4	6.9	6.0	6.0
11-3	10.5	2.7	2.0	2.0
12-1	2.9	3.0	3.0	3.0
12-2	10.2	4.0	4.0	4.0
12-3	27.1	2.9	2.0	2.0
01-1	49.9	6.7	6.0	6.0
01-2	8.3	5.0	5.0	5.0
01-3	1.2	3.3	3.0	3.0
02-1	3.8	2.8	2.0	2.0
02-2	13.8	3.2	3.0	3.0
02-3	4.4	6.0	6.0	6.0
03-1	14.3	14.1	12.7	14.0
03-2	11.7	18.3	11.9	18.0
03-3	21.6	21.3	13.8	21.0
Total	281	156.4	119.2 76.2%	133.3 85.2%

Année 91-92

Mois et Décade	Pluie (mm)	ETP (mm)	ETRnu (mm)	ETRblé (mm)
10-1	8.7	14.4	12.7	12.7
10-2	20.8	12	12.0	12.0
10-3	6.6	5.7	5.0	5.0
11-1	13.2	5.6	5.0	4.5
11-2	39.8	3.5	3.0	3.0
11-3	0	2	2.0	2.0
12-1	0	1.6	1.0	1.0
12-2	12	2.1	2.0	2.0
12-3	0.5	0.8	0.0	0.0
01-1	5.6	0.9	0.0	0.0
01-2	1.2	1.3	1.0	1.0
01-3	0	3.9	3.0	3.0
02-1	8	2.8	2.0	2.0
02-2	12.5	3.2	3.0	3.0
02-3	0	5.1	5.0	5.0
03-1	4.5	15.7	9.5	15.0
03-2	2.9	18.6	3.0	14.2
03-3	30.6	20	13.6	20.0
Total	166.9	119.2	82.8 69.5%	105.4 88.4%

Année 92-93

Mois et Décade	Pluie (mm)	ETP (mm)	ETRnu (mm)	ETRblé (mm)
10-1	20.7	10.7	10.0	10.0
10-2	2.1	9.9	5.3	5.3
10-3	19.2	8.7	8.0	8.0
11-1	26.8	3.7	3.0	2.7
11-2	41.7	5	5.0	5.0
11-3	13.1	3.7	3.0	3.0
12-1	59	3.9	3.0	3.0
12-2	5.5	4.5	4.0	4.0
12-3	2.4	1.7	1.0	1.0
01-1	6.8	1.8	1.0	1.0
01-2	35.9	6.2	6.0	6.0
01-3	13.8	4.2	4.0	4.0
02-1	0.8	2.2	2.0	2.0
02-2	0.6	3.5	3.0	3.0
02-3	23.3	5.8	5.0	5.0
03-1	0	11	8.1	11.0
03-2	0	17.9	1.7	12.4
03-3	8.2	20.1	7.5	18.6
Total	279.9	124.5	80.6 64.7%	105 84.3%

Année 93-94

Mois et Décade	Pluie (mm)	ETP (mm)	ETRnu (mm)	ETRblé (mm)
10-1	43.0	15.3	13.0	13.0
10-2	30.5	13.0	12.5	12.5
10-3	4.6	11.2	5.2	5.2
11-1	7.7	5.8	5.0	4.5
11-2	2.8	5.5	3.2	4.0
11-3	10.0	2.7	2.0	2.0
12-1	10.5	4.0	4.0	4.0
12-2	25.7	5.5	5.0	5.0
12-3	26.3	3.9	3.0	3.0
01-1	43.6	4.3	4.0	4.0
01-2	11.5	2.4	2.0	2.0
01-3	7.5	5.1	5.0	5.0
02-1	44.4	3.4	3.0	3.0
02-2	23.8	4.0	4.0	4.0
02-3	16.3	7.0	7.0	7.0
03-1	8.4	13.3	12.5	13.0
03-2	5.8	16.4	6.6	16.0
03-3	17.4	24.4	14.2	24.0
Total	339.8	147.2	111.2 75.5%	131.2 89.1%

Tableau 7.1 : Pluies, ETP (Penman) et ETR (BYM) hivernales et par décade de 90 à 94

n.b. : ETRnu = ETR évaluée sur sol nu
 ETRblé = ETR évaluée sur sol emblavé

I. ANALYSE DES VARIABLES CLIMATIQUES

I-1 Pluviométrie hivernale décadaire

Pour l'étude des bilans hydriques, nous avons choisi d'analyser les moyennes pluviométriques hivernales par décade pour la période comprise entre octobre et mars pour les années 1990 à 1994. Les mesures sont enregistrées à la station d'Orléans-Bricy.

Le tableau 7.1 regroupe les valeurs décadaires des précipitations pour la période hivernale des années 90 à 94. Les précipitations totales pour la période considérée sont respectivement de 281 mm pour l'hiver 90-91, 167 mm en 91-92, 280 mm en 92-93 et 340 mm pour l'hiver 93-94. Si l'on considère la normale pour cette période établie sur 40 ans (chronique 46-86, cf. partie I), elle est de 318 mm. Ainsi, on constate que les hivers 90-91 et 92-93 sont **déficitaires** d'environ **40 mm**, que l'hiver 91-92 est **très largement déficitaire (150 mm de déficit)** et que l'hiver 93-94 se situe au dessus de la normale avec un **excédent de 20 mm**. Les histogrammes des pluies montrent en détail la répartition des pluies par décade (figures 7.1).

I-2 Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'**évapotranspiration potentielle** est une grandeur climatique qui définit le pouvoir évaporant de l'atmosphère (cf. chapitre 2). Rappelons que les valeurs d'ETP données par la station d'Orléans-Bricy (en mm) sont calculées par la formule de **Penman** qui possède, entre autres avantages, celui d'être bien adaptée aux intervalles de temps de l'ordre de la décade. Notons que l'ETP peut être considérée comme peu variable dans l'espace à un moment donné (Leenhardt, 1991).

Le tableau 7.1 rassemble les valeurs de l'ETP Penman pour la période hivernale des années 90 à 94. Ces valeurs sont comprises entre **142 mm** (hiver 93-94) et **150 mm** (hiver 90-91). Les histogrammes des valeurs d'ETP montrent généralement de faibles valeurs en décembre et janvier et une augmentation très nette au mois de mars (figure 7.2).

I-3 Evapotranspiration réelle (ETR)

L'**ETR** est la quantité d'eau réellement perdue sous forme de vapeur d'eau par une surface ou un couvert végétal (Pérarnaud et Raynal, 1991). Elle dépend de la culture considérée, du stade phénologique de cette culture, de la réserve en eau du sol (et par conséquent du type de sol) et des conditions météorologiques observées et en particulier de l'ETP. D'autre part, l'évapotranspiration réelle d'une culture peut être affectée par l'état de son

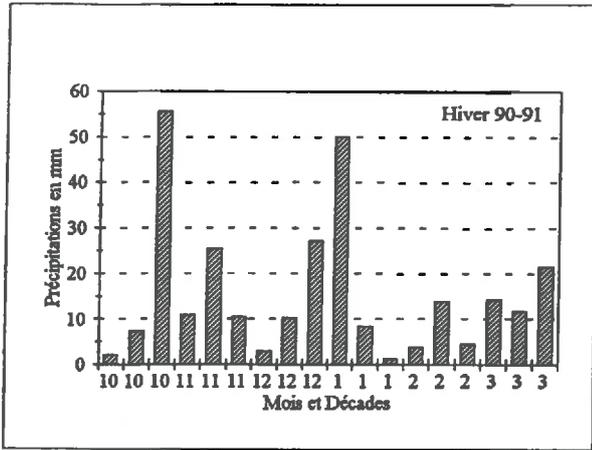


Figure 7.1a : Précipitations hivernales par décades en 90-91

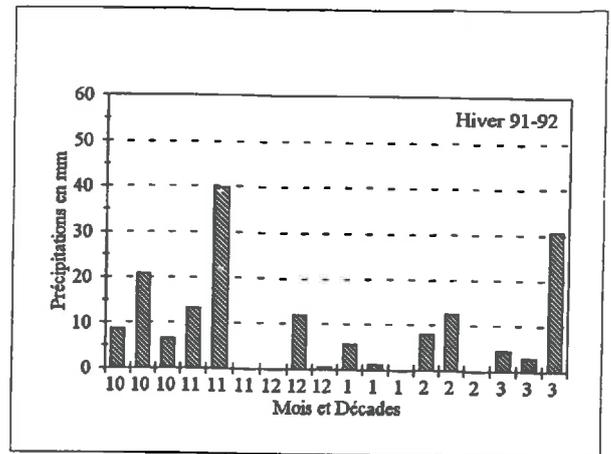


Figure 7.1b : Précipitations hivernales par décades en 91-92

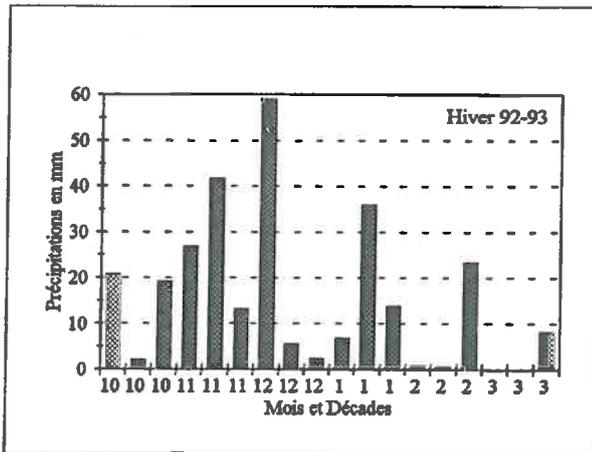


Figure 7.1c : Précipitations hivernales par décades en 92-93

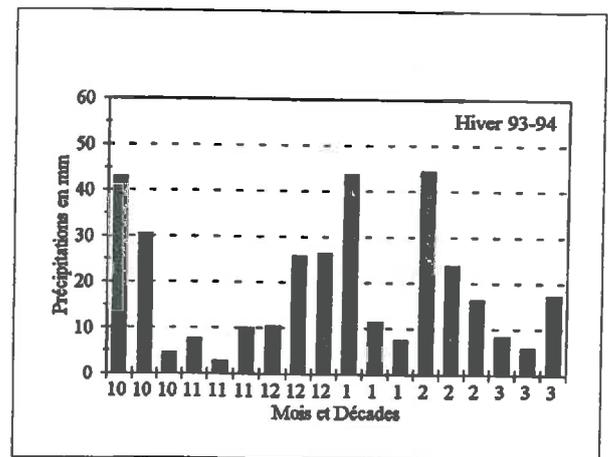


Figure 7.1d : Précipitations hivernales par décades en 93-94

Figure 7.1 : Histogrammes des précipitations hivernales par décades de 90 à 94

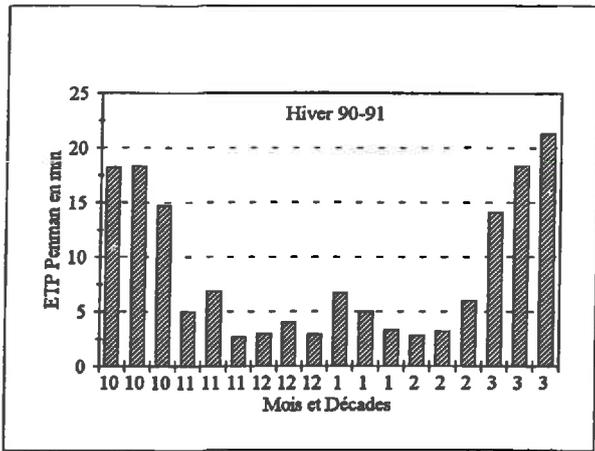


Figure 7.2a : ETP par décade en 90-91

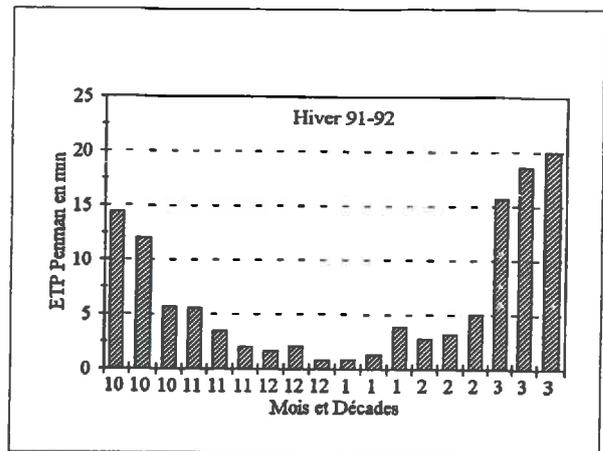


Figure 7.2b : ETP par décade en 91-92

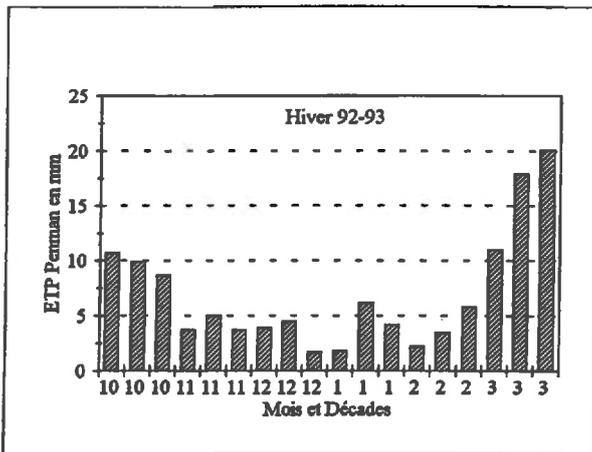


Figure 7.2c : ETP par décade en 92-93

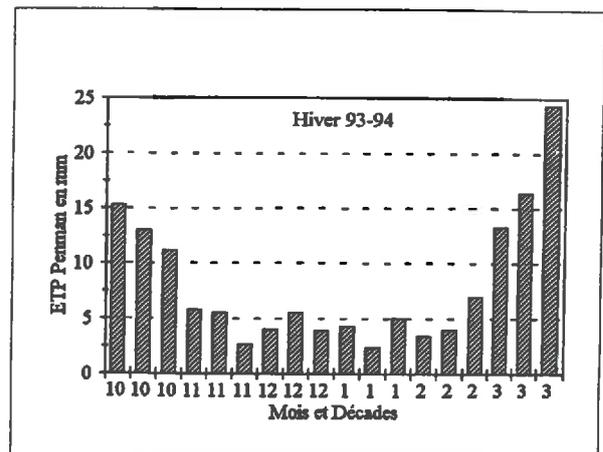


Figure 7.2d : ETP par décade en 93-94

Figure 7.2 : Histogrammes de l'ETP hivernale par décades de 90 à 94

système aérien et racinaire et par son stade de développement physiologique (croissance active, floraison, maturation). Ces paramètres biologiques **influencent très sensiblement** l'ETR et ceci plus ou moins indépendamment de l'état hydrique du sol. Il est difficile de tenir compte explicitement de tous ces facteurs. Les agronomes ont alors défini des **indices** permettant de rendre compte des différents stades de croissance d'une plante pour ajuster au mieux l'ETR aux conditions réelles de croissance de chaque plante. Ainsi, l'**indice foliaire** quantifie le développement du système aérien et l'indice racinaire le développement du système racinaire. D'autre part, on tient compte également des éventuels stress que la plante considérée pourrait subir et notamment les **stress hydriques** ou les anomalies de croissance. L'ensemble des données relatives au développement de la plante peut être résumé sous la forme d'un facteur appelé "**coefficient cultural**".

On distingue généralement deux groupes de modèles permettant le calcul de l'ETR. Des modèles établis à partir du **bilan énergétique** au niveau de la surface et des modèles prenant en compte une **ETP de référence**. Les modèles appartenant au premier groupe ne sont utilisables que si l'on connaît de nombreuses variables climatiques qui ne sont mesurées que ponctuellement dans l'espace. En revanche, les modèles appartenant au second groupe sont plus facilement accessibles, car ils ne requièrent que la connaissance d'une ETP de référence. Plusieurs méthodes d'évaluation de l'ETR ont ainsi été développées. Il existe notamment de nombreux modèles qui permettent le calcul de l'évaporation réelle (ER) à partir d'une évaporation potentielle (EP) (Ritchie, 1972 ; Perrier, 1982 ; Stockle et Campbell, 1985 *in* Leenhardt, 1991). La relation permettant ce calcul est soit une fonction (relation linéaire ou exponentielle), soit basée sur l'existence de deux phases d'évaporation distinctes dans le temps (ETR = ETP et ETR < ETP) (Hillel, 1988). **La durée de ces deux phases dépend du type de sol, de sa texture et de sa conductivité hydraulique.**

Pour rendre compte des variations de l'ETR sur le secteur d'étude, nous avons choisi d'utiliser le modèle **BYM** Version 1.2 (Brisson et Ripoche, 1991). Ce modèle est basé sur l'existence des deux phases précédemment décrites. Lors de la première phase, dite phase constante, l'évaporation réelle (ER) est égale à l'évaporation potentielle théorique (EP) ; c'est ainsi que ER = EP tant que $\Sigma ER < U$ (U : constante empirique dépendante du type de sol (Ritchie, 1972)). Quand $\Sigma ER = U$ (phase dite de réduction : ER < EP), Perrier (1973, 1982) propose une formule reliant l'évaporation cumulée au cours de la phase de réduction et l'évaporation potentielle :

$$\sum ER = \sqrt{2A \sum EP + A^2} - A$$

avec :

$A = \frac{1}{2} A_{\text{clim.}} \times A_{\text{sol}}$ (paramètre déterminé en fonction des conditions atmosphériques et du type de sol)

Ce modèle peut être exprimé comme le produit de deux composantes. La première composante ($A_{\text{clim.}}$) est d'ordre climatique, la vitesse du vent traduisant l'essentiel de sa variabilité (Brisson et Perrier, 1991). La

seconde composante (A_{sol}) est d'ordre **pédologique** et les **teneurs en eau volumiques initiale** (θ_0) et du **sol sec** (θ_r) constituent la part majeure de sa variabilité.

Lorsque le cumul de l'évaporation atteint le seuil U , il se crée un mulch et débute alors la phase de réduction. Ainsi, si un apport d'eau survient pendant la phase de réduction, et que le dessèchement pendant cette phase est faible, cet apport contribuera à la recharge du réservoir. Par contre, si ce dessèchement est plus élevé, l'apport d'eau entraîne la formation d'un réservoir superficiel qui tendra à terme à disparaître, soit par évaporation, soit par remplissage si l'apport d'eau est vraiment important (Brisson, 1989).

Le modèle BYM réalise donc un bilan de masse au niveau du mulch et considère que la quantité d'eau évaporée est fonction de l'épaisseur de ce mulch. Le formalisme et la description des différents paramètres de ce modèle sont détaillés par Brisson et Perrier (1991), Brisson *et al.* (1992), et Perrier (1973 et 1982).

Dans notre étude, l'évaluation de l'ETR se fera, comme pour l'ETP, pendant la période hivernale de début octobre à fin mars. Le modèle BYM nécessite l'évaluation de paramètres d'ordre climatique, agronomique et pédologique.

I-3.1 Evaluation de l'ETR par décade dans le cas d'un sol nu

1°) Paramètres climatiques

Les paramètres climatiques utilisés pour la détermination de l'ETR sont ceux mesurés à la station d'Orléans-Bricy (tableaux IV.1a, b et c annexe 4). Les paramètres employés pour la simulation sur **sol nu** sont : les **précipitations** (en mm) et l'**ETP Penman** (en mm) mesurés par décade ainsi que la **vitesse du vent moyenne** évaluée sur la période hivernale étudiée (hivers 90-91, 91-92, 92-93 et 93-94) (tableau 7.2).

Hivers	1990-1991	1991-1992	1992-1993	1993-1994
Vitesse du vent moyenne	4,6 m/s	4,4 m/s	4,6 m/s	5 m/s

Tableau 7.2 : Vitesses moyennes du vent prises en compte dans le calcul de l'ETR

2°) Paramètres du sol

Les paramètres du sol nécessaires au calcul de l'ETR par le modèle BYM sont le **pourcentage moyen d'argile**, la **densité apparente** du sol (en g/cm^3), la **teneur en eau**

volumique à la capacité au champ et à pF 4,2 (en mm/cm), la profondeur utile du sol (en cm) et enfin la teneur en eau volumique du sol au départ de la simulation.

Dans le contexte de notre étude, nous avons estimé la densité apparente comme égale 1,4 g/cm³ dans le LA. Cette valeur de densité apparente a été fréquemment rencontrée sur le secteur d'étude et sur le site des Sapins Dousset (Ould-Mohamed, 1991). La teneur en eau volumique à la capacité au champ ($W_{cc\text{vol.}}$) et la teneur en eau volumique du sol au moment du départ de la simulation (R_0) ont été calculées à partir de mesures de teneur en eau effectuées sur les échantillons prélevés lors des sondages à la tarière uniformément répartis sur le secteur (cf. chapitre 5). Dans notre étude $W_{cc\text{vol.}} = 3,5$ mm/cm et $R_0 = 2,5$ mm/cm. La teneur en eau volumique à pF 4,2 a été mesurée sur mottes issues des fosses A et C. Elle est égale à : $W_{pF4,2\text{vol.}} = 1,7$ mm/cm.

Les échantillons sur lesquels ces mesures ont été effectuées sont des mottes de terre issues des différents horizons des fosses A et C décrites dans la deuxième partie. Les échantillons ont été prélevés dans les horizons limono-argileux des fosses A et C (horizons Ls et SCi). Ces échantillons ont été prélevés à une teneur en eau proche de la capacité au champ et ont été stockés dans des boîtes hermétiques avant d'être soumis au laboratoire à des valeurs de pressions croissantes comprises entre 1 kPa (pF 1) et 1600 kPa (pF 4,2). L'appareil utilisé est proche de la conception de celui mis au point par Richards (1947). Une pâte de kaolinite permet d'établir une bonne continuité entre les mottes et la membrane (cf. dispositif utilisé par Tessier et Berrier, 1979). Pour chaque valeur de pression et après équilibre, la teneur en eau et le volume massique sont déterminés par la méthode proposées par Monnier et al. (1973). Les valeurs obtenues sont calculées sur un nombre de mottes variant généralement entre 6 et 12.

En prenant en compte les résultats du chapitre 3 concernant les analyses granulométriques, nous avons considéré le pourcentage moyen d'argile comme étant de 31% pour les 50 premiers centimètres de sol et de 37% au delà. D'autre part, nous avons choisi de faire varier la profondeur utile dans le modèle BYM. Ainsi, nous avons calculé l'ETR pour des profondeurs utiles de 20, 40, 60, 80 et 100 cm. Le tableau 7.3 résume les différents paramètres retenus pour le calcul de l'ETR pendant la période hivernale et pour les 4 années concernées.

Epaisseur (cm)	20	40	60	80	100
Argile (%)	31	31	37	37	37
$D_{app.}$ (g/cm ³)	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
$W_{pF4,2\text{vol.}}$ (mm/cm)	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
$W_{cc\text{vol.}}$ (mm/cm)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

Tableau 7.3 : Paramètres du sol retenus pour le calcul de l'ETR

3°) Résultats

Les résultats obtenus avec le modèle BYM sur sol nu ont été rassemblés dans le tableau 7.1. Il est important de noter que les distinctions effectuées concernant le pourcentage d'argile et les profondeurs utiles n'ont donné aucune différence dans les valeurs d'ETR.

I-3.2 Evaluation de l'ETR par décade dans le cas d'un sol emblavé

Dans un deuxième temps, nous avons évalué l'ETR en considérant le sol comme **emblavée** (cultivé en céréales d'hiver). Dans ce cas, les paramètres climatiques et pédologiques n'ont pas changé. Seuls les paramètres agronomiques doivent être estimés pour le calcul de l'ETR par décade. Ces paramètres sont les **indices foliaires (LAI)** évalués par décade et les dates des différents stades phénologiques du blé. L'estimation des indices foliaires (LAI) a été réalisée à partir du programme GOA (Brisson *et al.*, 1992 ; Nicoullaud *et al.*, 1992).

L'utilisation du modèle BYM nécessite la connaissance des différents stades phénologiques du blé, à savoir : la décade moyenne des semis, la décade moyenne de la floraison et la décade moyenne du remplissage du grain. Ces données ont été recueillies lors d'enquêtes agricole effectuées sur la commune de Villamblain et les communes avoisinantes (Terrasse, 1993). La décade moyenne des semis est généralement la deuxième décade du mois d'octobre (2^{ème} décade de la période hivernale). Les résultats obtenus avec le modèle BYM sur sol emblavé sont regroupés sur le tableau 7.1.

II. EVALUATION DES TERMES DU BILAN HYDRIQUE : CONDITIONS AUX LIMITES

L'objectif de ce paragraphe est, d'une part, de pouvoir **quantifier** de façon globale les **teneurs en eau moyennes du limon-argileux sur l'ensemble du secteur**, à des périodes importantes du bilan hydrique, c'est-à-dire en entrée et en sortie d'hiver et d'autre part, d'évaluer l'**influence** de l'occupation du sol, des antécédents cultureux et de l'épaisseur de la couverture de sol sur les teneurs en eau moyennes pendant ces mêmes périodes.

II-1 Mise en oeuvre

Des mesures de teneur en eau pondérale ont été effectuées sur des profils régulièrement réparties sur l'ensemble du secteur d'étude. Ces mesures ont été réalisées en

entrée d'hiver (début octobre) et en sortie d'hiver (mars), à des périodes qui correspondent aux états hydriques supposés respectivement les plus secs (octobre) et les plus humides (mars). **Trois séries de mesures** (trois séries de 50 profils, soit au total 150 profils hydriques) en mars 91, septembre 91 et septembre 92 ont permis d'évaluer ces états hydriques extrêmes. Il est important de noter que chaque série de mesures a été effectuée dans la même journée de manière à limiter les dérives dans le temps.

Ces mesures ont permis de déterminer les **teneurs en eau moyennes pondérales du LA** pour chaque profil réalisé. Pour chaque mesure le long du profil, la profondeur de mesure a été notée ainsi que l'épaisseur de sol ou "tranche" à laquelle s'applique cette mesure. Ainsi, nous pouvons passer d'une mesure ponctuelle de teneur en eau à une estimation plus continue tout au long du profil. Généralement, la mesure ponctuelle se situe au centre de la tranche de sol considérée et les mesures sont effectuées au maximum tous les 20 cm si aucun changement visible de morphologie du sol n'intervient. Par exemple, on réalise une première mesure de teneur en eau W_1 à 10 cm de profondeur pour la première tranche de sol 0-20 cm, une deuxième mesure W_2 à 30 cm, sur le même profil, pour la tranche 20-40 cm et ainsi de suite tant qu'il n'y a pas de changement d'horizon. Si un changement d'horizon pédologique intervient, l'épaisseur des tranches de sol est alors réduite pour tenir compte des limites des horizons pédologiques.

II-2 Teneurs en eau moyenne en entrée et sortie d'hiver

Par la suite, nous avons évalué la teneur en eau moyenne pondérale du LA pour chaque période sur l'ensemble du secteur. Ces valeurs moyennes vont nous permettre d'appréhender l'état **hydrique moyen** du système pour les périodes d'entrée et de sortie d'hiver. Ceci nous permettra par la suite de simuler différents scénarios pour les transferts d'eau dans le limon argileux. Cette teneur en eau moyenne pondérale est évaluée par la formule :

$$\frac{1}{\sum_1^n Ep_n} \sum_1^n W_{n_{pond.}} \times Ep_n$$

Avec :

Ep_n = épaisseur de la tranche de sol considérée (en cm)

$W_{n_{pond.}}$ = Teneur en eau pondérale de la tranche de sol considérée (en %)

et en supposant la densité apparente comme constante pour l'ensemble du LA.

Ainsi, plutôt que de réaliser une simple moyenne des teneurs en eau pondérales sur l'ensemble du LA, nous avons préféré **pondérer** chaque mesure de W par la tranche de sol considérée puis de diviser le stock d'eau ainsi calculé par l'épaisseur totale du LA (tableaux IV.2, IV.3 et IV.4 en annexe 4).

Le passage aux teneurs en eau volumiques se fait par multiplication avec une densité apparente moyenne du LA évaluée à $1,4 \text{ g/cm}^3$. Notons que dans l'évaluation de cette teneur en eau, nous n'avons pas tenu compte des 25 premiers centimètres qui sont labourés et correspondent à l'horizon cultivé (Ls). Généralement, ces horizons possèdent des teneurs en eau pondérales nettement supérieures au reste du profil, mais la densité apparente y est moins élevée et variable d'un profil à l'autre ce qui rend les déterminations de la teneur en eau volumique plus difficile sans une mesure de densité apparente précise.

II-3 Comparaison des teneurs en eau par parcelles

Nous avons ensuite analysé pour chaque période, la **répartition** de ces teneurs en eau moyenne sur chaque profil en fonction de l'occupation du sol par parcelle. Ceci nous permettra éventuellement de dégager des informations sur l'**influence des cultures** et/ou de l'antécédent cultural sur les teneurs en eau résiduelles en entrée d'hiver (septembre) et sur les possibles déficits de recharge en sortie d'hiver (mars).

Ainsi, en mars 91, nous notons que les teneurs en eau moyennes par parcelle varient peu, **entre 3,25 et 3,50 mm/cm** de sol (figure 7.3a). Seules les parcelles 10, 11 et 13 ont des teneurs en eau moyennes supérieures. Notons que ces parcelles sont **irriguées** en période estivale. Nous pouvons déduire de ces remarques que la réhumectation du LA durant l'hiver, sur le secteur d'étude, dépend de l'antécédent cultural et plus précisément de l'irrigation estivale. Ainsi, les teneurs en eau moyennes sont plus élevées dans les parcelles où l'antécédent cultural était irrigué. En revanche, en situation non irriguée, la réhumectation du LA se fait de manière **quasi-homogène** quelle que soit l'occupation du sol.

En septembre 91 et 92, par contre, la répartition des teneurs en eau moyennes par parcelle est **plus étalée** (figures 7.3b et 7.3c). On remarque que de façon générale, **les teneurs en eau moyennes dépendent du type de culture réalisée pendant l'été**. Ainsi, pour les parcelles irriguées durant la période estivale, ces teneurs en eau moyennes sont toujours plus élevées. On remarque également que les valeurs de teneur en eau moyenne en parcelle non irriguée sont globalement plus élevées en septembre 91 qu'en septembre 92. Ceci tient vraisemblablement au fait que l'hiver 91-92 fut **particulièrement sec** avec un déficit pluviométrique par rapport à la normale sur 40 ans d'environ **150 mm**.

Ces différentes remarques et calculs nous ont permis de dégager des points importants concernant les relations entre les teneurs en eau, l'occupation du sol et les antécédents culturaux. Ainsi, en entrée d'hiver, les teneurs en eau moyennes **varient sensiblement** pour un même mode d'occupation du sol et **aucune variation ordonnée** n'a pu être mise en évidence en relation avec ce mode d'occupation, excepté pour les parcelles irriguées durant la période estivale qui possèdent des teneurs en eau plus élevées.

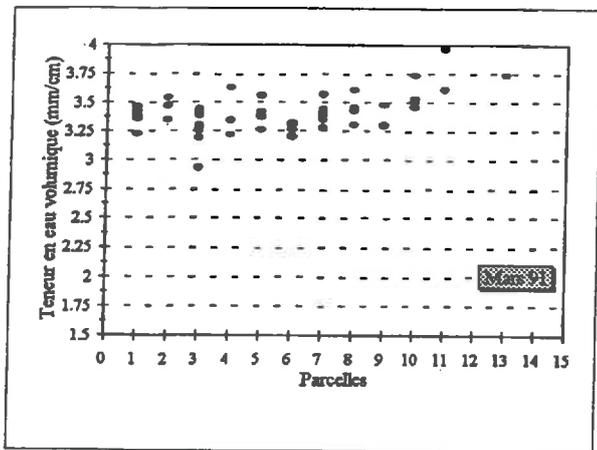


Figure 7.3a : Teneurs en eau moyennes volumiques en fonction de l'occupation du sol par parcelles en mars 1991

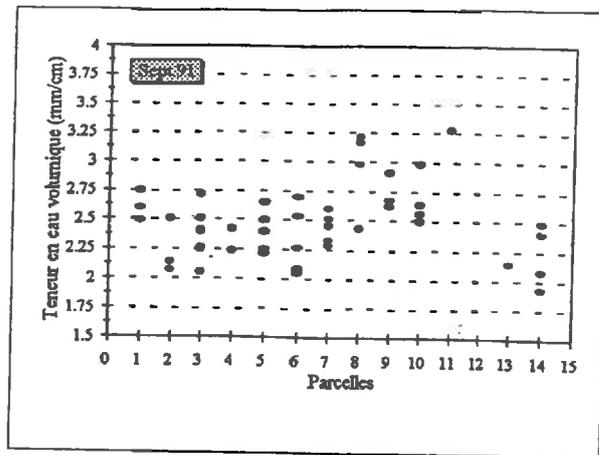


Figure 7.3b : Teneurs en eau moyennes volumiques en fonction de l'occupation du sol par parcelles en septembre 1991

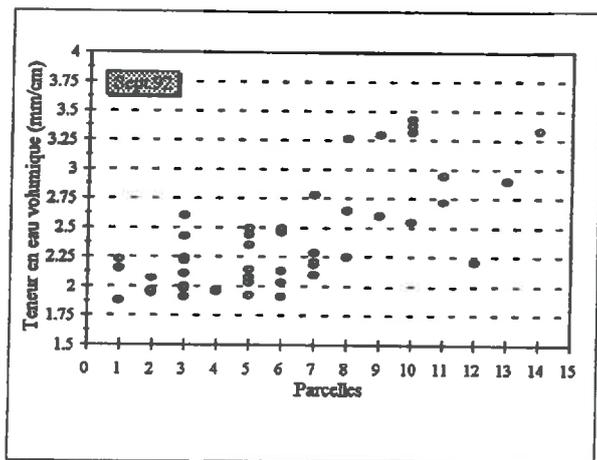


Figure 7.3c : Teneurs en eau moyennes volumiques en fonction de l'occupation du sol par parcelles en septembre 1992

Parcelles	Occupation du sol		
	Mars 91	Sept. 91	Sept. 92
1	Blé	Blé	Orge
2	Seigle	Seigle	Orge
3	Colza	Colza	Blé
4	Blé	Blé	Pois
5	Orge	Orge	Pois
6	Blé	Blé	Tournesol
7	Blé	Blé	Blé
8	Maïs IR	Maïs IR	Blé IR
9	Blé IR	Blé IR	Pois IR
10	Pois IR	Pois IR	Maïs IR
11	Maïs IR	Maïs IR	Blé IR
12	Arbustes	Arbustes	Arbustes
13	Blé	Blé	Pois IR
14		Divers	Maïs IR

N.B. : IR = Parcelles irriguées

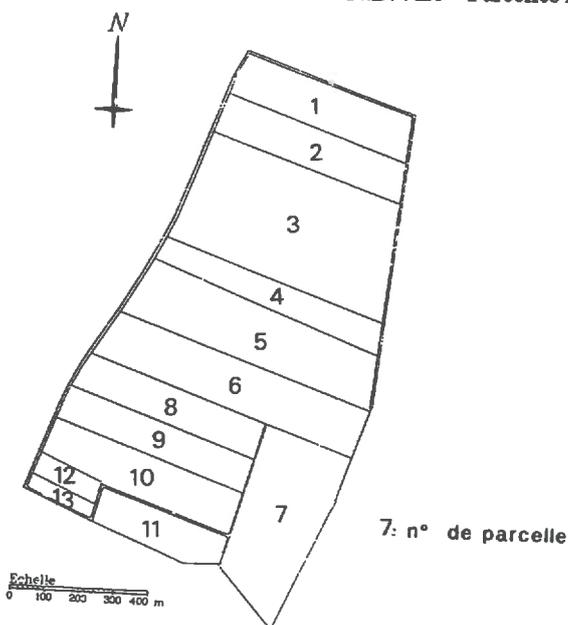


Figure 7.3 : Répartition des teneurs en eau moyennes volumiques en fonction de l'occupation du sol par parcelle en entrée et en sortie d'hiver

Dès lors, en entrée d'hiver, sous blé non irrigué et en année climatique sèche, les teneurs en eau moyennes volumiques sont de l'ordre de **1,8 mm/cm** de sol, alors que sous blé irrigué elles sont d'environ **2,8 mm/cm**. Sous maïs irrigué, elles sont de l'ordre de **3,2 mm/cm** de sol, mais peuvent atteindre **3,4 mm/cm** sous irrigation estivale intense. D'une manière générale, en entrée d'hiver, la teneur en eau volumique moyenne est de l'ordre de **2,5 mm/cm** de sol. Ces différentes valeurs permettront par la suite pour chaque parcelle du secteur d'étude d'évaluer les teneurs en eau volumiques en entrée d'hiver.

II-4 Relation entre la teneur en eau moyenne volumique par profil en entrée d'hiver et l'épaisseur du sol

L'objectif de ce paragraphe est d'examiner les relations entre les teneurs en eau en entrée d'hiver et l'épaisseur de la couverture limono-argileuse de manière à évaluer si cette teneur en eau est fonction de l'épaisseur du sol.

II-4.1 Mesures en septembre 1991

Nous avons, dans un premier temps, reporté sur un graphique (figure 7.4a) la **teneur en eau volumique moyenne par profil non irrigué** en fonction de l'épaisseur du LA. La mise à l'écart des profils irrigués se justifie dans la mesure où les teneurs en eau dépendent de la quantité d'eau apportée durant la période estivale et qui demeure indéterminée. Nous avons alors constaté qu'il existe une relation que nous avons quantifiée :

$$W_{\text{vol.}} = -5,6 \cdot 10^{-3} Ep_{\text{LA}} + 2,8$$

avec :

$W_{\text{vol.}}$ = Teneur en eau volumique moyenne par profil en mm/cm.

Ep_{LA} = Epaisseur de la couverture limono-argileuse en cm.

Le coefficient de détermination de cette régression est **70%**. Un test F de Fisher montre que le coefficient b ($b = -5,6 \cdot 10^{-3} \pm 6,7 \cdot 10^{-4}$) de cette régression est significativement différent de 0 au niveau de probabilité de 5%. La régression est donc significative au seuil de 5%. D'autre part, les résidus de la régression ne montrent pas de structure apparente (figure 7.4b).

Ces résultats montrent que, pour septembre 1991, la teneur en eau moyenne par profil en entrée d'hiver n'est pas indépendante de l'épaisseur du sol. Cette teneur en eau moyenne **diminue** quand l'épaisseur du sol **augmente**.

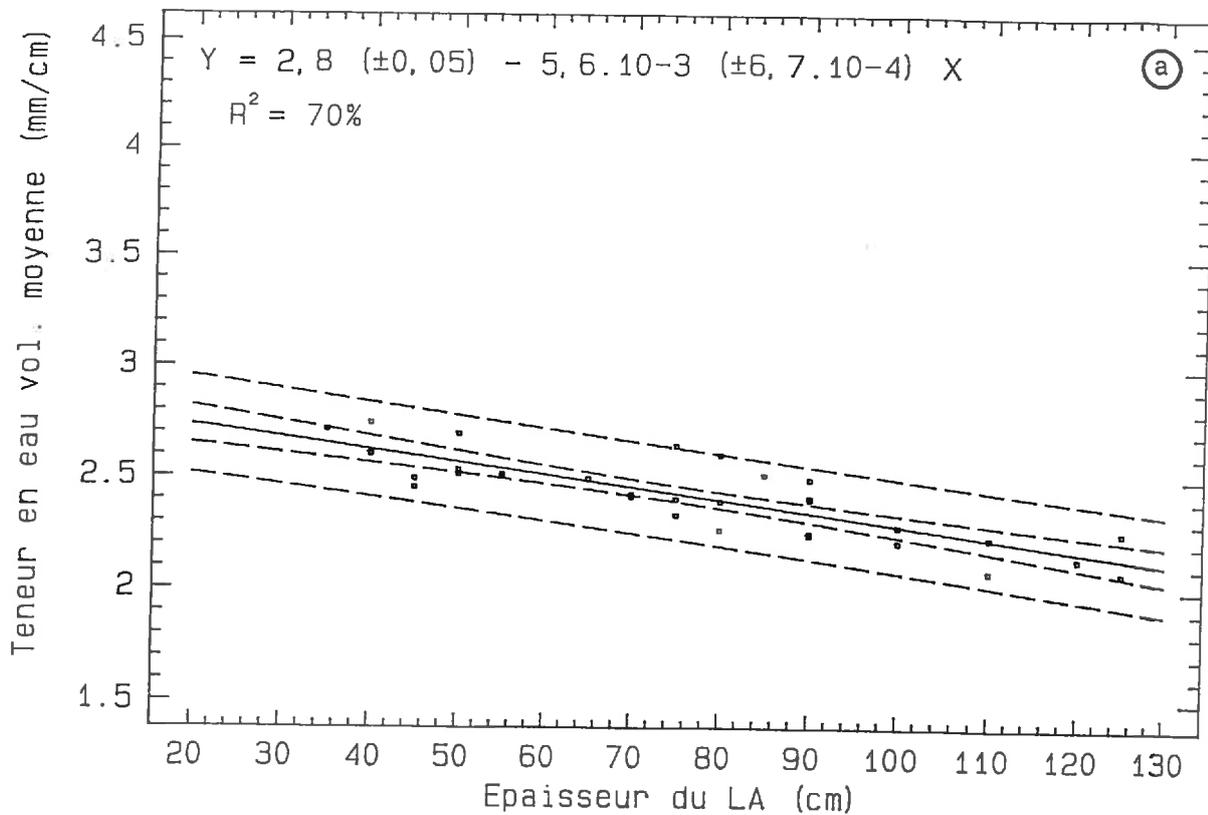


Figure 7.4a : Régression entre teneurs en eau volumiques moyennes en septembre 1991 et épaisseur du LA

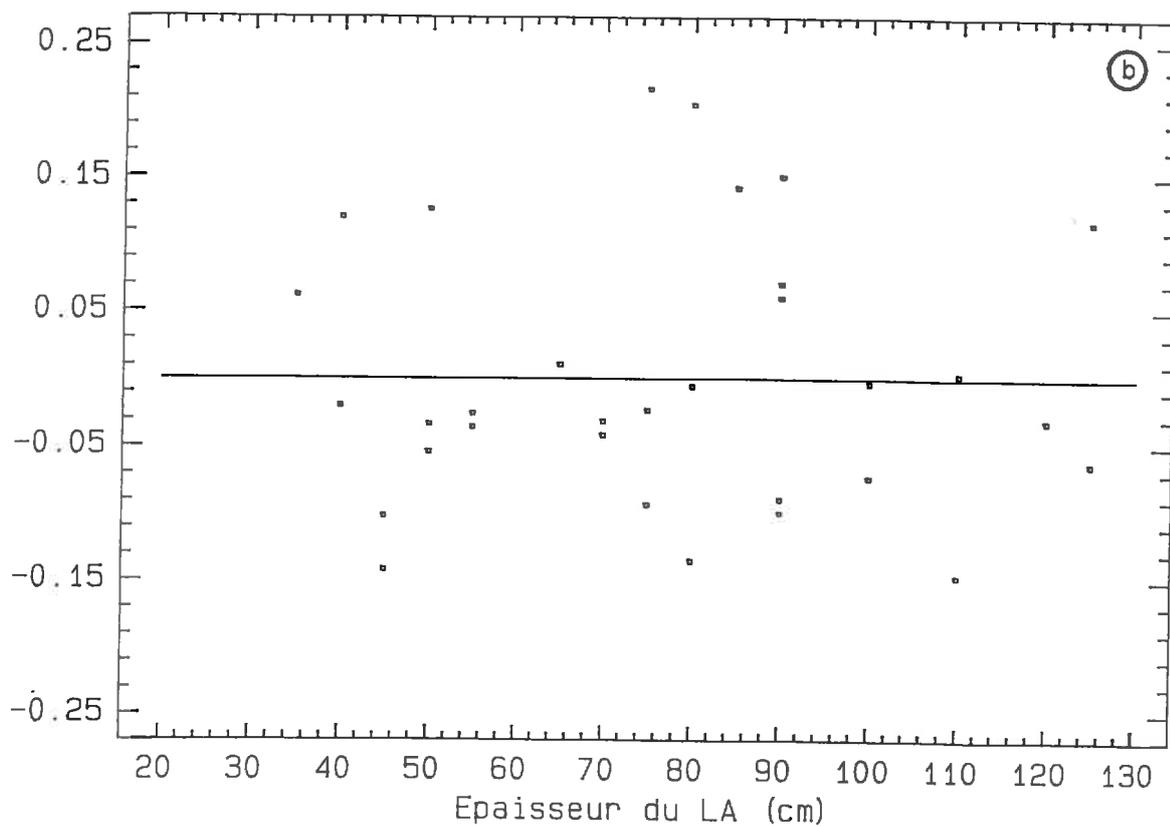


Figure 7.4b : Résidus de la régression

II-4.2 Mesures en septembre 1992

Nous avons de la même façon réalisé une régression linéaire entre la teneur en eau moyenne volumique (en septembre 1992) par profil et l'épaisseur du LA (figure 7.5). Le test de signification montre que cette régression n'est pas significative au niveau de probabilité de 5%. Ces résultats montrent qu'il **n'existe pas de relation**, pour les mesures effectuées en septembre 1992, entre la teneur en eau moyenne volumique par profil et l'épaisseur du LA. En revanche, des relations entre teneur en eau et épaisseur du LA ont pu être mises en évidence en considérant la relation par tranches de sol de 25 cm (figure 7.6). Cependant, ces relations sont trop peu générales pour être utilisables.

II-4.3 Conclusion

Ces résultats montrent que l'existence d'une relation entre la teneur en eau et l'épaisseur du LA **dépend de l'année climatique considérée**. Nous avons montré qu'en septembre 1991 une telle relation pouvait être mise en évidence alors que ceci n'a pas été possible pour septembre 1992. Cette différence est vraisemblablement due au fait que l'année 1991-1992 (oct.91 à oct.92) est du point de vue pluviométrique **très fortement déficitaire**, avec un déficit de **235 mm**, alors que pour l'année 1990-1991 (oct.90 à oct.91) ce déficit n'a atteint que **68 mm**.

III. BILAN HYDRIQUE

III-1 Modèles de bilan hydrique

III-1.1 Généralités sur les modèles de bilan

Les modèles de bilan hydrique peuvent se classer en fonction de leurs options de simulations. Trois grands types de simulation sont possibles. La **simulation mécaniste** qui repose sur des lois physiques déterministes, la **simulation empirique** qui corrèle la variable à expliquer à des variables explicatives par une loi ajustée à des points expérimentaux (loi n'ayant aucune signification physique) et enfin la **simulation analogique** qui représente le système étudié par un autre système considéré comme analogue (Leenhardt, 1991). Le modèle de bilan hydrique que nous utiliserons dans ce travail est de ce dernier type.

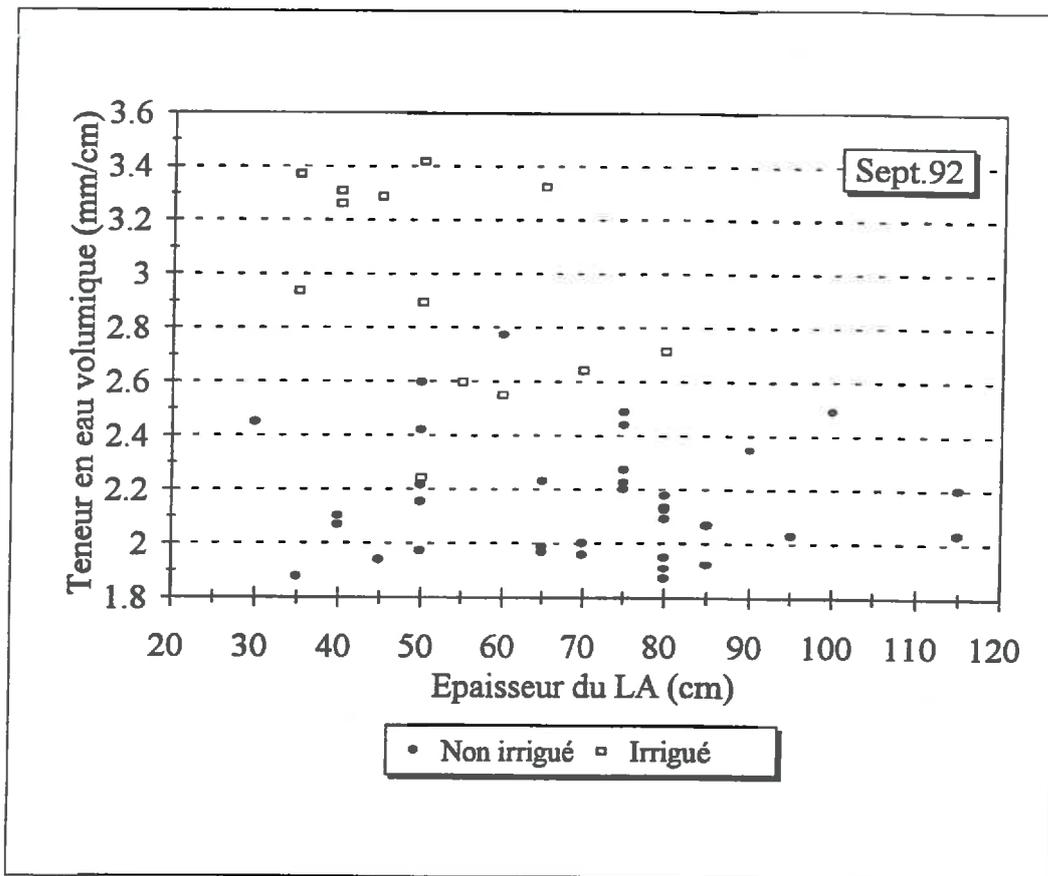
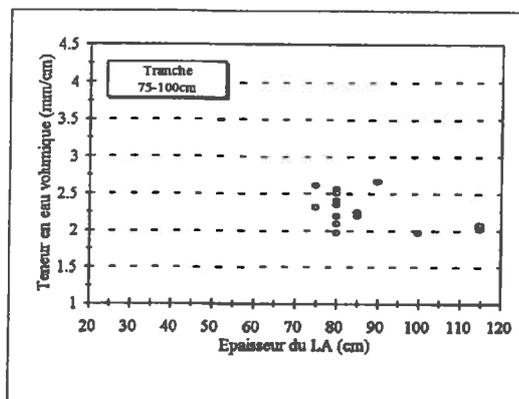
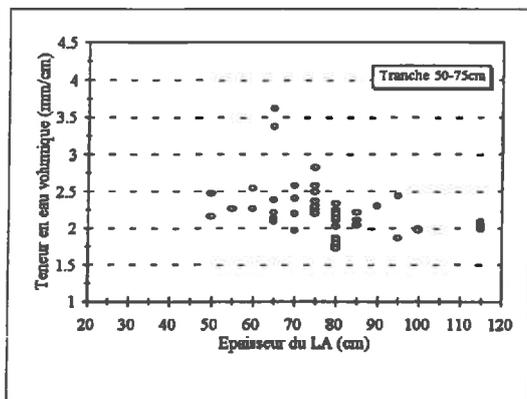
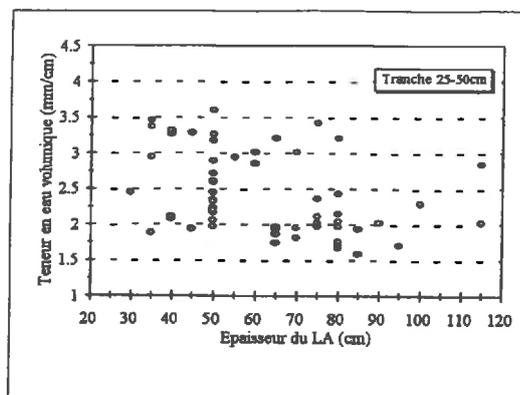
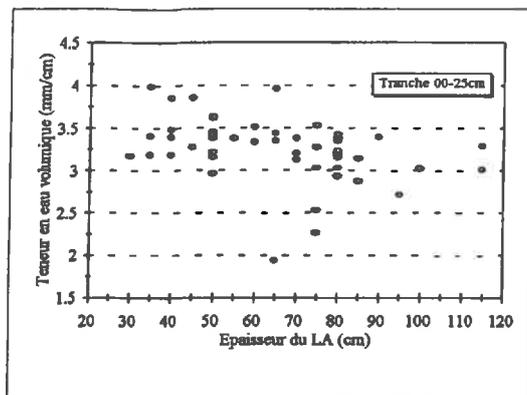


Figure 7.5 : Relation entre teneur en eau volumique moyenne en septembre 1992 et épaisseur du LA



Tranches de sol	Pente de la régression b	Ordonnée à l'origine a	Coefficient de détermination R ²	Signification de la régression à 5%
00-25 cm	$-5,9 \cdot 10^{-3}$	3,6	39%	oui
25-50 cm	$-9,6 \cdot 10^{-3}$	3,0	39%	oui
50-75 cm	$-6,4 \cdot 10^{-3}$	2,7	42%	oui
≥75 cm	$-11 \cdot 10^{-3}$	3,3	37%	non

Figure 7.6 : Relations, paramètres et niveaux de signification des régressions entre la teneur en eau volumique et l'épaisseur totale du LA par profil en septembre 1992.

III-1.2 Les représentations de type analogique

Les modèles de type analogique schématisent le fonctionnement hydrique du sol par un système à **un ou plusieurs réservoirs**. Le (ou les) réservoir ainsi considéré peut se remplir ou se vider respectivement sous l'effet des précipitations et/ou de l'irrigation ou par évapotranspiration et/ou drainage. La capacité du réservoir dépend de seuils relatifs au sol considéré. Deux seuils sont fréquemment caractéristiques de la capacité de ce réservoir. Le seuil minimum qui correspond au stock d'eau du sol au **point de flétrissement permanent** (en général, il s'agit de la teneur en eau à pF 4,2) et le seuil maximum qui correspond au stock d'eau à la **capacité de rétention** (on entend par capacité de rétention, la teneur en eau du sol après cessation du drainage par gravité). La teneur en eau comprise entre le point de flétrissement permanent et la capacité de rétention constitue "**la teneur en eau utile**" qui, en prenant en compte une épaisseur de sol donnée, permet de définir "**la réserve utile**" c'est-à-dire le stock d'eau maximum disponible pour les plantes. Ainsi, tant que la teneur en eau à la capacité de rétention n'est pas atteinte, le réservoir continue de se remplir sous l'effet d'un apport. Mais lorsque cette teneur en eau dépasse la capacité de rétention, il y a écoulement. Le sol est considéré dans ce type de modèle comme un réservoir d'eau de capacité égale à sa réserve utile (Leenhardt, 1991).

Les inconvénients de ce type de modèle sont en premier lieu que l'on ne connaît rien de la **redistribution** et de la **localisation** de l'eau dans le sol. On ne sait rien en particulier d'éventuels transferts latéraux ou de mises en charges locales. Enfin, les concepts de capacité de rétention et de point de flétrissement permanent sur lesquels s'appuient ces modèles sont sujet à controverse (De Jong, 1984). Toutefois, leur simplicité et le nombre réduit de variables qu'ils nécessitent font qu'ils sont largement diffusés et utilisés.

III-1.3 Le modèle à deux réservoirs de Choisnel (1985)

Un modèle de bilan hydrique de type "analogie réservoir" particulier a été présenté par Choisnel (1985). Il utilise des données climatiques facilement disponibles dans les stations météorologiques. Ce modèle prend en compte les travaux de Perrier (1975 et 1977) pour le calcul de l'évapotranspiration et schématise le fonctionnement hydrique du sol par un système à **deux réservoirs** (Choisnel, 1985).

Le modèle de Choisnel permet de décrire l'évolution de la réserve en eau du sol au cours du temps et ceci en fonction des apports (précipitations) et des pertes (évapotranspiration) d'une tranche de sol préalablement déterminée. Ce modèle est établi sous les hypothèses suivantes :

- le sol considéré possède une bonne stabilité structurale ;
- la profondeur utile de sol est fixée, elle concerne le premier mètre et elle est inférieure ou égale à la profondeur maximale du sol.

- la resaturation du sol par la pluie après dessèchement concerne en premier lieu les horizons superficiels qui restent poreux.

- le sol est considéré comme un système à deux réservoirs : un premier réservoir appelé **réservoir profond** qui est dimensionné par la profondeur utile et qui correspond au stockage de l'eau par le sol au cours de l'hiver. Lorsque ce réservoir est plein, tous les horizons du sol sont saturés et la réserve en eau du sol est égale à la réserve utile. Un second réservoir dénommé **réservoir superficiel** qui possède des dimensions variables. Ce réservoir est créé au printemps et en été quand, après un dessèchement ayant entraîné la désaturation du réservoir profond, les précipitations sont insuffisantes à la resaturation de ce réservoir profond. Les dimensions du réservoir superficiel dépend donc des quantités de pluie tombée. C'est ce modèle qui est utilisé en routine dans les bulletins météorologiques pour calculer "les quantités d'eau écoulées".

III-1.4 L'infiltration selon la loi du "tout ou rien"

Ce modèle d'infiltration repose sur les hypothèses mentionnées dans les paragraphes précédents. Le sol est ici découpé en réservoirs qui correspondent aux horizons caractérisés sur le terrain. La pluie s'accumule dans l'horizon superficiel jusqu'à ce que sa capacité de rétention soit atteinte. Il y a alors drainage de l'excédent vers l'horizon sous-jacent. D'une manière générale, nous avons donc :

$$RH_i = RH_0 + D_{i-1}$$

$$\begin{array}{llll} \text{Si } RH_i > RU_i, \text{ alors} & D_i = RH_i - RU_i & \text{et} & RH_{i+1} = RU_i \\ \text{Si } RH_i < RU_i, \text{ alors} & D_i = 0 & \text{et} & RH_{i+1} = RH_i + D_{i-1} \end{array}$$

avec :

- RH_0 : réserve hydrique initiale de l'horizon i
- RH_i : réserve hydrique de l'horizon i
- RH_{i+1} : réserve hydrique finale de l'horizon i
- RU_i : réserve utile de l'horizon i
- D_{i-1} : quantité d'eau drainée de l'horizon i-1 vers l'horizon i
- D_i : quantité d'eau drainée de l'horizon i vers l'horizon i+1

III-2 Présentation du modèle utilisé

III-2.1 Expression du modèle

Le modèle de bilan hydrique utilisé s'apparente au modèle de Choissnel dans la mesure où il décrit l'évolution de la réserve en eau du sol au cours du temps en prenant en compte les apports (précipitations), les pertes (ETP) et les caractéristiques du réservoir (bonne stabilité structurale, horizon superficiel poreux et comportement estival du sol - constitution d'un réservoir profond et d'un réservoir superficiel-). Mais il s'en écarte aussi par le fait que l'étude se situe pendant la période hivernale, et ainsi, seul le réservoir profond est retenu pour le calcul du bilan. D'autre part, nous avons voulu rendre plus général ce modèle en spatialisant les données d'épaisseur du sol, en prenant en compte non plus l'ETP mais l'ETR et en tenant compte de façon précise de l'occupation du sol. Ce modèle définit l'infiltration selon la loi du tout ou rien. Tous les stocks d'eau calculés dans ce modèle, le sont à partir des épaisseurs du limon argileux spatialisées par krigeage sur l'ensemble du secteur d'étude. Le pas de temps employé est la décade. Ce modèle s'exprime de la manière suivante :

Avec :

- R_0 : Réserve hydrique initiale du sol
- R_1 : Réserve hydrique du sol au temps t_1
- $R_{max.}$: Réserve hydrique maximale du sol
- R'_1 : Réserve virtuelle au temps t_1
- D : Quantité d'eau écoulee à la base du LA (Drainage)
- P : Précipitations décadaires (source : Orléans-Bricy)
- ETR : Evapotranspiration réelle décadaire calculée par BYM

A t_0 : on a : R_0

A t_1 : on a : $\Delta R_{t_0}^{t_1} = (P - ETR)_{t_0}^{t_1}$ et $R'_1 = R_0 + \Delta R_{t_0}^{t_1}$

- 1°) Si $R'_1 > R_{max.}$ alors $R_1 = R_{max.}$ et $D = R'_1 - R_{max.}$
- 2°) Si $R'_1 < R_{max.}$ alors $R_1 = R'_1 = R_0 + \Delta R_{t_0}^{t_1}$ et $D = 0$
- 3°) Si $R'_1 = R_{max.}$ alors $R_1 = R'_1 = R_{max.}$ et $D = 0$

La somme totale des quantités d'eau écoulee à la base du LA sera de :

$$\sum_n^1 R'_n - R_{max.} \quad \text{quand} \quad R'_n - R_{max.} > 0$$

III-2.2 Définition et calcul des réserves hydriques initiales et maximales

Choisnel (1977) insiste sur l'importance de la connaissance du réservoir hydrique du sol sachant que celui-ci varie en fonction de la texture du sol.

1°) Réserve hydrique maximale du sol : R_{\max} .

La **réserve hydrique maximale** du sol dans notre modèle est définie à partir de la teneur en eau moyenne mesurée en fin d'hiver *in situ* (mars 91). La valeur maximale de cette teneur en eau moyenne a été évaluée à 3,5 mm/cm de sol (cf. § II-3) pour les parcelles non irriguées. En effet, nous avons noté à cette période que les teneurs en eau moyennes par parcelle varient peu entre 3,25 et 3,5 mm/cm de sol (figure 7.3a). Cette valeur est alors multipliée par l'épaisseur du LA estimée par krigeage sur l'ensemble du secteur pour obtenir la réserve hydrique maximale du sol. Nous avons donc :

$$R_{\max} \text{ (mm)} = 3,5 \text{ (mm/cm)} \times \text{épaisseur du LA (cm)}$$

La valeur du R_{\max} est ainsi **spatialisée** sur l'ensemble du secteur d'étude en prenant comme support la carte des isopaches du LA.

2°) Réserve hydrique initiale du sol : R_0

La **réserve hydrique initiale** du sol est définie à partir des teneurs en eau moyenne par profil mesurées en entrée d'hiver (sept.91 et sept.92) (cf. § II-4). Mais contrairement à la teneur en eau moyenne mesurée en fin d'hiver, les teneurs en eau initiales sont variables dans l'espace. Ainsi, pour les parcelles non irriguées, les teneurs en eau moyennes dépendent du type de culture réalisé pendant l'été. Pour les parcelles irriguées durant la période estivale, ces teneurs en eau moyennes sont **toujours plus élevées**. Nous avons en effet montré plus haut que les teneurs en eau initiales varient en fonction de l'irrigation et de l'occupation du sol estivales.

Ces résultats montrent que l'existence d'une relation entre la teneur en eau et l'épaisseur du LA dépend de l'année climatique considérée. Nous avons montré qu'en septembre 1991 une telle relation pouvait être mise en évidence alors que ceci n'a pas été possible pour septembre 1992. Cette différence est vraisemblablement due au fait que l'année 1991-1992 (oct.91 à oct.92) est du point de vue pluviométrique très fortement déficitaire, avec un déficit de 235 mm, alors que pour l'année 1990-1991 (oct.90 à oct.91) ce déficit n'a atteint que 68 mm.

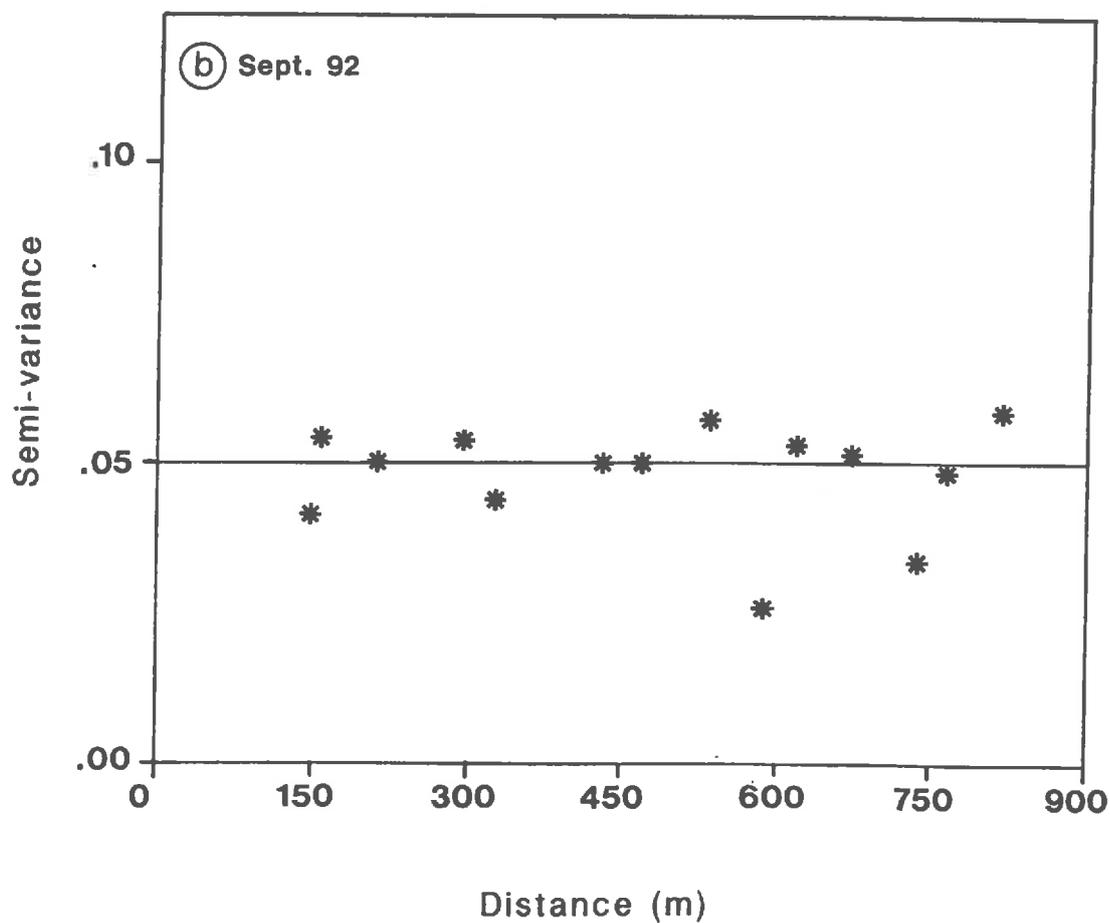
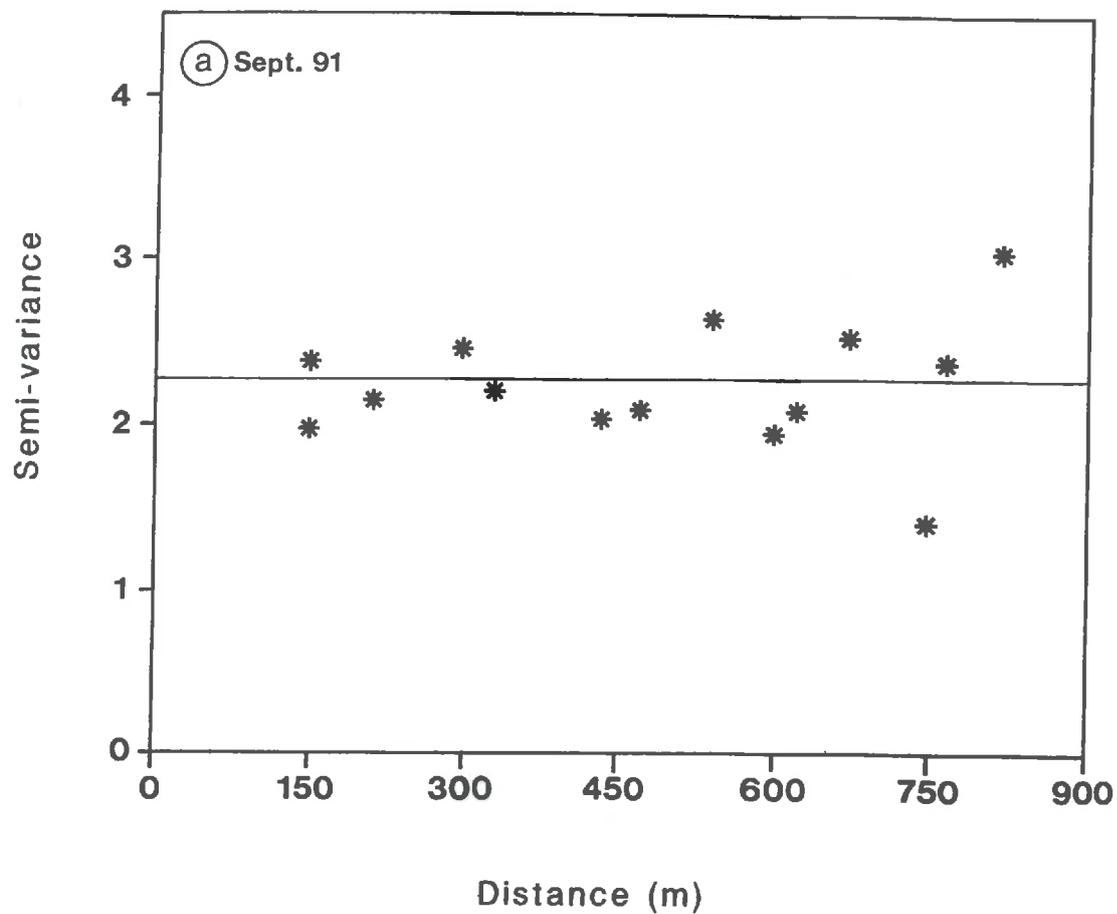


Figure 7.7 : Variogrammes des teneurs en eau volumiques moyennes en entrée d'hiver

- (a) : Septembre 1991
- (b) : Septembre 1992

3°) Spatialisation du R_0

L'étude de la **distribution spatiale** des teneurs en eau initiales (sur parcelles non irriguées) en septembre 91 et septembre 92 montre qu'il n'existe **aucune structure spatiale** caractéristique. Les **variogrammes expérimentaux effectués sont plats** (figure 7.7a et b). De ce fait, le meilleur estimateur de la teneur en eau initiale sur l'ensemble du secteur d'étude est la **moyenne des teneurs en eau** mesurées sur chaque profil. Cependant, l'utilisation d'un tel estimateur de la teneur en eau initiale (qui n'est autre qu'une moyenne de plusieurs moyennes) dans la spatialisation du R_0 serait tout à fait inadapté car il ne tient pas compte des effets du parcellaire (effet du type de culture, du travail du sol, de l'irrigation, etc.). Il est donc plus judicieux de distinguer deux cas de figure et de réaliser la spatialisation des valeurs de la réserve hydrique initiale de manière différente selon l'année considérée.

Spatialisation du R_0 en septembre 91

Plutôt que d'utiliser la moyenne des teneurs en eau mesurées sur chaque profil comme estimateur, nous avons préféré utiliser la relation existant entre la teneur en eau en entrée d'hiver et l'épaisseur du LA pour septembre 91 :

$$W_{\text{vol.}} = -5,6 \cdot 10^{-3} \text{Ep}_{\text{LA}} + 2,8$$

avec :

$W_{\text{vol.}}$ = Teneur en eau volumique moyenne par profil en mm/cm.

Ep_{LA} = Epaisseur de la couverture limono-argileuse en cm.

Nous obtenons ainsi **pour chaque valeur d'épaisseur du LA** (rappelons que cette information est disponible sur l'ensemble du secteur aux noeuds d'une grille de 20m x 20m) une teneur en eau volumique. Cette teneur en eau est alors multipliée par l'épaisseur du LA pour le calcul de la réserve hydrique initiale en septembre 91 (R_0).

Spatialisation du R_0 en septembre 92

A contrario, nous avons montré qu'il n'existe pas, pour septembre 92, de relation entre la teneur en eau en entrée d'hiver et l'épaisseur du LA. De ce fait, il n'est pas possible d'utiliser le même type de relation que précédemment. Dans ce cas, nous prendrons alors comme estimateur de la teneur en eau initiale, la **moyenne des teneurs en eau** mesurées sur chaque profil **par parcelle** de manière à nous affranchir des effets du parcellaire (tableau 7.4). Ces teneurs en eau initiale par parcelle sont ensuite multipliées par l'épaisseur du LA pour le calcul de la réserve hydrique initiale en septembre 92 (R_0).

Parcelles	1	2	3	4	5	6
W _{vol. moy.} (mm/cm)	2,07	1,99	2,16	1,96	2,20	2,20
7	8	9	10	11	12	13
2,30	2,71	2,94	3,16	2,82	2,20	2,89

Tableau 7.4 : Teneurs en eau moyenne par parcelle en septembre 92

N.B. : (les valeurs *en italique* correspondent aux parcelles irriguées).

III-2.3 Nature des variables et construction du modèle

Le modèle est construit en utilisant un **Système d'Information Géographique (SIG)** qui permet d'intégrer chaque variable au sein d'une **Unité Spatiale d'Intégration (USI)** qui n'est autre que la plus petite unité spatiale représentative de la variable (Chéry, 1990 et 1991 ; King *et al.*, 1991). Notons que certaines variables utilisées varient non pas dans l'espace, mais dans le temps ; c'est le cas notamment des variables climatiques (Pluie et ETR). Notons également que d'autres variables varient dans le temps et dans l'espace (réserves hydriques). Pour la compréhension du modèle que nous allons utiliser, il nous a paru, dans un premier temps, judicieux d'exposer et de discuter de la nature des variables employées. Par la suite, nous décrirons le fonctionnement du modèle en nous appuyant sur l'ensemble des explications données dans ce chapitre.

1°) Nature des variables

Le modèle est construit à partir des variables définies précédemment. Ces variables sont de 4 types :

- **climatiques** : pluie, ETR sur sol nu, ETR sur sol emblavé
- **agronomiques** : occupation du sol, irrigation et parcellaire
- **pédologiques** : épaisseur du limon argileux
- **hydrologiques** : réserve hydrique en entrée d'hiver (R_0) et réserve maximale ($R_{max.}$).

Ces variables sont de natures différentes (tableau 7.5). Les variables **climatiques** évoluent dans le temps mais pas dans l'espace du secteur d'étude. La plus petite unité représentative dans l'espace est donc le secteur d'étude. Quant à la plus petite unité représentative de temps, il s'agit de la décade.

Les variables **agronomiques** sont des variables binomiales, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent prendre que deux valeurs. Ainsi, une parcelle pourra être irriguée ou non et de même

une parcelle ne pourra être considérée qu'en sol nu ou en sol emblavé durant la période hivernale. Notons que c'est le parcellaire qui joue ici le rôle de plus petite unité représentative.

Les variables **pédologiques** sont représentées uniquement par l'épaisseur du limon argileux. Celle-ci est considérée comme invariante dans le temps (à l'échelle de notre étude) et varie dans l'espace de façon continue car spatialisée par krigeage. La plus petite unité représentative correspond ici au pixel qui représente une surface de 20m sur 20m.

Quant aux variables **hydrologiques**, elles sont représentées à plusieurs niveaux selon l'année considérée. La spatialisation de la réserve hydrique initiale en septembre 91 (grâce notamment à la relation entre épaisseur du LA et teneur en eau en entrée d'hiver) permet de considérer le pixel (20m x 20m) comme la plus petite unité représentative. Par contre, pour septembre 92, l'absence de structure spatiale de la variable teneur en eau et de relation entre épaisseur du LA et teneur en eau en entrée d'hiver, nous a obligé à prendre la parcelle comme unité représentative minimale.

Type de variable	climatique	agronomique	pédologique	hydrologique
Plus petite unité spatiale représentative	secteur (100 ha)	parcellaire (13 parcelles)	pixel (20m x 20m)	parcellaire ou pixel
unité représentative de temps	décade	année		année

Tableau 7.5 : Nature des variables utilisées dans le modèle de bilan hydrique

2°) Construction du modèle

Le modèle intègre donc des **variables de nature et d'échelle différente** tant au niveau spatial que temporel. La prise en compte des variables agronomiques permet d'envisager **quatre cas de figure** pour le calcul du bilan hydrique. Le calcul de la réserve hydrique initiale (R_0) dépendra de l'année considérée (1991 ou 1992). Nous allons maintenant énumérer ces 4 cas et discuter des valeurs prises par l'ETR et le R_0 dans le calcul du bilan hydrique.

• 1^{er} cas : sol nu irrigué

Dans ce cas, l'ETR utilisée est l'ETR évaluée par décade sur sol nu. Le R_0 est calculé à partir des mesures de teneur en eau effectuées en septembre sur des parcelles qui ont été irriguées durant la période estivale.

• 2^{ème} cas : sol nu non irrigué

De la même manière, l'ETR employée est l'ETR évaluée par décade sur sol nu. Par contre, le R_0 est calculé à partir de la relation entre les teneurs en eau et l'épaisseur du limon argileux pour septembre 91 (cf. § III-2.2) et pour septembre 92, le R_0 est calculé à partir de la moyenne des teneurs en eau mesurées sur chaque profil par parcelle.

• 3^{ème} cas : sol emblavé non irrigué

Ici, l'ETR utilisée est l'ETR évaluée par décade sur sol emblavée. Le R_0 est calculé de la même façon que précédemment.

• 4^{ème} cas : sol emblavé irrigué

Pour ce dernier cas, l'ETR est également évaluée par décade sur sol emblavée. Quant au R_0 , il est calculé à partir des mesures de teneurs en eau effectuées sur des parcelles irriguées durant la période estivale.

Ces variables sont intégrées au sein d'un SIG, en tenant compte des différents cas exposés plus haut pour, d'une part, évaluer les **quantités d'eau écoulée à la base du LA par décade** pour chaque année d'étude et d'autre part, pour réaliser une **carte des quantités d'eau écoulée à la base du LA** à la fin de l'hiver pour les années considérées (91 et 92).

	sol nu	sol emblavé
irrigué	- ETR sur sol nu par décade - R_0 par parcelle	- ETR sur sol emblavé par décade - R_0 par parcelle
non irrigué	- ETR sur sol nu par décade - R_0 par pixel en sept.91 - R_0 par parcelle en sept.92	- ETR sur sol emblavé par décade - R_0 par pixel en sept.91 - R_0 par parcelle en sept.92

Tableau 7.6 : Récapitulatif du mode de calcul de l'ETR et de la réserve hydrique initiale dans le calcul du bilan en fonction des variables agronomiques.

III-3 Résultats

III-3.1 Evaluation des quantités d'eau écoulée à la base du LA par décade et par parcelle

Le modèle de bilan hydrique ainsi défini permet d'évaluer les quantités d'eau écoulée à la base du LA par décade et par parcelle et ceci pendant les périodes hivernales 91-92 et 92-93.

Les tableaux 7.7 et 7.8 sont constitués de la manière suivante. Chaque cellule correspond à un écoulement (en mm) pour une décade et pour une parcelle ramené au nombre de pixels constituant la parcelle. La colonne "Total" est obtenue en sommant les écoulements de chaque décade par parcelle. La ligne "Moyenne" est calculée en réalisant la moyenne pondérée de chaque cellule c'est-à-dire :

$$\frac{\sum_1^{13} \text{Ecoulement} \times \text{nb pixels}}{\sum_1^{13} \text{pixels}} \quad (9)$$

on obtient ainsi un écoulement moyen par décade sur l'ensemble du secteur en tenant compte de la surface et donc de la contribution de chaque parcelle. La dernière cellule (en bout de la ligne "Moyenne") correspond à la somme des moyennes calculées auparavant. Elle traduit un écoulement moyen du secteur à la fin de chaque hiver considéré. Notons que cette grandeur peut également être calculée en effectuant la moyenne pondérée de chaque terme des cellules de la colonne "Total" à l'aide de la relation (9).

Ainsi, pour l'année 1991-1992, on constate de **très faibles écoulements** à la base du LA (tableau 7.7). En particulier, les décades du premier tiers (décades 1, 2, 3, 6 et 7) et du dernier tiers de la période hivernale (décades 12, 15, 16 et 17) ne présentent aucun écoulement. La **faible teneur en eau initiale** pour les premières décades et l'**ETR élevée** pour les dernières décades expliquent vraisemblablement cette absence d'écoulement. En étudiant les quantités d'eau écoulées à la base du LA par parcelle, on remarque que les parcelles **irriguées** (8, 9, 10, 11 et 13) présentent au total des **écoulements élevés** et ceci dès les premières décades. On constate également que certaines parcelles ne présentent quasiment pas d'écoulement (parcelles 4 et 5) (tableau 7.7). Enfin, les parcelles 1 et 2 montrent des écoulements moyens entre les parcelles irriguées et les parcelles les plus "sèches" (parcelles 3 à 7). Ceci peut être expliqué par la **faible épaisseur des sols** de ces deux parcelles, le réservoir se remplissant ainsi plus rapidement.

Pour l'année 1992-1993, on remarque que l'écoulement moyen total est environ **7 fois plus élevé** que pour l'année 1991-1992. On constate, comme pour l'année précédente, que les parcelles irriguées présentent des écoulements plus élevés et ceci également dès les premières décades. Si on compare les écoulements dus aux parcelles irriguées et les écoulements dus aux parcelles non irriguées pour le secteur et en tenant compte des surfaces, on constate que pour l'année 91-92, l'écoulement moyen dus aux parcelles irriguées est de 41,8 mm, alors qu'il est de 7,6 mm pour les parcelles non irriguées. En revanche, pour l'année 92-93, l'écoulement

Parcelle n°	Surface (ha)	Pixels (nb)	Occup92	Irrigation	DEC1 (mm)	DEC2 (mm)	DEC3 (mm)	DEC4 (mm)	DEC5 (mm)	DEC6 (mm)	DEC7 (mm)	DEC8 (mm)	DEC9 (mm)	DEC10 (mm)	DEC11 (mm)	DEC12 (mm)	DEC13 (mm)	DEC14 (mm)	DEC15 (mm)	DEC16 (mm)	DEC17 (mm)	DEC18 (mm)	Total (mm)
1	6.88	171.99	Orge	non	0	0	0	0	2.83	0	0	3.36	0.28	3.63	0.15	0	2.29	8.34	0	0	0	0	20.88
2	6.62	165.56	Orge	non	0	0	0	0	3.53	0	0	4.45	0.36	4.17	0.16	0	2.36	7.71	0	0	0	0	22.72
3	20.71	517.81	Blé	non	0	0	0	0	0.08	0	0	0.43	0.05	0.84	0.04	0	0.65	2.94	0	0	0	0	5.02
4	5.62	140.46	Pois	non	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.02	0	0	0	0.44	0.46
5	12.42	310.55	Pois	non	0	0	0	0	0	0	0	0.44	0.04	0.01	0.00	0	0.01	0.09	0	0	0	0.22	0.34
6	11.43	285.67	Tournesol	non	0	0	0	0	0.41	0	0	0.55	0.06	1.05	0.03	0	0.42	1.92	0	0	0	2.14	5.98
7	11.67	291.76	Blé	non	0	0	0	0	0.21	0	0	0.55	0.06	1.05	0.03	0	0.93	4.26	0	0	0	0	7.12
8	6.08	151.93	Blé	oui	0	0	0	0	15.02	0	0	6.31	0.45	5.05	0.18	0	2.71	8.57	0	0	0	0	38.28
9	5.92	148.05	Pois	oui	0	0	0	0	7.06	0	0	5.55	0.44	5.10	0.19	0	2.86	9.18	0	0	0	6.71	37.09
10	7.35	183.69	Maïs	oui	0	0	0	0	8.64	0	0	5.82	0.45	5.21	0.19	0	2.81	8.90	0	0	0	6.46	38.48
11	4.23	105.8	Blé	oui	0	0	0	2.88	35.29	0	0	6.75	0.48	5.40	0.19	0	2.89	9.16	0	0	0	0	63.04
12	1.32	32.91	Arbustes	non	0	0	0	0	1.25	0	0	2.11	0.21	2.90	0.12	0	1.82	6.47	0	0	0	6.52	21.40
13	0.88	22.03	Pois	oui	0	0	0	0	1.32	0	0	2.43	0.23	3.07	0.14	0	2.04	7.34	0	0	0	6.39	22.95
Total	101.13	2528.2		Moyenne	0	0	0	0.1	4.0	0	0	2.2	0.2	2.2	0.1	0	1.3	4.6	0	0	0	1.3	15.9

Tableau 7.7 : Evaluation des quantités d'eau écoulée à la base du LA par décade et par parcelle pour l'hiver 1991-1992

Parcelle n°	Surface (ha)	Pixel (nb)	Occup93	Irrigation	DEC1 (mm)	DEC2 (mm)	DEC3 (mm)	DEC4 (mm)	DEC5 (mm)	DEC6 (mm)	DEC7 (mm)	DEC8 (mm)	DEC9 (mm)	DEC10 (mm)	DEC11 (mm)	DEC12 (mm)	DEC13 (mm)	DEC14 (mm)	DEC15 (mm)	DEC16 (mm)	DEC17 (mm)	DEC18 (mm)	Total (mm)
1	6.88	171.99	Pois	non	0	0	0	0	5.26	6.17	55.70	1.57	1.47	6.07	31.29	10.26	0	0	15.38	0	0	0	133.17
2	6.62	165.56	Jachère	non	0	0	0	0	4.43	6.64	48.33	1.37	1.28	5.29	27.27	8.94	0	0	13.41	0	0	0	116.95
3	20.71	517.81	Orge	non	0	0	0	0	0.79	2.14	38.19	1.20	1.12	4.64	23.91	7.84	0	0	11.75	0	0	0	91.57
4	5.62	140.46	Blé	non	0	0	0	0	0	0	16.09	1.23	1.16	4.87	25.54	8.37	0	0	12.56	0	0	0	69.81
5	12.42	310.55	Blé	non	0	0	0	0	0.01	0.06	28.86	1.17	1.09	4.52	23.30	7.64	0	0	11.46	0	0	0	78.10
6	11.43	285.67	Blé	non	0	0	0	0	1.38	1.71	41.36	1.45	1.35	5.60	28.89	9.47	0	0	14.20	0	0	0	105.41
7	11.67	291.76	Blé	non	0	0	0	0	3.39	5.29	47.64	1.36	1.27	5.25	27.06	8.87	0	0	13.30	0	0	0	113.42
8	6.08	151.93	Pois	oui	0	0	0	2.02	24.56	9.11	50.50	1.35	1.26	5.23	26.96	8.84	0	0	13.26	0	0	0	143.08
9	5.92	148.05	Blé	oui	0	0	0	9.46	35.34	9.82	54.47	1.46	1.36	5.64	29.08	9.53	0	0	14.30	0	0	0	170.47
10	7.35	183.69	Blé	oui	0.001	0	2.00	21.58	34.36	9.46	52.44	1.40	1.31	5.43	28.00	9.18	0	0	13.76	0	0	0	178.92
11	4.23	105.80	Blé	oui	0	0	0	7.06	34.50	9.74	53.99	1.45	1.35	5.59	28.83	9.45	0	0	14.17	0	0	0	166.12
12	1.32	32.91	Arbustes	non	0	0	0	0	5.79	6.36	65.49	1.87	1.74	7.23	37.25	12.21	0	0	18.31	0	0	0	156.25
13	0.88	22.03	Blé	oui	0	0	0	7.09	52.56	16.05	88.97	2.38	2.22	9.21	47.50	15.57	0	0	23.35	0	0	0	264.92
Total	101.13	2528.2		Moyenne	0.0	0	0.1	2.6	9.4	4.5	43.3	1.3	1.3	5.2	26.9	8.8	0	0	13.2	0	0	0	116.8

Tableau 7.8 : Evaluation des quantités d'eau écoulee à la base du LA par décade et par parcelle pour l'hiver 1992-1993

moyen dus aux parcelles irriguées est plus élevé (168,8 mm), et de même pour les parcelles non irriguées (100,2 m). Ainsi, le **rapport entre écoulements dus aux parcelles irriguées et écoulements dus aux parcelles non irriguées a tendance à diminuer** (5,5 en 1991-1992 contre 1,7 en 1992-1993) (tableau 7.8). Ce rapport rend compte de la contribution des parcelles irriguées aux écoulements, sur le secteur et en tenant compte de la surface des parcelles respectives, selon l'année climatique considérée. On remarque également que pour les **décades de début et de fin** de la période étudiée (décades 1, 2, 3, 16, 17 et 18) (octobre et mars), les écoulements sont quasiment **nuls**. Comme précédemment, il s'agit vraisemblablement de l'effet de la faible teneur en eau initiale pour les premières décades et de l'ETR élevée pour les dernières décades (tableau 7.8).

III-3.2 Distribution spatiale des quantités d'eau écoulée à la base du LA en fin d'hiver

1°) Année 1991-1992

La carte des quantités d'eau écoulée à la base du limon argileux pour l'année 91-92 montre les caractéristiques suivantes (figure 7.8) :

- **importance de l'épaisseur du sol** (en l'occurrence du LA). On constate en effet que les zones pour lesquelles le LA est le plus épais sont celles où les écoulements sont les plus faibles. Ainsi, on remarque la présence d'une vaste zone au centre du secteur pour laquelle les écoulements sont nuls. Cette zone correspond sensiblement aux sols les plus épais.

- **importance de l'effet parcellaire** qui se traduit surtout par la mise en évidence des parcelles irriguées durant la période estivale précédent la modélisation. On remarque que sur ces parcelles, situées au sud-ouest du secteur, les quantités d'eau écoulée à la base de la couverture limono-argileuse sont nettement plus élevées et peuvent atteindre 70 mm.

- **importance de la teneur en eau initiale** (en entrée d'hiver). Ceci est d'ailleurs à mettre en relation avec les pratiques culturales et surtout l'irrigation.

Les précipitations de l'année précédente (oct.90-oct.91) ne sont que légèrement déficitaires (68 mm par rapport à la normale) (ceci expliquant vraisemblablement l'existence d'une relation entre l'épaisseur du LA et la teneur en eau moyenne par profil en entrée d'hiver), mais en revanche, le déficit élevé des précipitations durant l'année 91-92 (235 mm entre oct.91 et oct.92) explique que les écoulements à la base du LA restent **faibles**.

2°) Année 1992-1993

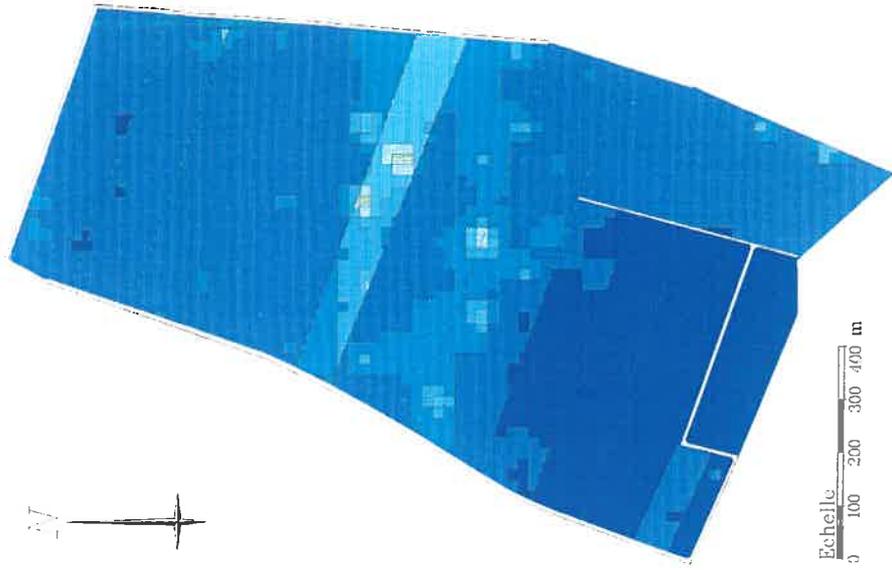
A l'opposé, la carte des quantités d'eau écoulée à la base du limon argileux pour l'année 92-93 témoigne d'écoulements **très nettement supérieurs** (figure 7.9). Ces quantités sont en grande majorité comprises entre **100 et 150 mm**. On constate, de la même manière que pour l'année précédente, l'importance de l'effet parcellaire, par la mise en évidence des parcelles irriguées dans le sud du secteur (quantités d'eau écoulées > 150 mm) et la présence



Quantité d'eau écoulée à la base du limon argileux en 91-92



Figure 7.8 : Carte des quantités d'eau écoulée à la base du limon argileux en septembre 1991



Quantité d'eau écoulée à la base du limon argileux en 92-93

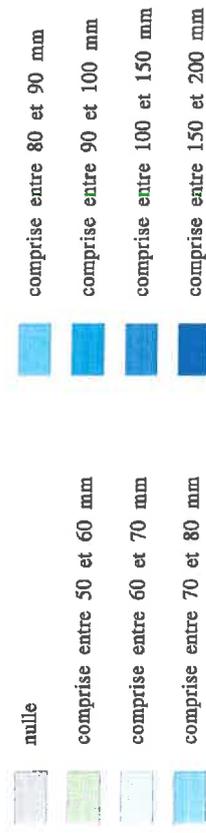


Figure 7.9 : Carte des quantités d'eau écoulée à la base du limon argileux en septembre 1992

d'une parcelle cultivée en pois dans le centre du secteur (quantités d'eau écoulées < 100 mm), l'importance de l'épaisseur du LA (la zone centrale, où l'épaisseur du LA est plus élevée, montre des écoulements plus faibles). Notons que l'important déficit pluviométrique de l'année 91-92 n'a pas eu d'incidence remarquable sur les écoulements à la base du LA en 92-93. Ceci vient très certainement du fait que les précipitations pour l'année 92-93 sont très faiblement déficitaires et proches de la normale (32 mm de déficit).

IV. CONCLUSION DU CHAPITRE 7

L'objectif de ce chapitre était d'établir un **bilan hydrique décadaire** de façon à calculer les quantités d'eau qui s'infiltrent à la **base de la couverture limono-argileuse** au cours de la **période hivernale** (du 1/10 au 31/03). Nous avons, dans un premier temps, analysé et discuté des variables climatiques nécessaires au calcul de ce bilan. Ainsi, nous avons discuté des précipitations hivernales, mesurées à la station de Bricy, et de l'ETR calculée sur sol nu et sur sol emblavé par le modèle BYM. Nous avons alors constaté que les hivers 90-91 et 92-93 étaient légèrement **déficitaires**, que l'hiver 91-92 était **très largement déficitaire** et que l'hiver 93-94 était très légèrement **excédentaire**.

Dans un deuxième temps, nous avons évalué la teneur en eau moyenne pondérale du limon argileux pour chaque période sur l'ensemble du secteur. Ces valeurs moyennes nous ont permis d'appréhender l'état **hydrique moyen** du système pour les périodes d'entrée et de sortie d'hiver. Nous avons ensuite analysé pour chaque période, la **répartition** de ces teneurs en eau moyenne sur chaque profil en fonction de l'occupation du sol par parcelle. Nous en avons déduit que, pour les mesures en sortie d'hiver (fin mars), la réhumectation du LA durant l'hiver, sur le secteur d'étude, dépend de l'antécédent cultural et plus précisément de l'irrigation estivale. En revanche, en situation non irriguée, la réhumectation du LA se fait de manière **quasi-homogène** quelle que soit l'occupation du sol. En ce qui concerne les mesures en entrée d'hiver (fin septembre), on remarque que les teneurs en eau moyennes **varient sensiblement** pour un même mode d'occupation du sol et qu'**aucune variation ordonnée** n'a pu être mise en évidence en relation avec ce mode d'occupation, excepté pour les parcelles irriguées durant la période estivale qui possèdent des teneurs en eau plus élevées.

Dans un troisième temps, nous avons examiné les relations entre les teneurs en eau en entrée d'hiver et l'épaisseur de la couverture limono-argileuse. Nous avons montré qu'il existe bien une relation entre la teneur en eau et l'épaisseur du LA, mais que cette relation **dépend de l'année climatique considérée**. Ainsi, une telle relation existe pour les mesures de teneur en eau réalisées septembre 1991, mais pas pour celles effectuées en septembre 1992. Nous avons alors attribué cette différence au très fort déficit pluviométrique de l'année 1991-1992

(oct.91 à oct.92) par rapport à l'année 1990-1991 (oct.90 à oct.91) pour laquelle ce déficit est trois fois moins élevé.

Puis, nous avons exposé le modèle de bilan hydrique utilisé dans ce travail. Nous avons alors évalué les réserves hydriques initiales et finales nécessaires au calcul de ce bilan en tenant compte de facteurs tels que **l'occupation du sol**, les **antécédents cultureaux** et **l'épaisseur de la couverture de sol**. Nous avons ensuite spatialisé ces réserves hydriques sur l'ensemble du secteur d'étude par des méthodes différentes selon l'année climatique considérée. Enfin, nous avons discuté de la nature des variables employées dans le modèle de bilan hydrique et nous les avons intégrées au sein d'un Système d'Information Géographique pour estimer les quantités d'eau écoulées à la base du limon argileux en période hivernale. Les résultats obtenus ont été présentés sous forme de tableau pour les quantités d'eau écoulées par décennie et sous forme de carte pour les quantités d'eau percolées à la base du limon argileux à la fin des deux hivers étudiés.

Ces résultats ont montré **l'importance de l'épaisseur du sol** qui conditionne les écoulements dans la mesure où les zones pour lesquelles le LA est le moins épais sont celles où les écoulements sont les plus élevés ; **l'importance de l'effet parcellaire** qui se traduit surtout par la mise en évidence des parcelles irriguées durant la période estivale précédant la modélisation. Ainsi, sur ces parcelles, les quantités d'eau écoulée à la base de la couverture limono-argileuse sont toujours plus élevées ; **l'importance de la teneur en eau initiale** (en entrée d'hiver en relation avec les pratiques culturelles et l'irrigation) qui conditionne bien évidemment toute la modélisation et enfin, **l'importance des conditions climatiques** (pluie et ETR) qui influe de manière prépondérante sur les quantités d'eau écoulées selon l'année considérée.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette étude était de discuter l'importance qu'il faut attacher aux variations d'épaisseur de la couverture de sol et à celles de son état hydrique au début de l'hiver pour l'étude de la recharge hivernale de la nappe phréatique des calcaires de Beauce. Un secteur d'étude de 100 ha a par conséquent été choisi en Petite Beauce. Le choix de cette région naturelle réside dans le fait qu'elle constitue un milieu particulièrement sensible aux problèmes de gestion quantitative et qualitative de l'eau. La faible profondeur de l'aquifère (nappe des calcaires de Beauce), la faible épaisseur des sols, le caractère intensif des cultures et l'irrigation quasi généralisée font de cette partie de la Beauce un terrain d'expérimentation adéquat.

Pour mener à terme cette étude, nous avons procédé en **trois étapes**. Dans une première étape, nous avons étudié de façon détaillée les **sols du secteur d'étude** préalablement délimité et décrit. Lors d'une deuxième étape, nous nous sommes attachés à évaluer le plus précisément possible **l'épaisseur des différentes formations** rencontrées sur le secteur d'étude. Plusieurs méthodes de mesure de l'épaisseur ont été employées puis comparées et la spatialisation de l'épaisseur a été réalisée en utilisant des méthodes d'interpolation non probabiliste et probabiliste. Enfin, lors d'une troisième étape, **nous avons calculé la lame d'eau drainée par le sol dans le secteur d'étude** et ceci en prenant en compte différentes variables de type pédologique, climatique, agronomique et hydrologique.

Dans une **première partie**, l'étude de fosses pédologiques et de sondages à la tarière a mis en évidence la **présence de quatre grands types de matériaux**. Un **matériau limono-argileux supérieur (LA)** dans lequel se développe le sol actuel, un ensemble intermédiaire constitué de **matériaux calcaires cryoturbés très hétérogènes** dont la nature varie avec celle des calcaires qui ont été remaniés et un ensemble inférieur qui correspond aux premiers **niveaux calcaires non ou peu affectés par la cryoturbation**. Enfin, des **matériaux argileux à sables grossiers**, localement intercalés entre le matériau limono-argileux supérieur et des calcaires non affectés par la cryoturbation, sont présents au niveau de dépressions d'origine vraisemblablement karstique. Rappelons à propos de ces matériaux argilo-sableux que rien dans la topographie, ni la morphologie du terrain ne permet de présager de leur présence. **Ils sont inscrits en "négatif" dans la topographie.**

Les observations morphologiques et les analyses physico-chimiques réalisées en de nombreux points du secteur montrent que le sol actuel qui s'est développé dans le matériau limono-argileux supérieur est, pour l'essentiel, **faiblement différencié**. Seul le profil vertical des teneurs en calcaire est **nettement différencié**, la partie supérieure du sol étant généralement décarbonatée et sa partie inférieure présentant fréquemment un encroûtement calcaire. **A l'échelle du secteur, la couverture de sol apparaît par conséquent pouvoir être assimilée à la couverture du matériau limono-argileux dont l'épaisseur est très variable alors que sa constitution varie très peu sur l'ensemble du secteur.** Quant aux matériaux argileux à sables grossiers, ils sont caractérisés par une **absence totale de carbonates**, par des textures soit plus argileuses, soit plus sableuses que pour les matériaux limono-argileux supérieurs et par la présence, dans la partie supérieure, de **très nombreux grains de quartz sub-automorphes à éclat gras**. De manière générale, **pour les matériaux argileux à sables grossiers, la teneur en argile décroît avec la profondeur alors que croît celle en sable grossier**. Du point de vue morphologique, la couleur de ces matériaux présente des teintes plus rougeâtres par rapport aux matériaux limono-argileux supérieurs.

Les variations d'épaisseur de la couverture limono-argileuse et des matériaux argilo-sableux

La **deuxième partie** de cette étude a permis de rendre compte des variations d'épaisseur du recouvrement limono-argileux, ainsi que de l'extension et de l'épaisseur des matériaux argileux à sables grossiers. La couverture de sol se confondant avec le recouvrement limono-argileux, l'étude des **variations d'épaisseur** de ce recouvrement revient à étudier celles de la formation limono-argileuse. Après un rappel des différentes méthodes d'interpolation employées, nous avons analysé la structure spatiale de la variable "épaisseur du LA" et montré **l'imbrication de deux structures** correspondant à une superposition de variabilités d'échelles différentes. L'analyse a aussi montré **l'absence d'anisotropie** dans la variabilité de l'épaisseur du LA et un **effet de pépite qui représentent 15% de la variance totale**. Nous avons ensuite

évalué l'épaisseur de la couverture limono-argileuse sur l'ensemble du secteur d'étude par krigeage pour aboutir à une carte des isopaches du LA et à l'évaluation des écarts-types d'estimation qui restent d'ailleurs élevés (22 cm). La recherche de la densité d'échantillonnage optimale a montré qu'un **échantillonnage plus resserré** (25m x 25m) que celui déjà réalisé, est nécessaire pour diminuer ces écarts-types.

Plutôt que de procéder à de nouveaux sondages à la tarière pour effectuer un échantillonnage complémentaire et de diminuer ainsi les écarts-types d'estimation, nous avons choisi de mettre en oeuvre des méthodes qui procèdent de la géophysique. Nous avons alors comparé les épaisseurs du LA mesurées par **sondage à la tarière et par sondage électrique** et montré que **les résultats obtenus par ces deux méthodes ne sont pas significativement différents**. Une **généralisation des méthodes électriques** est alors possible pour atteindre la densité optimale d'échantillonnage sur le secteur d'étude et il y a de fortes chances que cela soit également le cas pour de nombreuses autres situations en Petite Beauce.

La démarche suivie pour étudier **l'extension latérale et verticale des matériaux argilo-sableux** a consisté à déterminer à l'aide d'une **prospection électrique** le toit de la formation calcaire sous-jacente, puis à soustraire l'épaisseur des formations limono-argileuses déterminée précédemment par krigeage. La carte en isovaleurs d'épaisseur ainsi obtenue a permis de mettre en évidence **deux structures** dans lesquelles sont rencontrés les matériaux AS. Ces matériaux argilo-sableux seraient des **matériaux de remplissage de dépressions d'origine karstique** comme le confirme l'analyse bibliographique.

En ce qui concerne les **aspects méthodologiques**, l'analyse variographique des épaisseurs du limon argileux et l'utilisation de méthode probabiliste (krigeage) pour leur interpolation ne constituent certes pas des éléments nouveaux, mais ont toutefois permis **d'évaluer la précision de l'estimation** des données et de **justifier ainsi pleinement l'emploi des méthodes géophysiques** (sondages électriques). L'emploi de **sondages électriques croisés** de façon perpendiculaire aurait pu se révéler être un bon outil pour la détermination d'une éventuelle **anisotropie** dans la distribution spatiale de l'épaisseur du LA. Une telle méthode pourra dans un autre contexte donner des résultats plus significatifs. Quant à l'utilisation de la méthode des **trainés électriques** pour évaluer l'extension des matériaux argileux à sables grossiers intercalés entre le limon argileux et le calcaire de Beauce, elle a permis la cartographie d'une variable sous-échantillonnée (profondeur des MASG) à partir d'une variable échantillonnée de façon plus systématique (résistivité électrique apparente). Remarquons ici que l'utilisation du **cokrigeage** (généralisation du krigeage au cas multivariable) pour passer des données de résistivité électrique apparente au profondeur des MASG aurait été possible de manière à prendre en compte l'effet spatial entre les deux variables. Mais l'obtention de résultats hautement significatifs par les méthodes classiques de régression linéaire, permet de ne pas employer le cokrigeage car le risque de redondance de données serait alors trop élevé (Chauvet, 1992).

Au niveau des **résultats obtenus et des perspectives qui s'en dégagent**, l'absence de différences significatives entre les mesures d'épaisseur du LA mesurées par sondages électriques et par sondages à la tarière permet d'envisager non seulement une **automatisation des méthodes électriques**, mais aussi l'utilisation de **méthodes électro-magnétiques (EM31)** qui s'avèrent, après essai, aussi fiables, plus rapides et moins coûteuses en main d'oeuvre. De telles méthodes pourront être envisagées non seulement au niveau du secteur d'étude mais également au niveau de la Petite Beauce tant les caractères de la couverture de sol se révèlent homogènes.

Drainage hivernal de la couverture limono-argileuse

La **troisième partie** est consacrée à l'analyse du fonctionnement hydrique hivernal de la couverture de sol et plus particulièrement à l'étude du drainage hivernal de cette couverture. L'analyse a été menée pour les deux hivers 91-92 et 92-93, entre les mois d'octobre et de mars et conduit au calcul des quantités d'eau qui s'infiltrent à la **base de la couverture limono-argileuse** au cours de la **période hivernale**.

Après avoir mesuré la teneur en eau en de nombreux points de la couverture limono-argileuse en entrée et sortie d'hiver, nous avons analysé, la relation entre la teneur en eau moyenne de chaque profil et le mode d'occupation du sol. Nous en avons déduit que, pour les années climatiques considérées et sur le secteur d'étude, **l'état hydrique en sortie d'hiver (fin mars) est lié à l'irrigation estivale**. En revanche, en situation non irriguée, la réhumectation du LA se fait de manière **quasi-homogène** quelle que soit l'occupation du sol. En ce qui concerne les mesures en entrée d'hiver (fin septembre), on remarque que les teneurs en eau moyennes **varient sensiblement** pour un même mode d'occupation du sol et qu'**aucune variation ordonnée** n'a pu être mise en évidence en relation avec ce mode d'occupation, excepté pour les parcelles irriguées durant la période estivale qui possèdent des teneurs en eau plus élevées.

Puis nous avons montré qu'il existe une **relation entre la teneur en eau moyenne et l'épaisseur du LA**, mais que cette relation **dépend de l'année climatique considérée**. Ainsi, une telle relation existe pour les mesures de teneur en eau réalisées en septembre 1991, mais pas pour celles effectuées en septembre 1992. Nous avons alors attribué cette différence au très fort déficit pluviométrique de l'année 1991-1992 (oct.91 à oct.92) par rapport à l'année 1990-1991 (oct.90 à oct.91) (déficit trois fois moins élevé), dans la mesure où un fort déficit nivelle les variations de teneurs en eau moyennes.

Les réserves hydriques initiales et finales nécessaires au calcul du bilan hydrique ont alors été évaluées en tenant compte de facteurs tels que **l'occupation du sol, les antécédents cultureux et l'épaisseur de la couverture de sol**. Puis, nous avons spatialisé ces réserves hydriques sur l'ensemble du secteur d'étude. Enfin, nous avons discuté de la nature des

variables employées dans le modèle de bilan hydrique pour être intégrées au sein d'un Système d'Information Géographique afin d'estimer les quantités d'eau écoulées à la base du limon argileux en période hivernale.

Une telle démarche n'apporte que peu d'éléments nouveaux à l'échelle du bilan hydrique local. En revanche, à l'échelle du secteur d'étude, des résultats originaux peuvent être avancés. Le calcul d'un bilan hydrique de parcelle à partir d'un profil n'a pas de sens pour des parcelles où l'épaisseur du sol et son état hydrique varient autant que sur l'ensemble du secteur. Nous avons donc croisé variation d'épaisseur du LA et variation d'état hydrique pour réaliser ce bilan. Les variations d'épaisseur du LA constituent une caractéristique importante de la couverture de sol dans la mesure où elles interviennent directement dans le bilan hydrique de deux façons, par leurs conséquences en terme de variation de la géométrie du réservoir et en terme de gestion de l'irrigation et d'état hydrique au début de l'hiver.

Mais l'épaisseur de la couverture de sol n'est pas le seul facteur important pour le calcul du bilan hydrique. On constate aussi **l'importance de l'effet parcellaire** qui est lié aux pratiques d'irrigation. Ainsi, sur les parcelles irriguées durant la période estivale, les quantités d'eau écoulée pendant l'hiver à la base de la couverture limono-argileuse sont toujours plus élevées.

Au terme de ce travail, nous pouvons souligner les points essentiels qui s'en sont dégagés et les différentes perspectives envisageables. Mettons, dans un premier temps, l'accent sur les **aspects pédologiques**. L'étude de fosses et de sondages à la tarière a montré que les **matériaux argileux à sables grossiers (MASG)** décrits dans les notices de cartes géologiques sous la forme de placages de dimensions kilométriques puis identifiés par Isambert et Duval (1992) en Petite Beauce lors de prospections pédologiques pourraient, comme sur le secteur d'étude, n'être que d'extension hectométrique tout en se développant sur plusieurs mètres d'épaisseur. Ces matériaux paraissent avoir comblé **des structures d'origine karstique**.

Un des résultats les plus intéressants de ce travail est **de montrer la variabilité élevée de l'épaisseur du LA**. Face à une telle variabilité, deux attitudes sont envisageables. Une première attitude consiste à développer des méthodes qui permettent de mesurer directement l'épaisseur du LA en tout point (ou du moins avec une densité de mesure élevée). Ceci serait alors pertinent pour des études détaillées comme celle menée dans ce travail. Ainsi, la **spatialisation de la variable "épaisseur du LA"**, permettrait d'envisager l'étude détaillée du potentiel de développement des systèmes racinaires du blé et du maïs. En effet, l'étude de ces systèmes racinaires a montré que le pouvoir de pénétration des racines est proportionnel à l'épaisseur du LA en Petite Beauce (Nicoulaud *et al.*, 1994). Ainsi, l'épaisseur du LA est un des facteurs primordiaux expliquant la variabilité des systèmes racinaires.

En revanche, comment réaliser la même démarche à plus petite échelle et donc sur des surfaces plus importantes? Comment discuter des variations d'épaisseur à l'échelle de la Petite Beauce? Bourennane (1992) a montré, sur un secteur de 3350 ha en Petite Beauce, qu'il existe une relation entre l'épaisseur du LA et l'orientation de la pente, ce dernier critère étant issu d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). **Ainsi, serait-il possible de cartographier l'épaisseur du LA à partir d'une variable sur-échantillonnée issue de données d'accès relativement facile (MNT).** Des techniques de géostatistiques multivariées, tel que le cokrigage ou la dérive externe, pourraient être alors employées.

L'utilisation d'un **modèle de bilan hydrique** apparenté au modèle de Choisnel et l'emploi d'un **modèle d'infiltration selon la loi du tout ou rien** se justifie dans la mesure où à des moyenne et petite échelles, nous ne pouvons utiliser que des modèles ne nécessitant que peu de données et que celles-ci soient, autant que possible, aisément accessibles. Par ailleurs, un tel modèle, qui a fait l'objet de comparaisons avec des modèles de type plus déterministe dans les travaux de Ould-Mohamed (1995), montre que, pour des sols de Petite Beauce analogues à ceux étudiés, **le modèle de type analogique que nous avons utilisé, conduit à des résultats comparables à ceux obtenus à l'aide d'un modèle mécaniste basée sur la loi de Richards.** Les résultats sont néanmoins sensiblement différents pour des années climatiques particulièrement sèches comme l'a été l'année 91-92. En effet, dans ce cas, il sous-estime les phénomènes de remontées capillaires. Ainsi, les quantités drainées vers l'aquifère seront alors plus élevées que celles calculées par un modèle déterministe.

Enfin, la prise en compte de **l'ensemble des variables au sein d'un Système d'Information Géographique** constitue un aspect méthodologique relativement nouveau et exploité par seulement quelques auteurs (Seguin 1986, 1987, 1988). Ceci permet d'intégrer au sein d'unités représentatives (à travers la notion d'Unités Spatiales d'Intégration) des variables de nature et d'échelle différentes.

BIBLIOGRAPHIE

- Akima I., (1978).** A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points. Institute for Telecommunication Sciences. ACM Transactions on Mathematical Software, 4, 2, pp. 148-159.
- Alemi M.H., Shahriari M.R. & Nielsen D.R., (1988).** Kriging and cokriging of soil water properties. Soil Technology, 1, pp. 117-132.
- Andrieux P., Cabidoche Y.M., Jaillard B., Lucas Y. & Boulet R., (1986).** Dynamique de l'eau dans un système de sols à forte différenciation latérale (Plaine côtière ancienne, Guyane française). Science du Sol, 3, 24, pp. 285-299.
- 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, S.E.S.C.P.F-INRA, Orléans, 185p.
- Baize D., (1989).** Guide des analyses courantes en pédologie. INRA, Paris, 172p.
- Baize D. & Girard M.C., (1990).** Brunisols et sols calcimagnésiens. *In* : Référentiel Pédologique Français, A.F.E.S., pp. 83-91.
- Baize D. & Girard M.C., (1992).** Référentiel pédologique des principaux sols d'Europe. INRA Editions, 174 p. et annexes.
- Baize D. & Girard M.C., (1995).** Référentiel pédologique des principaux sols d'Europe. INRA, à paraître.
- Boivin P., (1988).** Géostat-PC : Logiciel interactif pour calcul géostatistique. Notice d'utilisation. Orstom Bondy, 69 p.
- Bottraud J.C., (1983).** Résistivité électrique et étude de sols. Applications à la cartographie et à la caractérisation du fonctionnement hydrique. Thèse de Docteur-Ingénieur, U.S.T.L. Montpellier, 191 p.
- Bottraud J.C., Bornand M. & Servat E., (1984).** Mesures de résistivité appliquées à la cartographie en pédologie. Science du Sol, 4, pp. 279-294.
- Bourennane H., (1992).** Analyse et modélisation de la distribution spatiale d'un volume pédologique d'après des critères morphométriques. Application au limon-argileux sur un secteur de Beauce. D.E.A. Géosciences filière Pédologie, Université de Nancy I.

- Bourennane H., King D., Isambert M., Duval O., & Chéry P., (1992).** Analyse et modélisation de la distribution spatiale d'un volume pédologique d'après des critères morphométriques. Application au limon argileux sur un secteur de Beauce. *Troisièmes Journées Nationales de l'étude des sols*, AFES-EPFL, Lausanne, 8-10/09/92.
- Bratney Mc A.B., Webster R., & Burgess T.M., (1981a).** The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables - I. Theory and Method. *Computers & Geosciences*, 7, 4, pp. 331-334.
- Bratney Mc A.B. & Webster R., (1981b).** The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables - II. Program and examples. *Computers & Geosciences*, 7, 4, pp. 335-365.
- Bratney Mc A.B., Webster R., McLaren R.G. & Spiers R.B. (1982).** Regional variation of extractible copper and cobalt in the topsoil of south-east Scotland. *Agronomie*, 2, 10, pp. 969-982.
- Bratney Mc A.B. & Webster R., (1986).** Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. *Journal of Soil Science*, 37, pp. 617-639.
- Bregt A.K., Bouma J., & Jellinek M., (1987).** Comparison of thematic maps derived from soil map and from kriging of point data. *Geoderma*, 39, pp. 281-291.
- Bresler E., Dagan G., Wagenet R.J., & Laufer A., (1984).** Statistical analysis of salinity and texture effects on spatial variability of soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 48, pp. 16-25.
- Brisson N., (1989).** Modèle de simulation de la culture du soja et de son fonctionnement hydrique. Estimation agrométéorologique des potentialités de production. Thèse de Doctorat, I.N.A.P.G., 90 p. et annexes.
- Brisson N. & Perrier A., (1991).** A semiempirical model of bare soil evaporation for crop simulation models. *Water Resources Research*, 27, 5, pp. 719-727.
- Brisson N. & Ripoche D., (1991).** B.Y.M. version 1.1 : Bilan hydrique adapté aux modèles de culture. Notice d'utilisation du programme. INRA, Bioclimatologie-SteFce, 121 p.
- Brisson N., Seguin B. & Bertuzzi P., (1992).** Agrometeorological soil water balance for crop simulation models. *In* : B.Y.M. version 1.1 : Notice d'utilisation du programme, pp. 2-17.
- Brisson N., King D., Nicoulaud B., Ruget F., Ripoche D. & Darthout R., (1992).** A crop model for land suitability evaluation : a case study of the maize crop in France. *European Journal of Agronomy*, 1, 3, pp. 163-175.
- Brochet P. & Gerbier N., (1974).** L'évapotranspiration : aspects agrométéorologiques. Evaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle. Monographie N°65 de la Météorologie Nationale, 1975, 95 p.

- Brochet P. & Gerbier N., (1977).** Une méthode opérationnelle pratique de calcul de l'évapotranspiration potentielle. *La Météorologie*, N° Spécial "Evapotranspiration", 6, 11, pp. 25-31.
- Bouchet R.J., (1964).** Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. *In* : L'eau et la production végétale, INRA Paris, pp. 152-232.
- Cabidoche Y.M. & Servant J., (1980).** Etudes agro-pédologiques des fermes de Guyane. Fermes de Combi et de St Elie. Multigraphié, INRA - C.R.A.A.G., Guadeloupe, 16 p.
- Cámara-D. O.A. & Cluis D., (1992).** Variabilité spatiale des propriétés physico-chimiques d'un champ affecté par la salinité dans le Nord-Ouest du Mexique. *Pédologie*, XLII-2, pp. 183-203.
- Chauvet P., (1992).** Traitement des données à support spatial : la géostatistique et ses usages. Ecole des Mines de Paris, Centre de géostatistique, Fontainebleau, 43 p. et annexes.
- Chéry P., (1990).** Modélisation spatiale de la sensibilité au ruissellement et à l'érosion. Recherche sur la combinaison de données cartographiques du milieu. D.E.A fédéral de Pédologie, Université de Paris VI et S.E.S.C.P.F. - INRA d'Orléans. 30 p., annexes et cartes.
- Chéry P., Le Bissonnais Y., King D. & Daroussin J., (1991).** Définition et délimitation des Unités Spatiales de Fonctionnement (U.S.F.) du ruissellement et de l'érosion. *In* : Gestion de l'espace rural et Système d'Information Géographique, INRA, Florac, 22-24 Octobre 1991, pp. 133-147.
- Chéry P., Dabas M. & Bruand A., (1993).** Environnement et géophysique en Beauce : La pollution de la nappe phréatique par les nitrates. Géophysique appliquée aux problèmes d'environnement, 19-20 Novembre 1993, C.R.G. Garchy (58).
- Chéry P., Dabas M., Bruand A. & Arrouays D., (1994).** Cokriging electrical resistivity for detailed study of soil thickness variability : a case study in Beauce area (France). Characterization and monitoring of the subsurface using modern geophysical techniques, European Geophysical Society; XIX General Assembly, 25-29 April 1994, Grenoble (38).
- Chéry P., Dabas M., Bruand A., Voltz M. & Arrouays D., (1994).** Kriging electrical conductivity determinations for detailed study of soil thickness variability. A case study using GIS tools in Beauce area (France). 15th International Congress of Soil Science (Poster session). Acapulco, Mexico, July 10-16 1994.
- Chéry P., Dabas M., Bruand A. & Voltz M., (1996).** Epaisseur de la couverture de sol et prospection géophysique par des méthodes électriques : étude de cas en Petite Beauce. *Géologues* (accepté, parution prévue : mars 1996).
- Choisnel E. (1977).** Le bilan d'énergie et le bilan hydrique du sol. *La Météorologie*, N° Spécial "Evapotranspiration", 6, 11, pp. 103-109.

- Choisnel E. (1985).** Un modèle agrométéorologique opérationnel de bilan hydrique utilisant des données climatiques. *In* : Les besoins en eau des cultures. Conférence internationale. Paris, 11-14 septembre 1984. INRA, Paris, pp. 115-132.
- CORPEN** : 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.
- Cressie N.A.C., (1991).** Statistics for spatial data. Wiley series in probability and mathematical statistics. Wiley-Interscience Publication, New-York.
- Dabas M., Hesse A., Jolivet A. & Tabbagh A., (1989).** Intérêt de la résistivité électrique pour la connaissance du sol à grande échelle. *Science du Sol*, 27, 1, pp. 65-68.
- Dabas M., (1992).** Projet Villamblain - Géophysique. Rapport intermédiaire CNRS Janvier 1992, Centre de Recherches Géophysiques de Garchy, 8 p. et figures.
- Dabas M., (1993).** Projet Villamblain. Rapport définitif CNRS Octobre 1992, Centre de Recherches Géophysiques de Garchy, 62 p.
- Dagnélie P., (1980).** Théorie et méthodes statistiques, Vol.1. Editions Presses Agronomiques de Gembloux, 378 p.
- Daroussin J., Bourennane H., King D., Isambert M. & Duval O., (1992).** Deriving spatial occurrence of a pedological horizon from morphometrical parameters. *European Arc/Info User Conference*, 5-7/10/1992, Madrid, 12 p.
- De Jong R., (1984).** Soil water models : a review. Land Resource Research Institute. Contribution n°123, Agriculture Canada, Research Branch, Ontario, Canada. 39 p.
- Delhomme J.P., (1976).** Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Docteur-Ingénieur, E.N.S.M. de Paris, 130 p.
- Desprez N., (1973).** L'hydrogéologie des formations lacustres en Beauce et en Sologne. *In* : Le Calcaire de Beauce. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Spécial U, 78 p.
- Desprez N. & Mégnien C., (1965).** Connaissances nouvelles sur la structure de la Beauce. Bulletin de la Société Géologique de France, 7-VII, pp. 303-308.
- Edwards L.S., (1977).** A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. *Geophysics*, 42, pp. 1020-1036.
- Englund E. & Sparks A., (1988).** GEO-EAS (GEOstatistical Environmental Assessment Software) User's guide. U.S. Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada 89193-3478.

- ESRI : Arc/Info User's guide (1991).** Version 6.0. Surface modelling with TIN. Surface analysis and display.
- FAO - UNESCO, (1989).** Carte Mondiale des Sols : Légende révisée. Rapport sur les Ressources en Sols du Monde, Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome 1989, 120 p.
- Fisher R.A., (1924).** Procedure Int. Mathematics, Conférence de Toronto, 805.
- Gascuel-Odoux C., (1984).** Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydrique du sol. Thèse de Docteur-Ingénieur, E.N.S.M. Fontainebleau & ENSA-INRA Rennes, 235 p.
- Gascuel-Odoux C., (1987).** Variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol, méthodes et résultats ; cas d'une seule variable : revue bibliographique. Agronomie, 1987, 7, 1, pp. 61-71.
- Gascuel-Odoux C., Walter C., Voltz M., (1993).** Intérêt du couplage des méthodes géostatistiques et de cartographie des sols pour l'estimation spatiale. Science du Sol, 31, 4, pp. 193-213.
- Gautier J.P., Legros J.P., Bornand M., King D., Favrot J.C. & Hardy R., (1993).** L'organisation et la gestion des données pédologiques spatialisées : le projet DONESOL. Revue de Géomatique, 3, pp. 235-253.
- Gigot Cl. & Fedoroff N., (1973).** Notice explicative de la carte géologique au 1/50.000^{ème}. Feuille de Patay (XXI-19), B.R.G.M, Orléans.
- Gigout M., (1973).** L'altération périglaciaire du calcaire de Beauce. *In* : Le Calcaire de Beauce. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Spécial U, 78 p.
- Gonzalez R., (1991).** Etude de l'organisation et évaluation des échanges entre la Loire moyenne et l'aquifère des calcaires de Beauce. Thèse d'hydrogéologie, Université d'Orléans, 201 p.
- Goovaerts P., Gérard G., & Frankart R., (1989).** Etude de la variabilité spatiale de quelques propriétés chimiques du sol en fagne de Chimay, Belgique. Pédologie, XXXIX-2, pp. 191-207.
- Goulard M., Voltz M. & Monestiez P., (1987).** Comparaison d'approches multivariées pour l'étude de la variabilité spatiale des sols. Agronomie, 7, 9, pp. 657-665.
- Guérin R., (1992).** Du traitement spatial des données électromagnétiques dans un champ primaire quasi uniforme. Application à la méthode magnétotellurique, à la MT-VLF et au courant continu. Thèse de Doctorat de l'Université de Paris VI.
- Gutjahr A. (1984).** Spatial variability: geostatistical methods. Proceedings of a workshop on the ISSS and the SSSA. Las Vegas U.S.A. Pudoc Wageningen, pp. 9-31.

- Hallof P.G., (1957).** On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. Thesis, MIJ, Cambridge, MA (unpubl.).
- Hansen R.O., (1993).** Interpretive gridding by anisotropic kriging. *Geophysics*, **58**, 10, pp. 1491-1497.
- Hesse A., (1966).** Prospections géophysiques à faible profondeur, applications à l'archéologie, Dunod, Paris, pp. 1-149.
- Hesse A. & Rekacewicz O., (1990).** Ampleur et répartition des formations superficielles dans le vallon de l'Airette. In : L'érosion sur les hautes terres du lingas. Un processus naturel, une production sociale, Muxart T., Cosandey C. et Billard A., Editions CNRS, Mémoire Doc. Géogr. (Paris), pp. 33-43.
- Hillel D., (1988).** L'eau et le sol. Principes et processus physiques. Editions Academia, Coll. Pedasup 5, Louvain-la-Neuve, 288 p.
- Hubert J., (1983).** Climatologie du Loiret : Commission météorologique départementale du Loiret. 59 p.
- Hutchinson P. & Valley W.J. (1972).** Calculation of areal rainfall using finite element techniques with altitudinal corrections. *Bulletin Interne de l'Association Scientifique Hydrologique*, XVII, 3, pp. 259-272.
- Iris J.M., (1986).** Analyse et interprétation de la variabilité spatiale de la densité apparente dans trois matériaux ferrallitiques. *Science du sol*, **24**, 3, pp. 245-256.
- Isambert M., (1984).** Notice explicative de la carte pédologique de France au 1/100.000^{ème}. Feuille de Châteaudun : Publication n°13, I-9. INRA, Paris, 259 p.
- Isambert M. & Duval O., (1992).** Notice explicative de la carte pédologique de Villamblain (Beauce) au 1/10.000^{ème}. Contrat de recherche site expérimental de Villamblain. Rapport période 1991-1992. S.E.S.C.P.F. INRA, 38 p. et annexes.
- ISATIS, The Geostatistical Key - Notice d'utilisation (1993-1994).** Ecole des Mines de Paris - Géovariances.
- Jamagne M., (1972).** Caractères micromorphologiques des sols développés sur formations limoneuses. *Bulletin A.F.E.S.*, pp. 9-32.
- Jordana S., (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, 67 p.
- Journel A.G. & Huijbregts C.J., (1978).** Mining geostatistics. Academic Press New York. 600 p.

- Journel A.G. (1984).** The place of non parametric geostatistics. *Geostatistics for Natural Resources Characterization. Part I.*, G. Verly *et al.* Eds, pp. 307-335.
- King D., Hardy R., Le Bissonnais Y., Chéry P., (1991).** Evaluation spatiale de la sensibilité à l'érosion hydrique des terres agricoles de la région Nord-Pas-de-Calais. INRA / S.E.S.C.P.F. - Conseil Régional de la région Nord - Pas-de-Calais, 208 p.
- Lafolie F., Cockborne A.M. & Delacourt A., (1991).** Modélisation des transferts de nitrates en sol hétérogène : utilisation d'un modèle à fonction de forme. *In : Nitrates, Agriculture, Eau. Réunion internationale, Paris-La Défense, 7-8/11/90*, pp. 275-280.
- Lamotte M., (1993).** Les sols sableux à forte cohésion des zones tropicales arides. Etude du hardé Lagadgé au Nord-Cameroun. Thèse de Doctorat de l'Université de Paris VI, spécialité Pédologie, 281 p.
- Laslett G.M., Bratney Mc A.B., Pahl P.J., & Hutchinson M.F. (1987).** Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *Journal of Soil Science*, **38**, pp. 325-341.
- Lasne E., (1992).** Etude du système hydrologique karstique des Sources des Trois Fontaines (St Loup de Gonois - Loiret). Thèse Université d'Orléans, Géosciences.
- Leenhardt D., (1991).** Spatialisation du bilan hydrique. Propagation des erreurs d'estimation des caractéristiques du sol au travers des modèles de bilan hydrique. Cas du blé dur d'hiver. Thèse de 3^{ème} cycle E.N.S.A. Montpellier, 129 p.
- Lorain J.M., (1973).** La géologie du calcaire de Beauce. *In : Le Calcaire de Beauce. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Spécial U*, 78 p.
- Macaire J.M., (1971).** Etude sédimentologique des formations superficielles sur le tracé de l'autoroute A10 entre Artenay et Meung / Loire. Thèse 3^{ème} cycle Université d'Orléans, 104 p.
- Macaire J.M., (1972a).** Sur le limon de la Beauce au Nord-Ouest d'Orléans (Loiret). *Comptes Rendus à l'Académie des Sciences, Paris, tome 274*, pp. 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**, pp. 37-41.
- Manivit J., (1982).** Notice explicative de la carte géologique au 1/50000^{ème}. Feuille de Cloyes-sur-le-Loir (361), (XX-19), B.R.G.M, Orléans.
- Mariotti A. & Landreau A., (1986).** Etude du transfert et de l'évolution des nitrates dans les aquifères au moyen du traçage isotopique naturel ¹⁵N. *Hydrogéologie*, n°1, pp. 77-86.
- Matheron G., (1965).** Les variables régionalisées et leur estimation. Editions Masson & Cie, Paris.

- Matheron G., (1970).** La théorie des variables régionalisées et ses applications. Les cahiers du C.M.M., fasc.5.
- Matheron G., (1971).** La théorie des F.A.I.G. Note géostatistique n°117, Ecole des Mines de Paris, C.M.M., N-252.
- Mégnien Cl., (1976).** Hydrogéologie du Centre du Bassin de Paris, contribution à l'étude de quelques aquifères principaux. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paris VI, 709 p.
- Mégnien Cl., (1980).** Synthèse géologique du Bassin de Paris. Volume I : Stratigraphie et Paléogéographie. Mémoire du B.R.G.M n°101.
- Mégnien Cl. & Desprez N., (1973).** Hydrogéologie de la Beauce. Bull. B.R.G.M (2) III, 3, pp. 192-211.
- Mehra O. & Jackson M.L., (1960).** Constancy of the solum of mica unit cell potassium surface and interlayer sorption surface in vermiculite-illite clays. Soil Science Society of America Proceedings, 23, pp. 101-105.
- Ménillet F., (1980).** Les lithofaciès des calcaires de Beauce (Stampien à Aquitanien) du Bassin de Paris (France). Bull. B.R.G.M, section IV, 1, pp. 15-25.
- Metson A.J., (1956).** Methods of chemical analysis for soil survey samples. New Zealand soil bureau, bull. N°12.
- Monnier G., Stengel P. & Fies J.C., (1973).** Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse de système de porosité du sol. Annales Agronomiques, 24, 5, pp. 533-545.
- Morlet G., (1990).** Nitrates : comment limiter leur lessivage. Horizon, Numéro Spécial avril 1990.
- Nicoullaud B., Brisson N., Ruget F. & King D., (1992).** GOA : l'exemple d'un modèle de fonctionnement de la culture du maïs adapté à une utilisation spatiale. *In* : Gestion de l'espace rural et Système d'Information Géographique, INRA Editions, Florac, 22-24 Octobre 1991, pp. 89-98.
- Nicoullaud B., Darthout R. & Duval O., (1994).** Etude de l'enracinement du blé tendre d'hiver et du maïs : Apport d'une stratification pédologique préalable. *Quatrièmes Journées Nationales de l'étude des sols*, 17-21/04/94, Lille.
- Nortcliff S., (1978).** Soil variability and reconnaissance soil mapping: a statistical study in Norfolk. Journal of Soil Science, 29, 3, pp. 403-418.
- Oliver M.A. & Webster R., (1991).** How geostatistics can help you? Soil Use and Management, 7, 4, pp. 206-217.

- 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, 56 p.
- 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 le lessivage du nitrate. Thèse de l'Université d'Orléans (à paraître).
- Penman H.L., (1948).** Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc., London A193, pp. 120-146.
- Pérarnaud V. & Raynal N., (1991).** Cours et manuel d'agrométéorologie n°4, Ecole Nationale de la Météorologie, Météo France, 183 p.
- Perrier A., (1973).** Bilan hydrique de l'assolement blé-jachère et évaporation d'un sol nu en région semi-aride. *In* : Réponse des plantes aux facteurs climatiques. Actes Coll. Uppsala, 1970. Ecologie et Conservation 5, pp. 477-487.
- Perrier A., (1975).** Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III-Evapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. Annales Agronomiques, 26, 3, pp. 229-243.
- Perrier A., (1977).** Projet de définitions concernant l'évapotranspiration en fonction de considérations théoriques et pratiques. La Météorologie, N° Spécial "Evapotranspiration", 6, 11, pp. 7-16.
- Perrier A., (1982).** Modélisation des échanges de surface : continuum sol-plante-atmosphère. Ecole d'été C.N.E.S., Roscoff. Ouvrage climatologie, 33 p.
- Préfecture Région Centre, (1990).** Comité technique de l'eau : Programme régional "Nitrates". Orléans, Juin 1990.
- Richards L.A., (1947).** Pressure membrane apparatus. Construction and use. Agriculture Engineering, 28, pp. 451-454.
- Ritchie J.T., (1972).** Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resources Research, 8, 5, pp. 1204-1261.
- Robert M. & Tessier D., (1974).** Méthode de préparation des argiles des sols pour études minéralogiques. Annales Agronomiques, 25, 6, pp. 859-882.
- Robert M., (1975).** Principes de détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide des rayons X. Annales Agronomiques, 26, 4, pp. 363-399.
- Russo D., (1984).** Design of an optimal sampling network for estimating the variogram. Soil Science Society of America Journal, 48, pp. 708-716.

- Saporta G., (1978).** Théories et méthodes de la statistique. Editions Technip-Paris.
- Saporta G., (1990).** Probabilités, analyse des données et statistique. Editions Technip-Paris, 488 p.
- Seguin J.J., (1986).** Cartographie automatique en hydrochimie. Application aux teneurs en nitrates de cinq départements du bassin Seine-Normandie. Rapport B.R.G.M. 86 SGN 251 EAU, 90 p.
- Seguin J.J., (1987).** Teneurs en nitrates dans la nappe des calcaires de Beauce. Modélisation et prévision. Rapport B.R.G.M. 87 SGN 192 EAU, 61 p. et annexes.
- Seguin J.J., (1988).** Un aspect de la cartographie automatique en hydrochimie : la carte comme auxiliaire de modélisation. Hydrogéologie, n°1, pp. 55-61.
- Serre C., (1980).** Beauce et Gâtinais occidental : géomorphologie, phénomènes karstiques et hydrogéologie, CRDP Orléans, 43 p. et annexes.
- Snedecor G.W. & Cochran W.G., (1984).** Méthodes statistiques. Edition Association de Coordination Technique Agricole. Paris, 649 p.
- Stengel P., Gabilly Y., Bertuzzi P., Gaudu J.C. & Brifault A., (1986).** La double sonde gamma LPC-INRA. Définition, expérimentation et utilisation en agronomie. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 141, pp. 109-120.
- Stockle C. & Campbell G., (1985).** A simulation model for predicting effect of water stress on yield : an example using corn. Advances in irrigation. 3, pp. 283-311.
- Terrasse B., (1993).** Etude de l'enracinement du blé et du maïs en fonction des caractéristiques permanentes du sol. Exemple des sols de Petite Beauce (Loiret). Mémoire BTS Technologies Végétales. Ecole d'Agriculture Sully, Mantes-la-Jolie, 38 p.
- Tessier D. & Berrier J., (1979).** Utilisation de la microscopie à balayage dans l'étude des sols. Observations des sols soumis à différents pF. Bulletin AFES, 1, pp. 67-82.
- Thiessen A.H. (1911).** Precipitation for large areas. Monthly Weather Review, 39, 7, pp. 1082-1084.
- Thorntwaite C.W., (1948).** An approach toward a rational classification of climate. Geography Revue, 38, pp. 55-94.
- Tomassone R., Lesquoy E. & Miller C., (1983).** La régression : nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique. INRA, Actualités scientifiques et agronomiques 13. Masson Paris, 180 p.
- Trangmar B.B., Yost R.S. & Uehara G., (1985).** Application of geostatistic to spatial studies of soil properties. Advances in Agronomy, 38, pp. 45-93.

- Turc L., (1961).** Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Annales Agronomiques*, 12, 1, pp. 13-49.
- Van Kuilenburg J., De Gruijter J.J., Marsman B.A. & Bouma J., (1982).** Accuracy of spatial interpolation between point data on soil moisture supply capacity, compared with estimates from mapping units. *Geoderma*, 27, pp. 311-325.
- 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, 2, pp. 175-184.
- Voltz M., (1986).** Variabilité spatiale des propriétés physiques du sol en milieu alluvial. Essai de cartographie quantitative des paramètres hydrodynamiques. Thèse de Docteur-Ingénieur, E.N.S.A. Montpellier, 198 p.
- Voltz M., Goulard M. (1994).** Spatial interpolation of soil moisture retention curves. *Geoderma*, 62, pp. 109-123.
- Wackernagel H. (1993).** Cours de géostatistique multivariable, Ecole des Mines de Paris, Centre de géostatistique, Fontainebleau (France).
- 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 (France). Thèse de Doctorat de l'Université de Paris VI, spécialité Pédologie, 150 p. et annexes.
- Webster R., (1977).** Quantitative and numerical methods in soil classification and survey. *Monograph on Soil Survey*. Clarendon Press. Oxford, 269 p.
- Webster R., (1985).** Quantitative spatial analysis of soil in the field. In *Advances in Soil Science*, 3, Springer-Verlag New-York Inc.
- Webster R., (1989).** Is regression what you really want? *Soil Use and Management*, 5, 2, pp. 47-53.
- Webster R., & Oliver M.A., (1989).** Optimal interpolation and isarithmic mapping soil properties. VI. Disjunctive kriging and mapping the conditional probability. *Journal of Soil Science*.
- Webster R., & Oliver M.A., (1990).** *Statistical methods in soil and land resource survey*, Oxford University Press, Oxford.
- Yost R.S., Uehara G. & Fox R.L., (1982).** Geostatistical analysis of soil chemical properties of large land areas, II. Kriging. *Soil Science Society of America Journal*, 46, pp. 1033-1037.

Liste des figures du Chapitre 1

- Figure 1.1** : Situation générale de la Petite Beauce.
- Figure 1.2** : Carte géologique de la Petite Beauce.
(d'après les cartes géologiques au 1/320.000^{ème} de Bourges et Paris).
- Figure 1.3** : Coupe géologique au niveau de l'anticlinal d'Ouzouer-le-Marché.
(d'après la carte géologique au 1/50.000^{ème} de Cloyes-sur-le-Loir).
- Figure 1.4** : Représentation du réseau hydrographique de la Petite Beauce.
- Figure 1.5** : Surface piézométrique de l'aquifère des calcaires de Beauce.
(en gras : délimitation de la Petite Beauce) (d'après Jordana, 1992).
- Figure 1.6** : Variations de la cote NGF de la nappe des calcaires de Beauce à Toury entre 1890 et 1893.
- Figure 1.7** : Carte des isohyètes de la Petite Beauce et du Loiret.
(Normales annuelles entre 1946 et 1986 ; équidistance : 50 mm)
- Figure 1.8** : Épaisseur des formations limono-argileuses évaluée lors de la cartographie au 1/10.000^{ème} sur 3500 ha. (d'après Isambert et Duval, 1992).

Liste des figures du Chapitre 2

- Figure 2.1** : Localisation du secteur d'étude.
- Figure 2.2** : Occupation du sol en 1991, 1992 et 1993.
- Figure 2.3** : Localisation et description du sondage géologique profond (30 m).
- Figure 2.4** : Histogramme de fréquence des valeurs d'altitude du secteur d'étude.
- Figure 2.5** : Carte des isovaleurs d'altitude du secteur d'étude.
(équidistance : 0,5 m)
- Figure 2.6** : Valeurs des pluies et de l'ETP (Penman) pour les années 1990 à 1993.

Liste des figures du Chapitre 3

- Figure 3.1** : Carte des sols du secteur d'étude. (d'après Isambert et Duval, 1992).
- Figure 3.2** : Localisation et description de la fosse A.
- Figure 3.3** : Localisation et description de la fosse B.
- Figure 3.4** : Caractéristiques physico-chimiques des principaux horizons des fosses A et B.
- Figure 3.5** : Diffractogrammes RX obtenus à partir de dépôts orientés de la fraction < 2 μ m décarbonatée (horizon SCi1 de la fosse A).
- Figure 3.6** : Profil de densité apparente (fosse A).
- Figure 3.7** : Localisation et description de la fosse C.

- Figure 3.8** : Localisation et description de la fosse D.
- Figure 3.9** : Caractéristiques physico-chimiques des principaux horizons des fosses C et D.
- Figure 3.10** : Diffractogrammes RX obtenus à partir de dépôts orientés de la fraction $< 2\mu\text{m}$ décarbonatée (horizons LS3, SCi2, IISCi2, IIICg₁ et IIICg₂ de la fosse C).
- Figure 3.11** : Profil de densité apparente (fosse C).
- Figure 3.12** : Localisation et description de la fosse E.
- Figure 3.13** : Situation des sondages réalisés dans les matériaux argilo-sableux.
- Figure 3.14** : Description des sondages réalisés dans les matériaux argilo-sableux.
- Figure 3.15** : Teneurs en sable et argile des sondages 1-150 et 1-175.
- Figure 3.16** : Localisation des prélèvements pour les analyses granulométriques complémentaires.
- Figure 3.17** : Histogramme de fréquence des teneurs en argile du LA.

Liste des figures du Chapitre 4

- Figure 4.1** : Elaboration d'un réseau de triangles respectant les conditions de Delaunay pour la réalisation d'un TIN (Triangle Irregular Network).
- Figure 4.2** : Principaux modèles de variogrammes utilisés (d'après Delhomme, 1976 et Voltz, 1986).

Liste des figures du Chapitre 5

- Figure 5.1** : Analyse visuelle de la structure spatiale des données (100 sondages).
- Figure 5.2** : Présentation de l'échantillonnage semi-aléatoire.
- Figure 5.3a, b, c et d** : Variabilité de l'épaisseur du LA aux courtes distances d'échantillonnage.
- Figure 5.4** : Histogramme de fréquence de l'épaisseur du LA (190 sondages).
- Figure 5.5** : Variogramme expérimental de l'épaisseur du LA (190 sondages).
- Figure 5.6** : Variogrammes directionnels de l'épaisseur du LA pour 4 classes de distance.
- Figure 5.7** : Histogramme de fréquence de l'épaisseur du LA (100 sondages).
- Figure 5.8** : Carte des isopaches du LA obtenus par la méthode TIN (100 sondages).
- Figure 5.9a** : Régression entre épaisseurs observées et épaisseurs estimées par la méthode TIN sur 46 points.
- Figure 5.9b** : Résidus de la régression.
- Figure 5.10** : Carte des isopaches du LA obtenus par krigeage (100 sondages).
- Figure 5.11a** : Régression entre épaisseurs observées et épaisseurs estimées par krigeage sur 46 points.
- Figure 5.11b** : Résidus de la régression.

- Figure 5.12 :** Carte des écarts-types d'estimation issus du krigeage sur 100 sondages.
- Figure 5.13 :** Isopaches du LA obtenus par krigeage sur l'ensemble des données (190 sondages).
- Figure 5.14 :** Carte des écarts-types d'estimation issus du krigeage sur 190 sondages.
- Figure 5.15 :** Construction des grilles pour l'établissement de la densité d'échantillonnage optimale.
- Figure 5.16 :** Configuration de l'échantillonnage utilisé pour le calcul de la densité d'échantillonnage optimale.
- Figure 5.17 :** Variations de l'écart-type d'estimation en fonction de l'espacement de la grille de points échantillonnés.
- Figure 5.18 :** Configuration du dispositif Wenner.
- Figure 5.19 :** Positionnement des sondages électriques sur le secteur d'étude.
- Figure 5.20 :** Ecart des valeurs d'épaisseurs mesurées et calculées à la 1^{ère} bissectrice.
- Figure 5.21 :** Histogramme de fréquence des résistivités vraie de la couche superficielle.
- Figure 5.22a :** Régression linéaire entre épaisseurs du LA mesurées par sondages électriques croisés orientés Est-Ouest et Nord-Sud.
- Figure 5.22b :** Résidus de la régression.
- Figure 5.23a :** Régression linéaire entre épaisseurs du LA mesurées par sondages électriques et épaisseurs mesurées par sondages à la tarière.
- Figure 5.23b :** Résidus de la régression.
- Figure 5.24 :** Variogrammes des épaisseurs mesurées par sondages à la tarière et par sondages électriques.

Liste des figures du Chapitre 6

- Figure 6.1 :** Profils électriques ($a = 1, 2, 3$ et 6 m).
Représentation de la résistivité apparente en fonction de la distance.
- Figure 6.2 :** Pseudo-section électrique Wenner ($a = 1, 2, 3$ et 6 m).
(Courbes d'égale résistivité en Ω m).
- Figure 6.3 :** Situation des trainés électriques, des sondages mécaniques et des fosses réalisés sur la zone de 30 ha.
- Figure 6.4 :** Histogramme de fréquence des résistivités apparentes.
- Figure 6.5 :** Carte des isorésistivités électriques apparentes. Equidistance : 10Ω m.
- Figure 6.6 :** Comparaison multirate de deux trainés réalisés sur le transect n°1
- Figure 6.7a :** Comparaison de la résistivité apparente et de la profondeur d'apparition du calcaire le long du transect n°1.
- Figure 6.7b :** Régression linéaire entre les résistivités apparentes Wenner et la profondeur d'apparition du calcaire sur un jeu de 14 données.
- Figure 6.8a :** Validation par régression linéaire entre la profondeur d'apparition du calcaire mesurée à la tarière et la profondeur d'apparition du calcaire calculée par la relation (7) sur un jeu de 34 données indépendantes.

Figure 6.8b :Résidus de la régression.

Figure 6.9a :Régression linéaire entre les résistivités apparentes Wenner et la profondeur d'apparition du calcaire sur l'ensemble du jeu de données.

Figure 6.9b :Résidus de la régression.

Figure 6.10 : Carte des isohypses du toit du calcaire (profondeur en cm)

Figure 6.11a :Régression linéaire entre les profondeurs du toit du calcaire calculées par la relation (8) et celles estimées par l'interpolation au même point.

Figure 6.11b :Résidus de la régression.

Figure 6.12 : Carte des isopaches des matériaux argilo-sableux.

Figure 6.13 : Situation des sondages électriques de calage sur la structure argilo-sableuse la plus étendue.

Liste des figures du Chapitre 7

Figure 7.1 :Histogrammes des précipitations hivernales par décades de 90 à 94

Figure 7.2 :Histogrammes de l'ETP hivernale par décades de 90 à 94

Figure 7.3 :Répartition des teneurs en eau moyennes volumiques en fonction de l'occupation du sol par parcelle en entrée et en sortie d'hiver

Figure 7.4a :Régression entre teneur en eau volumique moyenne en septembre 1991 et épaisseur du LA

Figure 7.4b :Résidus de la régression

Figure 7.5 :Relation entre teneur en eau volumique moyenne en septembre 1992 et épaisseur du LA

Figure 7.6 :Relations, paramètres et niveaux de signification des régressions entre teneurs en eau volumiques moyennes et épaisseur du LA par profil en septembre 1991

Figure 7.7 :Variogrammes des teneurs en eau volumiques moyennes en entrée d'hiver

Figure 7.8 :Carte des quantités d'eau écoulée à la base du limon argileux en septembre 1991

Figure 7.9 :Carte des quantités d'eau écoulée à la base du limon argileux en septembre 1992

Liste des tableaux du chapitre 1

Tableau 1.1 : Précipitations à la station d'Orléans-Bricy.

Tableau 1.2 : Occupation du sol de quatre communes de Petite Beauce.

Liste des tableaux du chapitre 3

Tableau 3.1 : Résultats des analyses physico-chimiques de la fosse A.

Tableau 3.2 : Résultats des analyses physico-chimiques de la fosse B.

Tableau 3.3 : Résultats des analyses physico-chimiques de la fosse C.

Tableau 3.4 : Résultats des analyses physico-chimiques de la fosse D.

Tableau 3.5 : Résultats des analyses physico-chimiques de la fosse E.

Tableau 3.6 : Statistiques usuelles sur la teneur en argile des horizons limono-argileux et la profondeur d'échantillonnage.

Liste des tableaux du chapitre 5

Tableau 5.1 : Résultats de l'analyse variographique (190 sondages).

Tableau 5.2 : Résultats de la validation de la méthode TIN sur 46 données indépendantes.

Tableau 5.3 : Résultats de la validation du krigeage sur 46 données indépendantes.

Tableau 5.4 : Résultats du test de validation croisée (100 sondages).

Tableau 5.5 : Comparaison des résultats des analyses statistiques pour les deux méthodes d'interpolation utilisées.

Tableau 5.6 : Résultats du test de validation croisée sur la totalité des données (190).

Tableau 5.7 : Résultats de l'inversion des sondages électriques.

Tableau 5.8 : Comparaison par grandeurs statistiques de l'épaisseur du LA calculée par inversion des sondages électriques et mesurée à la tarière (12 sondages).

Tableau 5.9 : Epaisseurs du LA obtenues par sondage à la tarière et par sondage électrique.

Tableau 5.10 : Répartition des résistivités de la couche superficielle.

Tableau 5.11 : Comparaison par grandeurs statistiques de l'épaisseur du LA calculée par inversion des sondages électriques et mesurée à la tarière (40 sondages).

Liste des tableaux du chapitre 6

- Tableau 6.1 :** Résultats de l'analyse statistique des données de résistivités apparentes.
- Tableau 6.2 :** Description des sondages à la tarière réalisés sur les profils électriques.
- 6.2a : Description des sondages à la tarière réalisés sur le trainé n°1.
- 6.2b : Description des 44 sondages de validation.
- Tableau 6.3 :** Comparaison des différentes relations entre la profondeur d'apparition du calcaire et la résistivité apparente.
- Tableau 6.4 :** Comparaisons par grandeurs statistiques des profondeurs du toit du calcaire calculées par le modèle (8) et les profondeurs estimées par l'interpolation TIN (620 données).
- Tableau 6.5 :** Récapitulatif de la démarche utilisée dans le chapitre 6.
- Tableau 6.6 :** Interprétation des sondages électriques effectués sur la structure.
- Tableau 6.7 :** Comparaisons des épaisseurs obtenues par sondages à la tarière et par sondages électriques.

Liste des tableaux du chapitre 7

- Tableau 7.1 :** Pluies, ETP (Penman) et ETR (BYM) hivernales et par décade de 1990 à 1994
- Tableau 7.2 :** Vitesses moyennes du vent prises en compte dans le calcul de l'ETR
- Tableau 7.3 :** Paramètres du sol retenus pour le calcul de l'ETR
- Tableau 7.4 :** Teneurs en eau moyenne par parcelle en septembre 92
- Tableau 7.5 :** Nature des variables utilisées dans le modèle de bilan hydrique
- Tableau 7.6 :** Récapitulatif du mode de calcul de l'ETR et de la réserve hydrique initiale dans le calcul du bilan en fonction des variables agronomiques.
- Tableau 7.7 :** Evaluation des quantités d'eau écoulée à la base du LA par décade et par parcelle pour l'hiver 1991-1992
- Tableau 7.8 :** Evaluation des quantités d'eau écoulée à la base du LA par décade et par parcelle pour l'hiver 1992-1993

TABLE DES MATIERES

Introduction générale

Première Partie

Le secteur de Liconcy-Machelainville

Chapitre 1 : Cadre général : La "Petite Beauce"	7
I. Introduction	7
I. Principales formations géologiques	8
III. Hydrogéologie	11
III-1 Réseau hydrographique	11
III-2 Karstification	13
III-3 Hydrologie	13
IV. Climat	17
V. Les sols	18
VI. Contexte agronomique	20
VII. Conclusion	21
Chapitre 2 : Caractéristiques du secteur d'étude	23
I. Introduction	23
II. Situation géographique	25
III. Mode d'occupation des sols	25
IV. Géologie	26
V. Altimétrie	26
VI. Pluie et ETP	31
VII. Conclusion	33
Chapitre 3 : Les sols du secteur d'étude	35
I. Introduction	35
II. Méthodes d'étude	36
II-1 Analyses granulométriques et physico-chimiques	36
II-2 Minéralogie de la fraction argileuse	39
II-3 Mesure de la densité apparente	39

III.	Etude des fosses	39
III-1	Sol développé dans des matériaux limono-argileux sus-jacents à des matériaux cryoturbés (Fosses A et B)	41
III-1.1	Description morphologique	41
III-1.2	Résultats des analyses physico-chimiques	43
III-1.3	Minéralogie de la fraction argileuse	45
III-1.4	Densité apparente	45
III-1.5	Conclusion	49
III-2	Sol développé dans des matériaux limono-argileux sus-jacents à des matériaux argileux à sables grossiers (Fosses C et D)	49
III-2.1	Description morphologique	49
III-2.2	Résultats des analyses physico-chimiques	52
III-2.3	Minéralogie de la fraction argileuse	54
III-2.4	Densité apparente	57
III-2.5	Conclusion	57
III.3	Sol peu épais développé dans des matériaux limono-argileux sus-jacents à un substrat calcaire dur (Fosse E)	59
III-3.1	Description morphologique	59
III-3.2	Résultats des analyses physico-chimiques	59
III-3.3	Conclusion	61
IV.	Variabilité de constitution granulométrique des matériaux limono-argileux et argilo-sableux	61
IV-1	Constitution granulométrique des matériaux argilo-sableux à sablo-argileux	61
IV-1.1	Description de la coupe	61
IV-1.2	Analyses granulométriques	63
IV-1.3	Conclusion	63
IV-2	Constitution granulométrique de la couverture limono-argileuse	65
IV-2.1	Résultats	65
IV-2.2	Conclusion	68
V.	Discussion	69
V-1	Matériaux limono-argileux (LA)	69
V-2	Matériaux cryoturbés (PC)	70
V-3	Matériaux calcaires non affectés par la cryoturbation	71
V-4	Matériaux argilo-sableux à sablo-argileux à sables grossiers	71
VI.	Conclusion	72

Deuxième Partie

Variation d'épaisseur de la couverture de sol

Chapitre 4 :	Rappel et mise en oeuvre des méthodes d'interpolation et des méthodes statistiques	77
I.	Méthodes d'interpolation spatiale	79
I-1	Méthodes non probabilistes	79
I-1.1	Analyse et traitement préalable du jeu de données	79

I-1.2	Interpolation polynômiale	80
I-1.3	Interpolation par moindres carrés	80
I-1.4	Interpolation par pondération	81
I-1.5	Méthode d'interpolation choisie	82
I-2	Méthodes probabilistes	83
I-2.1	Théorie des Fonctions Aléatoires (F.A.)	83
I-2.2	Approche géostatistique	84
II.	Principes de mises en oeuvre	86
II-1	Estimation du variogramme expérimental	86
II-2	Analyse du variogramme	87
II-3	Ajustement d'un modèle théorique	87
II-4	Krigeage	89
II-5	Validation du modèle ajusté	90
III.	Remarques sur la régression linéaire	91
IV.	Conclusion	92

Chapitre 5 : Variation de l'épaisseur de la couverture de sol et étude de la formation limono-argileuse 93

I.	Analyse de variabilité de l'épaisseur du limon argileux par sondages à la tarière	94
I-1	Echantillonnage	94
I-1.1	Echantillonnage de 150 sondages uniformément répartis	94
I-1.2	Echantillonnage semi-aléatoire complémentaire de 40 sondages	95
I-1.3	Analyse statistique des données issues des 190 sondages	99
I-2	Variographie	101
I-2.1	Variogramme expérimental	101
I-2.2	Variogrammes directionnels	105
I-2.3	Conclusion	105
II.	Interpolations	107
II-1	Comparaison de deux méthodes d'interpolation sur la base de 100 sondages	107
II-1.1	Interpolation polynômiale : méthode TIN	107
II-1.2	Interpolation probabiliste : Krigeage	113
II-1.3	Comparaison des deux méthodes	119
II-2	Interpolation par krigeage sur la totalité des sondages	120
II-2.1	Etude du voisinage	121
II-2.2	Mise en oeuvre	121
II-2.3	Résultats	123
II-2.4	Validation croisée	123
II-2.5	Conclusion	126
II-3	Evaluation de la densité d'échantillonnage optimale	126
III-3.1	Mise en oeuvre	126
III-3.2	Résultats	127
II-4	Discussion - Conclusion	130
III.	Utilisation de méthodes électriques	131
III-1	Mise en oeuvre du dispositif	133

III-2	Reconnaissance de la limite limon-argileux / calcaire de Beauce	134
III-2.1	Inversion des sondages électriques	134
III-2.2	Comparaison avec les sondages à la tarière	135
III-3	Variations locales de l'épaisseur du LA	138
III-3.1	Mise en place du dispositif	139
III-3.2	Résultats	139
III-3.3	Analyse des résistivités	141
III-3.4	Interprétation des sondages croisés	143
III-3.5	Comparaison des épaisseurs obtenues par sondages électriques et sondages à la tarière	145
III-4	Comparaison des structures spatiales des épaisseurs mesurées par les deux méthodes	148
III-5	Conclusion	149
IV.	Conclusion	151
Chapitre 6 :	Délimitation des matériaux argilo-sableux par trainés électriques	153
I.	Approche par un trainé électrique	155
I-1	Mise en oeuvre	155
I-2	Résultats	155
I-3	Interprétation	157
I-4	Conclusion	157
II.	Généralisation des trainés électriques	159
II-1	Mise en place du dispositif	159
II-2	Résultats	159
II-2.1	Description des trainés	159
II-2.2	Analyse statistique des données de résistivités apparentes	161
II-2.3	Carte des isorésistivités	161
II-2.4	Remarque : comparaison multirate des trainés électriques sur le transect 1	163
II-2.5	Interprétation	163
III.	Mise en évidence de la structure	165
III-1	Etude du trainé n°1	165
III-1.1	Relation entre la résistivité apparente et la profondeur d'apparition du calcaire	165
III-1.2	Domaine de validité de la relation (7)	167
III-1.3	Validation de la relation (7)	169
III-2	Passage des résistivités apparentes aux profondeurs d'apparition du calcaire	171
III-2.1	Généralisation de la relation (7)	173
III-2.2	Carte des isohypses du toit du calcaire	175
III-3	Validation à partir d'un jeu de données indépendant	175
IV.	Cartographie des matériaux argilo-sableux	179
IV-1	Isopaches des matériaux argilo-sableux	179
IV-2	Sondages électriques de calage sur la structure	183
V.	Conclusion	184

Troisième Partie

Fonctionnement hydrique hivernal de la couverture de sol

Chapitre 7 :	Termes du bilan hydrique et bilan	189
I.	Analyse des variables climatiques	191
I-1	Pluviométrie hivernale décadaire	191
I-2	Evapotranspiration potentielle (ETP)	191
I-3	Evapotranspiration réelle (ETR)	191
I-3.1	Evaluation de l'ETR par décade dans le cas d'un sol nu	195
I-3.2	Evaluation de l'ETR par décade dans le cas d'un sol emblavé	197
II.	Evaluation des termes du bilan hydrique : conditions aux limites	197
II-1	Mise en oeuvre	197
II-2	Teneurs en eau moyenne en entrée et sortie d'hiver	198
II-3	Comparaison des teneurs en eau par parcelles	199
II-4	Relation entre la teneur en eau moyenne volumique par profil en entrée d'hiver et l'épaisseur du sol	201
II-4.1	Mesures en septembre 1991	201
II-4.2	Mesures en septembre 1992	203
II-4.3	Conclusion	203
III.	Bilan hydrique	203
III-1	Modèles de bilan hydrique	203
III-1.1	Généralités sur les modèles de bilan	203
III-1.2	Les représentations de type analogique	206
III-1.3	Le modèle à deux réservoirs de Choissel (1985)	206
III-1.4	L'infiltration selon la loi du "tout ou rien"	207
III-2	Présentation du modèle utilisé	208
III-2.1	Expression du modèle	208
III-2.2	Définition et calcul des réserves hydriques initiales et maximales	209
III-2.3	Nature des variables et construction du modèle	212
III-3	Résultats	215
III-3.1	Evaluation des quantités d'eau écoulée à la base du LA par décade et par parcelle	215
III-3.2	Distribution spatiale des quantités d'eau écoulée à la base du LA en fin d'hiver	218
IV.	Conclusion	221
	Conclusion générale	225
	Bibliographie	231
	Listes des figures et des tableaux	243
	Table des matières	249
	Annexes	257

Annexes

ANNEXE 1

Tableaux granulométriques

PROFIL	PROF en cm	CaCO3 en %	%EG %	A%. en %	LF%. en %	LG%. en %	SF%. en %	SG%. en %
A	-15	0.0	0.0	32.2	30.9	34.4	1.6	0.9
A	-35	0.0	0.0	32.2	30.6	35.0	1.5	0.7
A	-45	2.8	0.0	30.8	30.8	36.5	1.5	0.4
A	-60	6.1	0.0	29.1	32.3	37.0	1.4	0.3
B	-15	0.0	0.0	32.2	31.4	34.4	1.5	0.5
B	-40	8.2	4.0	34.5	30.2	33.8	1.1	0.4
C	-10	0.0	0.0	30.6	29.3	35.8	1.8	2.5
C	-20	0.0	0.0	33.0	31.6	31.1	1.9	2.4
C	-30	0.0	0.0	31.1	30.3	34.4	2.0	2.2
C	-40	0.0	0.8	32.4	30.4	33.2	1.9	2.1
C	-50	0.0	0.4	39.2	28.9	28.3	1.7	1.9
D	-15	0.0	0.0	31.1	31.6	33.7	1.8	1.8
D	-45	0.0	0.0	38.6	29.6	28.7	1.6	1.5
E	-15	2.7	1.5	33.6	31.6	31.7	1.8	1.2
1-150	-10	0.0	0.0	32.5	32.1	31.0	1.8	2.6
1-150	-30	0.0	0.0	37.6	30.8	28.0	1.4	2.2
1-150	-50	0.0	4.8	40.1	28.6	26.4	1.6	3.3
1-175	-10	0.0	0.0	33.2	32.2	31.7	1.5	1.4
1-175	-30	0.0	0.0	35.8	31.8	30.3	1.1	1.0
1-175	-50	0.0	0.0	40.2	31.1	26.9	1.2	0.6
1-175	-70	0.0	0.0	37.9	31.9	28.4	1.2	0.6

Tableau I.1 : Granulométrie en pourcent de terre fine non calcaire d'horizons LA

PROFIL	PROF en cm	CaCO3 en %	%EG %	A%. en %	LF% en %	LG% en %	SF% en %	SG% en %
9	-10	0.0	0.0	30.2	31.6	33.9	2.2	2.1
9	-30	0.0	0.0	30.3	31.4	34.3	2.0	2.0
9	-50	0.0	0.0	36.3	28.4	30.8	2.2	2.3
9	-70	0.0	1.4	39.1	27.8	28.1	2.2	2.8
12	-20	0.0	0.0	30.1	34.1	31.6	1.9	2.3
12	-40	0.0	0.0	31.7	32.9	31.2	1.8	2.4
12	-60	0.0	0.0	36.2	31.0	27.6	1.9	3.3
12	-80	0.0	2.8	33.8	32.2	29.0	2.0	3.0
21	-15	0.0	0.0	30.5	31.7	34.9	1.6	1.3
21	-35	0.0	0.0	36.5	30.8	30.5	1.5	0.7
21	-60	0.0	0.0	37.7	31.1	28.4	1.7	1.1
30	-10	0.0	0.0	32.1	31.5	32.2	2.1	2.1
30	-30	0.0	0.0	31.2	33.1	33.1	1.5	1.1
30	-50	0.0	0.0	36.6	30.4	31.2	1.2	0.6
30	-70	0.0	1.2	38.6	30.7	27.9	1.5	1.3
30	-85	0.0	1.4	37.6	31.8	26.7	2.0	1.9
39	-15	0.0	0.0	32.3	30.8	34.6	1.4	0.9
39	-35	0.0	0.0	32.9	31.2	33.8	1.3	0.8
39	-55	0.0	0.0	36.9	30.7	30.5	1.2	0.7
64	-15	0.0	0.0	30.0	31.4	35.1	1.8	1.7
64	-30	0.0	0.0	31.0	31.4	34.4	1.8	1.4
64	-40	0.0	0.0	35.7	31.5	30.2	1.7	0.9
64	-50	0.0	0.0	35.2	33.0	29.4	1.6	0.8
64	-70	0.0	0.0	34.6	34.3	27.0	2.5	1.6
64	-80	0.0	0.0	34.7	35.5	24.9	2.7	2.2
65	-15	0.0	0.0	31.1	32.4	32.2	1.7	2.6
65	-30	0.0	1.4	35.2	30.7	29.1	2.0	3.0
65	-40	0.0	1.6	39.6	29.0	25.0	1.9	4.4
67	-15	0.0	0.0	28.3	32.2	35.9	1.6	2.0
67	-30	0.0	0.0	28.1	32.3	36.0	1.5	2.1
67	-40	0.0	0.0	27.4	32.2	36.2	1.9	2.3
67	-50	0.0	0.0	33.7	31.2	32.3	1.5	1.3
67	-60	0.0	0.0	37.4	30.1	30.0	1.4	1.1
74	-15	0.0	0.0	30.2	31.6	35.7	1.6	0.9
74	-30	0.0	0.0	31.9	30.5	35.7	1.3	0.6
74	-40	0.0	0.0	36.4	30.1	31.5	1.4	0.6
74	-55	0.0	0.0	35.5	31.3	30.8	1.7	0.7
74	-70	0.0	0.0	36.0	31.9	29.5	1.7	0.9
74	-85	0.0	1.3	39.0	30.6	26.5	2.3	1.6
77	-15	0.0	0.0	27.7	34.2	35.8	1.5	0.8
77	-35	0.0	0.0	27.3	34.2	36.2	1.4	0.9
77	-45	0.0	0.0	34.4	32.4	31.5	1.2	0.5
77	-65	0.0	0.0	36.7	31.1	31.0	1.1	0.1
77	-80	0.0	0.0	35.1	33.9	29.5	1.2	0.3
77	-95	0.0	0.0	32.8	34.5	31.0	1.3	0.4
79	-15	0.0	0.0	32.6	32.1	33.0	1.5	0.8
79	-35	0.0	0.0	36.5	30.6	30.7	1.3	0.9
79	-45	0.0	0.0	39.1	30.3	27.8	1.3	1.5
79	-70	0.0	1.3	38.0	30.5	27.1	1.7	2.7
79	-95	0.0	1.1	36.6	32.6	23.9	2.3	4.6
79	-105	0.0	0.7	30.2	36.5	22.7	4.0	6.6
90	-15	0.0	0.0	35.3	30.6	32.3	1.2	0.6
90	-35	0.0	0.0	36.7	32.4	29.2	1.2	0.5
90	-55	0.0	0.0	34.1	35.9	28.5	1.2	0.3

Tableau I.2 : Granulométrie en pourcent de terre fine non calcaire d'horizons LA

ANNEXE 2

Tableaux des résistivités

Partie ①	Partie ②	Partie ③	Partie ④
Nombre de sondages 24	Nombre de sondages 25	Nombre de sondages 26	Nombre de sondages 25
51-1-2-4-5-52-56-57- 8-9-61-62-12-13-14- 65-66-67-17-18-19- 70-71-72	3-53-54-55-6-7-58-59- 60-10-11-63-64-15- 16-68-69-20-21-73- 74-26-27-79-80	22-23-24-25-75-76- 77-78-28-29-81-82- 83-34-35-36-87-88- 89-40-41-42-46-93- 94-95	30-31-32-33-84-85- 86-37-38-39-90-91- 92-43-44-45-96-97- 47-48-49-98-99-100- 50
1	11	29	38

Tableau II.1a : Tirage aléatoire parmi les 100 premiers sondages à la tarière

Départ point 1				Départ point 11			
Distance (mm)	Angle/N (°)	No point	Ordre de réalisation	Distance (mm)	Angle/N (°)	No point	Ordre de réalisation
0	0	101	1	0	0	111	6
0.5	218	102	2	0.5	29	112	2
1	310	103	6	1	163	113	1
2	321	104	3	2	171	114	4
4	134	105	4	4	86	115	3
8	349	106	7	8	3	116	8
16	181	107	9	16	136	117	5
32	84	108	8	32	19	118	9
64	122	109	10	64	314	119	7
128	152	110	5	128	171	120	10
Départ point 29				Départ point 38			
Distance (mm)	Angle/N (°)	No point	Ordre de réalisation	Distance (mm)	Angle/N (°)	No point	Ordre de réalisation
0	0	121	2	0	0	131	4
0.5	293	122	4	0.5	135	132	5
1	262	123	5	1	297	133	2
2	39	124	3	2	138	134	3
4	63	125	10	4	184	135	6
8	214	126	7	8	50	136	9
16	173	127	8	16	350	137	7
32	9	128	9	32	216	138	8
64	27	129	6	64	69	139	10
128	172	130	1	128	93	140	1

Tableau II.1b : Position et ordre de réalisation des sondages électriques

a (m)	111NS Ohm.m	111EW Ohm.m	112NS Ohm.m	112EW Ohm.m	113NS Ohm.m	113EW Ohm.m	114NS Ohm.m	114EW Ohm.m	115NS Ohm.m	115EW Ohm.m										
0.10	37.52	23.6	40.40	25.4	65.22	41.0	40.50	25.4	45.16	28.4	49.60	31.2	44.20	27.8	46.60	29.3	32.63	20.5	39.02	24.5
0.15	33.40	31.5	30.70	28.9	33.50	31.6	31.81	30.0	29.10	27.4	30.41	28.7	32.32	30.5	31.68	29.9	26.21	24.7	27.39	25.8
0.20	23.50	29.5	26.50	33.3	28.67	36.0	23.76	29.9	23.20	29.2	22.51	28.3	27.22	34.2	26.48	33.3	20.12	25.3	20.20	25.4
0.30	14.57	27.5	24.00	45.2	15.85	29.9	18.16	34.2	15.84	29.9	18.08	30.3	19.30	36.4	19.14	36.1	15.09	28.4	14.67	27.7
0.40	12.26	30.8	13.56	34.1	13.46	33.8	13.77	34.6	12.54	31.5	12.87	32.3	13.43	33.8	14.00	35.2	11.38	28.6	11.73	29.5
0.60	8.79	33.1	8.70	32.8	9.78	36.9	8.83	33.3	8.81	33.2	9.30	35.1	9.92	37.4	9.45	35.6	8.36	31.5	8.33	31.4
0.80	7.34	36.9	6.92	34.8	8.15	41.0	7.38	37.1	7.10	35.7	7.50	37.7	8.15	41.0	7.63	38.4	6.32	31.8	6.86	34.5
1.20	5.97	45.0	5.72	43.1	6.73	50.7	6.17	46.5	6.00	45.2	5.90	44.5	6.36	48.0	6.15	46.4	5.20	39.2	5.58	42.1
1.50	5.39	50.8	5.35	50.4	6.32	59.6	5.62	53.0	5.55	52.3	5.52	52.0	5.78	54.5	5.67	53.4	5.00	47.1	5.06	47.7
2.00	4.90	61.6	4.92	61.8	5.18	65.1	5.13	64.5	5.07	63.7	5.04	63.3	4.83	60.7	5.10	64.1	4.78	60.1	4.70	59.1
3.00	3.96	74.6	4.25	80.1	4.09	77.1	4.34	81.8	4.00	75.4	4.41	83.1	4.08	76.9	4.42	83.3	4.25	80.1	4.25	80.1
4.00	3.62	91.0	3.94	99.0	3.77	94.8	4.00	100.5	3.55	89.2	3.97	99.8	3.63	91.2	4.01	100.8	3.81	95.8	3.91	98.3
6.00	3.21	121.0	3.44	129.7	3.27	123.3	3.46	130.4	3.15	118.8	3.47	130.8	3.18	119.9	3.41	128.6	3.13	118.0	3.25	122.5
8.00	2.94	147.8	3.09	155.3	2.97	149.3	3.10	155.8	2.91	146.3	3.05	153.3	2.93	147.3	2.95	148.3	2.73	137.2	2.89	145.3
12.00	2.45	184.7	2.45	184.7	2.46	185.5	2.48	187.0	2.46	185.5	2.44	184.0	2.42	182.5	2.40	181.0	2.30	173.4	2.33	175.7
15.00	2.15	202.6	2.12	199.8	2.15	202.6	2.13	200.7	2.15	202.6	2.09	197.0	2.12	199.8	2.26	213.0	2.01	189.4	2.06	194.2

a (m)	116NS Ohm.m	116EW Ohm.m	117NS Ohm.m	117EW Ohm.m	118NS Ohm.m	118EW Ohm.m	119NS Ohm.m	119EW Ohm.m	120NS Ohm.m	120EW Ohm.m										
0.10	27.32	17.2	33.92	21.3	41.06	25.8	35.78	22.5	43.24	27.2	51.06	32.1	35.29	22.2	38.00	23.9	69.71	43.8	64.03	40.2
0.15	24.22	22.8	24.24	22.8	28.82	27.2	33.82	31.9	31.84	30.0	43.77	41.3	36.41	34.3	29.69	28.0	38.53	36.3	48.54	45.7
0.20	17.48	22.0	19.70	24.8	24.10	30.3	27.17	34.1	25.55	32.1	29.40	36.9	23.72	29.8	26.52	33.3	27.65	34.7	34.19	43.0
0.30	14.23	26.8	14.36	27.1	19.58	36.9	21.28	40.1	17.57	33.1	19.46	36.7	18.65	35.2	19.54	36.8	17.38	32.8	19.55	36.9
0.40	11.81	29.7	11.96	30.1	16.27	40.9	17.63	44.3	14.38	36.1	14.04	35.3	16.30	41.0	16.74	42.1	11.84	29.8	13.06	32.8
0.60	8.85	33.4	9.07	34.2	12.52	47.2	13.34	50.3	9.85	37.1	10.13	38.2	12.24	46.1	13.22	49.8	7.64	28.8	7.87	29.7
0.80	7.01	35.2	7.96	40.0	10.20	51.3	10.79	54.2	8.49	42.7	8.12	40.8	10.90	54.8	10.96	55.1	5.42	27.2	5.97	30.0
1.20	5.91	44.6	6.37	48.0	7.86	59.3	7.96	60.0	6.85	51.6	6.62	49.9	8.67	65.4	8.37	63.1	4.39	33.1	4.41	33.3
1.50	5.60	52.8	5.86	55.2	6.81	64.2	6.96	65.6	5.98	56.4	6.03	56.8	7.70	72.6	7.35	69.3	3.76	35.4	3.98	37.5
2.00	4.96	62.3	5.18	65.1	5.82	73.1	5.78	72.6	5.23	65.7	5.30	66.6	6.71	84.3	6.42	80.7	3.52	44.2	3.58	45.0
3.00	4.43	83.5	4.38	82.6	4.52	85.2	4.52	85.2	4.31	81.2	4.61	86.9	5.33	100.5	5.41	102.0	3.10	58.4	3.16	59.6
4.00	3.77	94.8	3.95	99.3	3.82	96.0	3.80	95.5	3.97	99.8	4.19	105.3	4.89	122.9	4.76	119.6	2.91	73.1	2.88	72.4
6.00	3.43	129.3	3.33	125.5	3.18	119.9	3.25	122.5	3.50	131.9	3.75	141.4	4.02	151.6	3.89	146.6	2.64	99.5	2.55	96.1
8.00	3.07	154.3	3.00	150.8	2.77	139.2	2.98	149.8	3.09	155.3	3.32	166.9	3.50	175.9	3.35	168.4	2.39	120.1	2.30	115.6
12.00	2.50	188.5	2.43	183.2	2.24	168.9	2.45	184.7	2.48	187.0	2.70	203.6	2.69	202.8	2.73	205.8	2.01	151.6	1.92	144.8
15.00	2.16	203.6	2.16	203.6	1.97	185.7	2.17	204.5	2.16	202.6	2.36	222.4	2.33	219.6	2.38	224.3	1.84	173.4	1.72	162.1

Tableau II.2a : Valeurs des résistances lues et des résistivités calculées pour chaque sondage électrique

a (m)	121NS Ohm.m	121EW Ohm.m	122NS Ohm.m	122EW Ohm.m	123NS Ohm.m	123EW Ohm.m	124NS Ohm.m	124EW Ohm.m	125NS Ohm.m	125EW Ohm.m										
0.10	39.00	24.5	33.33	20.9	34.41	21.6	38.45	24.2	36.60	23.0	37.34	23.5	36.86	23.2	27.63	17.4	35.45	22.3	40.72	25.6
0.15	29.12	27.4	24.73	23.3	27.20	25.6	27.39	25.8	30.00	28.3	30.48	28.7	28.29	26.7	23.60	22.2	24.83	23.4	28.96	27.3
0.20	20.99	26.4	21.72	27.3	21.98	27.6	22.99	28.9	23.24	29.2	27.30	34.3	20.70	26.0	19.66	24.7	20.74	26.1	24.85	31.2
0.30	17.22	32.5	17.70	33.4	17.50	33.0	17.21	32.4	19.74	37.2	20.60	38.8	17.30	32.6	16.20	30.5	16.35	30.8	14.90	28.1
0.40	14.34	36.0	13.81	34.7	14.73	37.0	14.44	36.3	14.50	36.4	15.08	37.9	14.80	37.2	15.46	38.9	13.62	34.2	14.38	36.1
0.60	11.54	43.5	12.06	45.5	11.73	44.2	11.72	44.2	11.93	45.0	12.28	46.3	12.38	46.7	12.74	48.0	11.13	42.0	11.63	43.8
0.80	10.12	50.9	10.24	51.5	10.12	50.9	10.25	51.5	9.96	50.1	10.08	50.7	10.85	54.5	11.11	55.8	9.02	45.3	9.99	50.2
1.20	8.48	63.9	8.40	63.3	8.38	63.2	8.64	65.1	8.80	66.4	8.56	64.5	9.00	67.9	9.07	68.4	7.79	58.7	8.23	62.1
1.50	7.83	73.8	7.59	71.5	7.99	75.3	7.60	71.6	7.97	75.1	7.65	72.1	7.81	73.6	7.88	74.3	7.10	66.9	7.31	68.9
2.00	6.73	84.6	6.53	82.1	6.71	84.3	6.73	84.6	6.76	84.9	6.74	84.7	6.80	85.5	6.83	85.8	6.20	77.9	6.42	80.7
3.00	5.17	97.5	5.30	99.9	5.29	99.7	5.30	99.9	5.09	95.9	5.28	99.5	5.53	104.2	5.30	99.9	4.96	93.5	5.24	98.8
4.00	4.30	108.1	4.42	111.1	4.37	109.8	4.55	114.4	4.36	109.6	4.47	112.3	4.52	113.6	4.55	114.4	4.17	104.8	4.40	110.6
6.00	3.30	124.4	3.49	131.6	3.32	125.2	3.68	138.7	3.36	126.7	3.47	130.8	3.30	124.4	3.51	132.3	3.27	123.3	3.33	125.5
8.00	2.71	136.2	2.91	146.3	2.81	141.2	3.10	155.8	2.75	138.2	2.92	146.8	2.39	120.1	2.96	148.8	2.77	139.2	2.82	141.7
12.00	2.19	165.1	2.33	175.7	2.23	168.1	2.40	181.0	2.18	164.4	2.32	174.9	2.25	169.6	2.31	174.2	2.15	162.1	2.24	168.9
15.00	1.94	182.8	2.06	194.2	2.15	202.6	2.15	202.6	1.96	184.7	2.05	193.2	1.96	184.7	2.05	193.2	1.88	177.2	1.98	186.6

a (m)	126NS Ohm.m	126EW Ohm.m	127NS Ohm.m	127EW Ohm.m	128NS Ohm.m	128EW Ohm.m	129NS Ohm.m	129EW Ohm.m	130NS Ohm.m	130EW Ohm.m										
0.10	32.09	20.2	34.32	21.6	29.15	18.3	35.70	22.4	40.55	25.5	33.99	21.4	88.90	55.9	117.3	73.7	30.65	19.3	33.70	21.2
0.15	24.06	22.7	23.02	21.7	23.44	22.1	27.93	26.3	27.50	25.9	19.50	18.4	48.80	46.0	66.80	63.0	25.40	23.9	27.72	26.1
0.20	21.62	27.2	19.96	25.1	23.08	29.0	24.62	30.9	24.11	30.3	14.63	18.4	46.25	58.1	39.25	49.3	21.58	27.1	19.48	24.5
0.30	16.85	31.8	15.59	29.4	18.11	34.1	19.39	36.5	17.66	33.3	12.18	23.0	32.75	61.7	27.58	52.0	17.34	32.7	17.84	33.6
0.40	14.96	37.6	14.59	36.7	16.29	40.9	16.86	42.4	14.10	35.4	10.86	27.3	22.45	56.4	17.64	44.3	14.97	37.6	16.12	40.5
0.60	13.29	50.1	13.41	50.6	14.15	53.3	14.20	53.5	11.59	43.7	7.95	30.0	11.06	41.7	10.72	40.4	11.25	42.4	12.98	48.9
0.80	11.48	57.7	11.72	58.9	12.06	60.6	12.13	61.0	9.15	46.0	6.44	32.4	7.75	39.0	8.32	41.8	10.18	51.2	10.46	52.6
1.20	9.12	68.8	9.57	72.2	9.61	72.5	9.74	73.4	6.78	51.1	5.14	38.8	5.86	44.2	6.11	46.1	7.82	57.5	8.19	61.8
1.50	8.07	76.1	8.43	79.5	8.50	80.1	8.45	79.6	6.10	57.5	4.64	43.7	5.01	47.2	5.23	49.3	6.59	62.1	7.16	67.5
2.00	7.27	91.4	7.16	90.0	7.15	89.8	6.90	86.7	5.45	68.5	4.00	50.3	4.38	55.0	4.56	57.3	5.48	68.9	5.85	73.5
3.00	5.86	110.5	5.58	105.2	5.22	98.4	5.27	99.3	4.60	86.7	3.34	63.0	3.67	69.2	3.80	71.6	4.50	84.8	4.40	82.9
4.00	4.65	116.9	4.55	114.4	4.27	107.3	4.28	107.6	4.08	102.5	2.71	68.1	3.15	79.2	3.19	80.2	3.88	97.5	3.75	94.2
6.00	3.36	126.7	3.42	128.9	3.02	113.9	3.17	119.5	2.99	112.7	2.17	81.8	2.54	95.8	2.54	95.8	3.03	114.2	3.00	113.1
8.00	2.72	136.7	2.87	144.3	2.50	125.7	2.55	128.2	2.54	127.7	1.93	97.0	2.17	109.1	2.15	108.1	2.59	130.2	2.65	133.2
12.00	2.17	163.6	2.31	174.2	1.98	149.3	1.95	147.0	2.06	155.3	1.65	124.4	1.77	133.5	1.80	135.7	2.21	166.6	2.21	166.6
15.00	2.00	188.5	2.03	191.3	1.82	171.5	1.76	165.9	1.77	166.8	1.51	142.3	1.60	150.8	1.64	154.6	2.02	190.4	1.99	187.6

Tableau II.2b : Valeurs des résistances lues et des résistivités calculées pour chaque sondage électrique

a (m)	131NS Ohm.m	131EW Ohm.m	132NS Ohm.m	132EW Ohm.m	133NS Ohm.m	133EW Ohm.m	134NS Ohm.m	134EW Ohm.m	135NS Ohm.m	135EW Ohm.m										
0.10	53.72	33.8	62.42	39.2	69.90	43.9	47.02	29.5	43.65	27.4	47.88	30.1	67.15	42.2	65.64	41.2	45.69	28.7	40.83	25.7
0.15	37.84	35.7	44.04	41.5	41.17	38.8	38.92	36.7	43.07	40.6	35.15	33.1	39.02	36.8	36.68	34.6	32.35	30.5	33.12	31.2
0.20	28.40	35.7	31.93	40.1	30.19	37.9	31.06	39.0	26.17	32.9	27.06	34.0	28.85	36.3	26.81	33.7	23.97	30.1	22.04	27.7
0.30	19.63	37.0	18.96	35.7	19.17	36.1	19.36	36.5	18.69	35.2	19.62	37.0	19.64	37.0	18.83	35.5	16.95	31.9	16.14	30.4
0.40	15.19	38.2	13.38	33.6	14.25	35.8	13.93	35.0	13.85	34.8	13.80	34.7	14.55	36.6	13.69	34.4	14.89	37.4	11.44	28.8
0.60	9.80	36.9	9.54	36.0	10.63	40.1	9.70	36.6	10.35	39.0	9.50	35.8	9.70	36.6	9.70	36.6	9.52	35.9	8.57	32.3
0.80	8.20	41.2	7.74	38.9	8.74	43.9	7.75	39.0	8.05	40.5	7.62	38.3	7.26	36.5	7.59	38.2	7.07	35.5	7.29	36.6
1.20	6.37	48.0	6.34	47.8	6.70	50.5	6.40	48.3	6.20	46.7	6.15	46.4	5.80	43.7	6.28	47.4	5.89	44.4	6.03	45.5
1.50	5.90	55.6	5.79	54.6	5.61	52.9	5.74	54.1	5.42	51.1	5.56	52.4	5.47	51.6	5.69	53.6	5.50	51.8	5.55	52.3
2.00	5.14	64.6	5.00	62.8	5.10	64.1	5.15	64.7	4.93	62.0	5.00	62.8	4.84	60.8	4.99	62.7	4.95	62.2	4.93	62.0
3.00	4.34	81.8	4.19	79.0	4.30	81.1	4.20	79.2	4.25	80.1	4.20	79.2	4.13	77.8	4.09	77.1	4.00	75.4	4.02	75.8
4.00	3.78	95.0	3.60	90.5	3.79	95.3	3.57	89.7	3.81	95.8	3.65	91.7	3.50	88.0	3.54	89.0	3.35	84.2	3.42	86.0
6.00	2.98	112.3	2.94	110.8	2.90	109.3	2.90	109.3	3.00	113.1	2.95	111.2	2.85	107.4	2.89	109.0	2.73	102.9	2.70	101.8
8.00	2.50	125.7	2.54	127.7	2.48	124.7	2.54	127.7	2.52	126.7	2.56	128.7	2.47	124.2	2.50	125.7	2.40	120.6	2.38	119.6
12.00	2.13	160.6	2.12	159.8	2.14	161.4	2.13	160.6	2.15	162.1	2.12	159.8	2.11	159.1	2.09	157.6	2.06	155.3	2.04	153.8
15.00	1.99	187.6	1.92	181.0	1.98	186.6	1.92	181.0	2.00	188.5	1.93	181.9	1.96	184.7	1.92	181.0	1.86	175.3	1.93	181.9

a (m)	136NS Ohm.m	136EW Ohm.m	137NS Ohm.m	137EW Ohm.m	138NS Ohm.m	138EW Ohm.m	139NS Ohm.m	139EW Ohm.m	140NS Ohm.m	140EW Ohm.m										
0.10	72.20	45.4	92.75	58.3	64.40	40.5	61.20	38.5	82.10	51.6	106.50	66.9	75.00	47.1	84.05	52.8	110.18	69.2	97.90	61.5
0.15	53.45	50.4	49.20	46.4	33.17	31.3	35.86	33.8	34.80	32.8	36.40	34.3	60.12	56.7	66.05	62.3	76.54	72.1	76.79	72.4
0.20	37.15	46.7	37.89	47.6	25.53	32.1	27.18	34.2	27.33	34.3	32.13	40.4	40.40	50.8	48.30	60.7	43.02	54.1	58.20	73.1
0.30	24.55	46.3	24.09	45.4	18.29	34.5	19.95	37.6	19.83	37.4	20.00	37.7	26.17	49.3	24.32	45.8	28.94	54.6	32.51	61.3
0.40	16.27	40.9	16.31	41.0	11.75	29.5	13.08	32.9	13.22	33.2	15.05	37.8	18.63	46.8	18.22	45.8	21.88	55.0	23.48	59.0
0.60	9.84	37.1	9.64	36.3	8.27	31.2	8.86	33.4	10.00	37.7	10.10	38.1	10.94	41.2	10.89	41.1	14.20	53.5	17.62	66.4
0.80	7.48	37.6	7.87	39.6	7.44	37.4	7.32	36.8	8.14	40.9	8.17	41.1	7.80	39.2	8.15	41.0	12.00	60.3	13.48	67.8
1.20	6.06	45.7	6.15	46.4	5.95	44.9	5.89	44.4	6.51	49.1	6.22	46.9	6.47	48.8	6.26	47.2	9.72	73.3	9.57	72.2
1.50	5.52	52.0	5.69	53.6	5.38	50.7	5.36	50.5	6.01	56.6	5.69	53.6	5.77	54.4	5.65	53.2	8.73	82.3	8.62	81.2
2.00	5.26	66.1	5.05	63.5	4.66	58.6	4.78	60.1	4.89	61.4	5.06	63.6	5.22	65.6	4.95	62.2	7.03	88.3	6.71	84.3
3.00	4.17	78.6	4.08	76.9	4.09	77.1	4.04	76.2	4.02	75.8	4.18	78.8	4.12	77.7	4.16	78.4	5.61	105.7	5.42	102.2
4.00	3.60	90.5	3.49	87.7	3.69	92.7	3.54	89.0	3.51	88.2	3.68	92.5	3.62	91.0	3.75	94.2	4.72	118.6	4.48	112.6
6.00	2.85	107.4	2.79	105.2	3.04	114.6	2.93	110.5	2.91	109.7	3.02	113.9	2.98	112.3	3.20	120.6	3.58	135.0	3.60	135.7
8.00	2.43	122.1	2.43	122.1	2.69	135.2	2.56	128.7	2.62	131.7	2.73	137.2	2.77	139.2	2.70	135.7	2.93	147.3	3.05	153.3
12.00	2.04	153.8	2.10	158.3	2.12	159.8	2.19	165.1	2.29	172.7	2.27	171.2	2.47	186.2	2.22	167.4	2.40	181.0	2.45	184.7
15.00	1.89	178.1	2.28	214.9	1.97	185.7	2.00	188.5	2.07	195.1	2.03	191.3	2.24	211.1	2.04	192.3	2.13	200.7	2.14	201.7

Tableau II.2c : Valeurs des résistances lues et des résistivités calculées pour chaque sondage électrique

Numéro Sondage	Épaisseur Tarière (cm)	Nombre Couches	Erreur (%)	ρ_1	e_1	ρ_2	e_2	ρ_3	e_3	ρ_4	e_4	ρ_5	e_5	ρ_6
111 Nord-Sud	105	3	3.4	30.0	0.86	130	3.40	370	-	-	-	-	-	-
111 Est-West	105	3	4.1	31.0	1.00	160	3.00	350	-	-	-	-	-	-
112 Nord-Sud	85	3	4.8	32.5	0.80	130	3.40	340	-	-	-	-	-	-
112 Est-West	85	3	1.9	30.2	0.85	142	3.20	350	-	-	-	-	-	-
113 Nord-Sud	95	3	2.9	29.0	0.83	125	3.40	400	-	-	-	-	-	-
113 Est-West	95	3	2.9	30.2	0.85	142	3.30	340	-	-	-	-	-	-
114 Nord-Sud	80	5	2.3	26.1	0.13	66.4	0.15	24.5	0.48	118	3.40	380	-	-
114 Est-West	80	5	2.0	28.0	0.15	67.2	0.11	22.8	0.48	150	3.40	341	-	-
115 Nord-Sud	105	5	2.5	22.7	0.16	44.8	0.12	23.5	0.62	193	3.60	300	-	-
115 Est-West	105	5	1.9	23.0	0.16	45.0	0.12	24.0	0.62	195	3.60	300	-	-
116 Nord-Sud	50	5	2.1	20.4	0.16	52.9	0.14	18.2	0.32	143	3.30	350	-	-
116 Est-West	50	5	1.9	20.8	0.16	50.2	0.13	19.8	0.29	141	3.60	330	-	-
117 Nord-Sud	35	5	2.0	22.4	0.10	47.8	0.11	33.8	0.15	82	3.10	287	-	-
117 Est-West	35	5	1.8	24.9	0.09	51.0	0.11	34.8	0.15	77.4	3.00	340	-	-
118 Nord-Sud	60	5	2.0	24.8	0.10	47.7	0.10	29.4	0.41	92	2.40	325	-	-
118 Est-West	60	5	2.0	30.0	0.09	50.3	0.10	27.5	0.43	96	2.10	365	-	-
119 Nord-Sud	45	5	2.0	18.8	0.09	47.3	0.10	38.0	0.22	105	2.30	303	-	-
119 Est-West	45	5	1.9	19.6	0.09	55.5	0.10	40.7	0.23	88	2.00	310	-	-
120 Nord-Sud	95	4	2.9	40.8	0.16	24.6	1.14	146.8	3.10	360	-	-	-	-
120 Est-West	95	4	2.0	50.7	0.17	25.8	1.20	142	3.20	333	-	-	-	-
121 Nord-Sud	40	4	2.8	25.0	0.30	110	3.00	185	6.60	365	-	-	-	-
121 Est-West	40	4	4.0	22.5	0.30	122	3.50	185	5.80	492	-	-	-	-
122 Nord-Sud	35	4	3.2	25.0	0.30	104	2.20	156	5.90	418	-	-	-	-
122 Est-West	35	4	3.0	25.0	0.33	113	2.10	168	5.80	421	-	-	-	-
123 Nord-Sud	45	4	4.3	26.0	0.34	116	2.10	140	6.40	394	-	-	-	-
123 Est-West	45	4	7.8	28.0	0.40	120	2.10	149	6.20	402	-	-	-	-
124 Nord-Sud	30	4	2.9	23.0	0.25	96	1.60	180	6.00	280	-	-	-	-
124 Est-West	30	4	1.9	19.0	0.20	102	1.70	163	6.10	320	-	-	-	-
125 Nord-Sud	40	4	3.3	25.0	0.37	105	2.66	200	6.44	300	-	-	-	-
125 Est-West	40	4	3.3	27.0	0.37	108	2.00	180	6.44	310	-	-	-	-
126 Nord-Sud	40	3	3.9	21.0	0.25	135	9.50	500	-	-	-	-	-	-
126 Est-West	40	3	2.2	21.0	0.25	135	9.50	500	-	-	-	-	-	-
127 Nord-Sud	35	4	1.9	15.0	0.10	46.5	0.23	116	9.90	600	-	-	-	-
127 Est-West	35	4	2.0	20.0	0.11	44.0	0.24	118	10.2	500	-	-	-	-
128 Nord-Sud	35	5	4.5	26.3	0.27	60.6	0.85	94.4	1.08	154.3	7.35	343	-	-
128 Est-West	35	5	2.9	21.5	0.36	47.0	1.00	77	1.15	122	7.23	400	-	-
129 Nord-Sud	90	4	2.1	79.0	0.30	15.0	0.38	114	9.00	429	-	-	-	-
129 Est-West	90	4	2.5	72.0	0.20	32.0	0.80	116	9.00	428	-	-	-	-
130 Nord-Sud	30	4	2.0	20.0	0.15	63.0	1.33	136	6.73	500	-	-	-	-
130 Est-West	30	4	2.5	21.0	0.17	74.0	1.42	122	6.30	520	-	-	-	-
131 Nord-Sud	60	5	2.5	35.0	0.80	100	1.40	180	4.50	60.0	3.00	5000	-	-
131 Est-West	60	6	2.0	45.0	0.20	22.0	0.37	100	2.70	230	4.50	60	3	4000
132 Nord-Sud	60	6	3.4	41.0	0.20	28.0	0.36	80	1.50	200	4.50	50	3.5	5000
132 Est-West	60	6	1.9	28.0	0.20	28.0	0.50	90	1.50	55	4.50	55	3.3	1000
133 Nord-Sud	65	5	2.6	34.0	0.75	79.0	1.52	231	4.40	55	3.30	1000	-	-
133 Est-West	65	5	2.8	32.0	0.72	84.0	1.50	230	4.50	56	3.20	1000	-	-
134 Nord-Sud	80	5	2.2	37.0	1.10	110	1.00	180	4.00	60	2.90	3000	-	-
134 Est-West	80	5	2.0	34.5	1.00	120	1.00	180	4.00	60	3.00	3000	-	-
135 Nord-Sud	70	4	3.1	30.4	0.90	150	5.20	60	3.10	5000	-	-	-	-
135 Est-West	70	4	4.0	28.0	0.80	145	5.00	60	3.20	6000	-	-	-	-
136 Nord-Sud	70	5	2.7	47.8	0.38	11.7	0.24	151	3.30	68	2.60	550	-	-
136 Est-West	70	5	2.0	50.0	0.38	11.0	0.22	155	3.00	60	2.50	650	-	-
137 Nord-Sud	70	5	3.0	43.2	0.10	26.0	0.70	160	3.00	71	2.00	530	-	-
137 Est-West	70	5	1.9	40.0	0.11	28.5	0.77	145	2.80	71	2.00	555	-	-
138 Nord-Sud	65	4	2.3	34.0	0.85	120	2.70	72	1.80	580	-	-	-	-
138 Est-West	65	4	3.7	36.6	1.03	140	2.70	80	1.80	520	-	-	-	-
139 Nord-Sud	105	5	4.0	63.4	0.13	38.4	1.13	149	2.55	85	1.70	583	-	-
139 Est-West	105	5	3.1	78.3	0.12	36.1	1.06	160	2.75	80	1.80	510	-	-
140 Nord-Sud	35	5	3.5	78.0	0.16	38.4	0.40	137	3.60	84	2.30	480	-	-
140 Est-West	35	5	3.8	76.8	0.18	49.0	0.43	114	2.95	96	1.75	390	-	-

Tableau II.3 : Nombre, épaisseur et résistivité des couches repérées lors de l'inversion des sondages électriques croisés

Numéro Sondage	$\rho_{LA} (\Omega m)$	Numéro Sondage	$\rho_{LA} (\Omega m)$	Numéro Sondage	$\rho_{LA} (\Omega m)$
111 Nord-Sud	30	121 Nord-Sud	25	131 Nord-Sud	35
111 Est-West	31	121 Est-West	22.5	131 Est-West	31*
112 Nord-Sud	32.5	122 Nord-Sud	25	132 Nord-Sud	34.5*
112 Est-West	30.2	122 Est-West	25	132 Est-West	35*
113 Nord-Sud	29	123 Nord-Sud	26	133 Nord-Sud	34
113 Est-West	30.2	123 Est-West	28	133 Est-West	32
114 Nord-Sud	39.0*	124 Nord-Sud	23	134 Nord-Sud	37
114 Est-West	39.3*	124 Est-West	19	134 Est-West	34.5
115 Nord-Sud	30.3*	125 Nord-Sud	25	135 Nord-Sud	30.4
115 Est-West	30.7*	125 Est-West	27	135 Est-West	28
116 Nord-Sud	30.5*	126 Nord-Sud	21	136 Nord-Sud	29.8*
116 Est-West	30.3*	126 Est-West	21	136 Est-West	30.5*
117 Nord-Sud	34.7*	127 Nord-Sud	38.3*	137 Nord-Sud	34.6*
117 Est-West	36.9*	127 Est-West	42*	137 Est-West	34.3*
118 Nord-Sud	34*	128 Nord-Sud	26.3	138 Nord-Sud	34
118 Est-West	36*	128 Est-West	21.5	138 Est-West	36.6
119 Nord-Sud	34.7*	129 Nord-Sud	47*	139 Nord-Sud	38.4**
119 Est-West	38.6*	129 Est-West	32**	139 Est-West	36.1**
120 Nord-Sud	32.7*	130 Nord-Sud	20	140 Nord-Sud	38.4**
120 Est-West	38.3*	130 Est-West	21	140 Est-West	49**

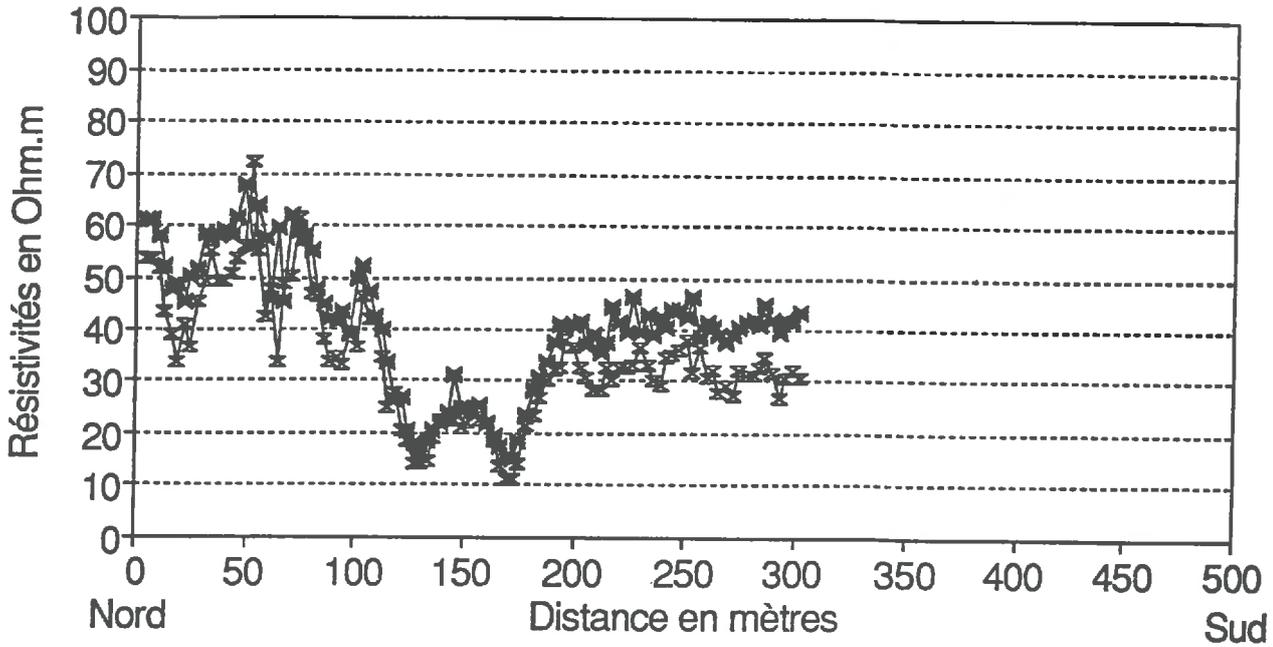
Tableau II.4 : Résistivité du LA calculée lors de l'inversion des sondages électriques croisés

ANNEXE 3

Profils géophysiques

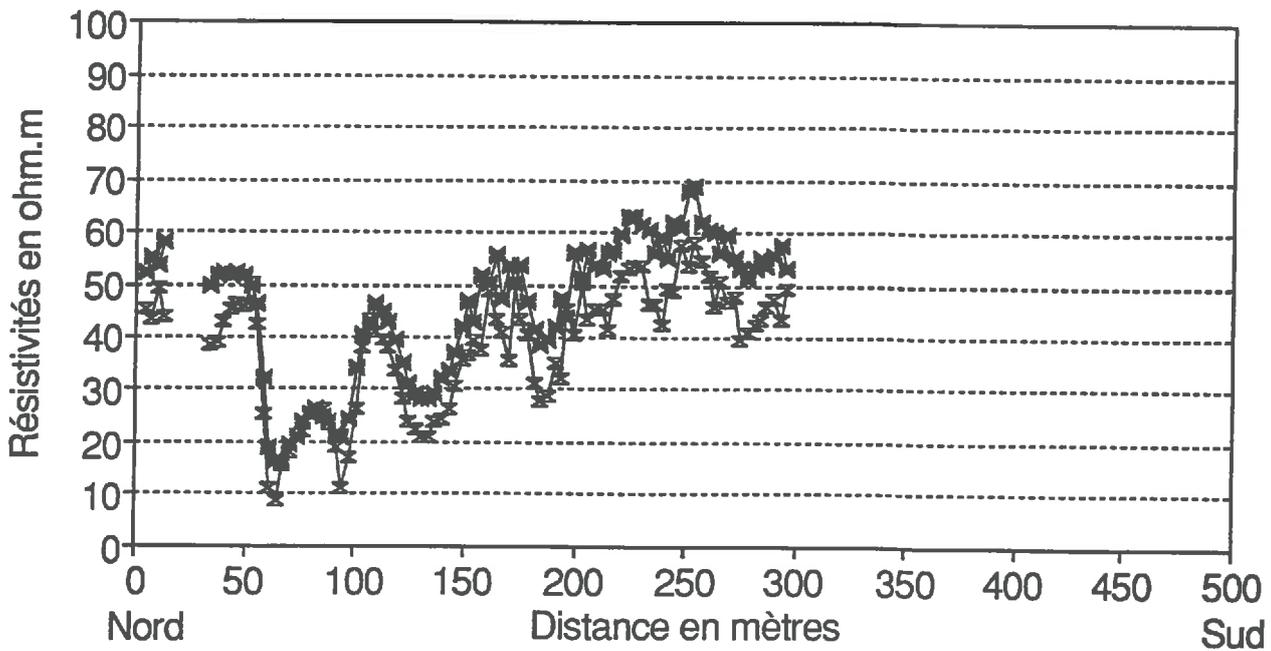
Profil électrique n° 1

le 19 janvier 1993



Profil électrique n° 2

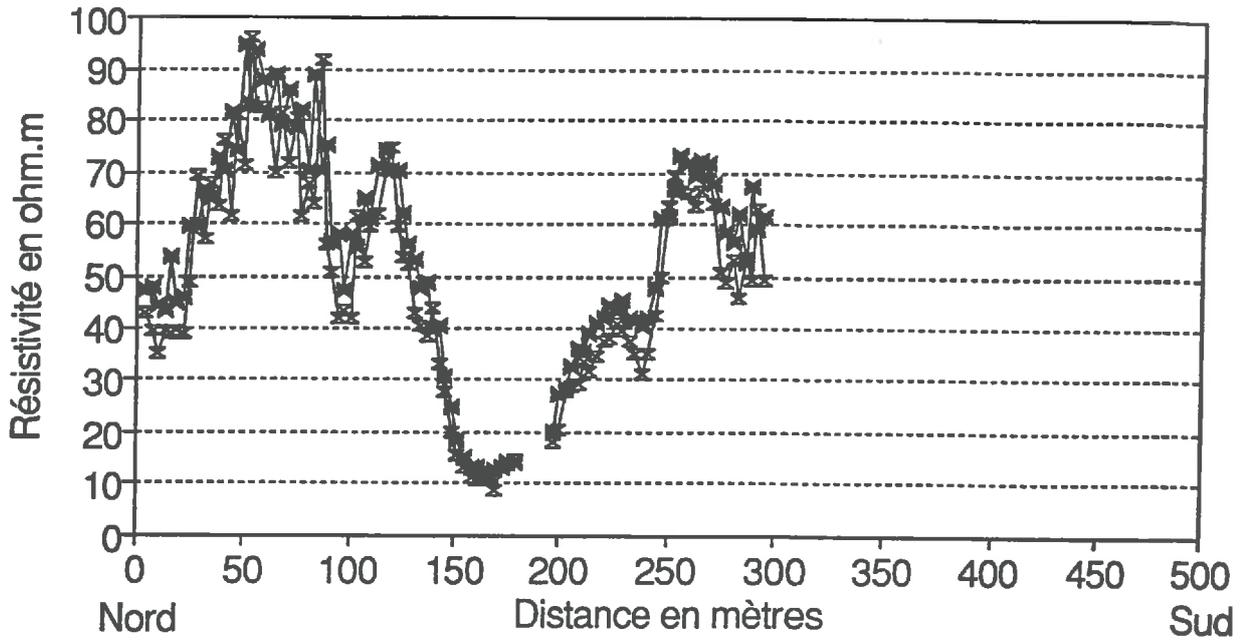
le 19 janvier 1993



—*— Mesures Wenner —x— Mesures Dipôle

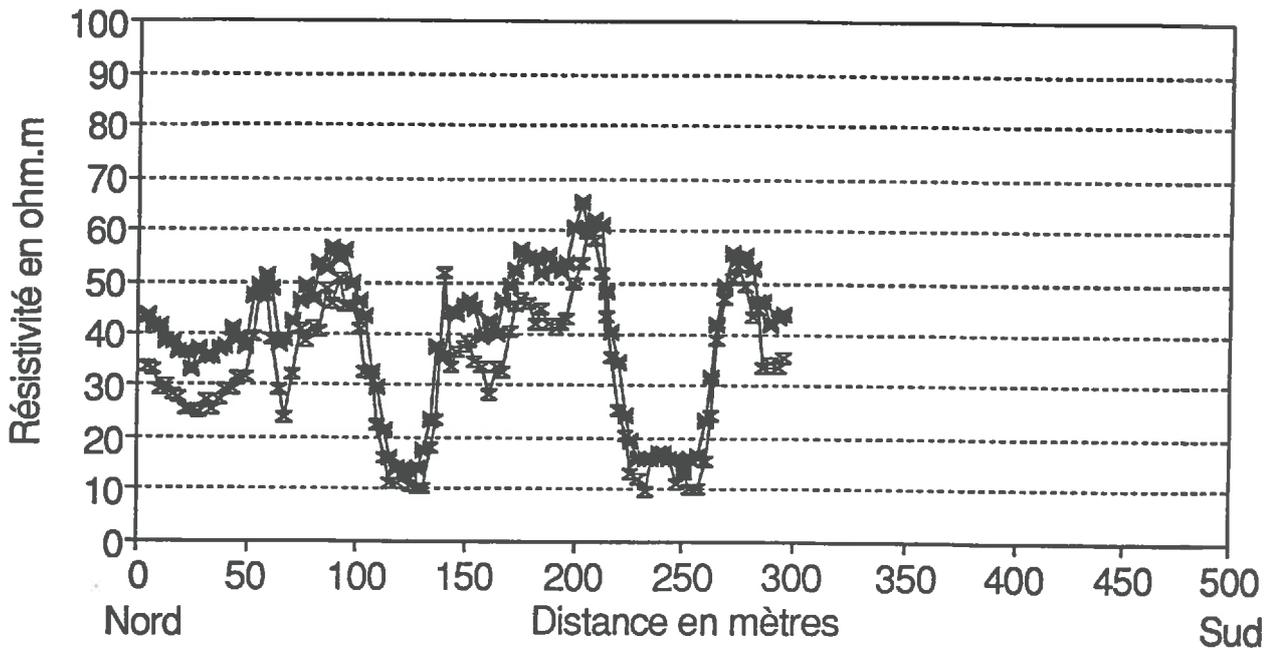
Profil électrique n° 3

le 19 janvier 1993



Profil électrique n° 4

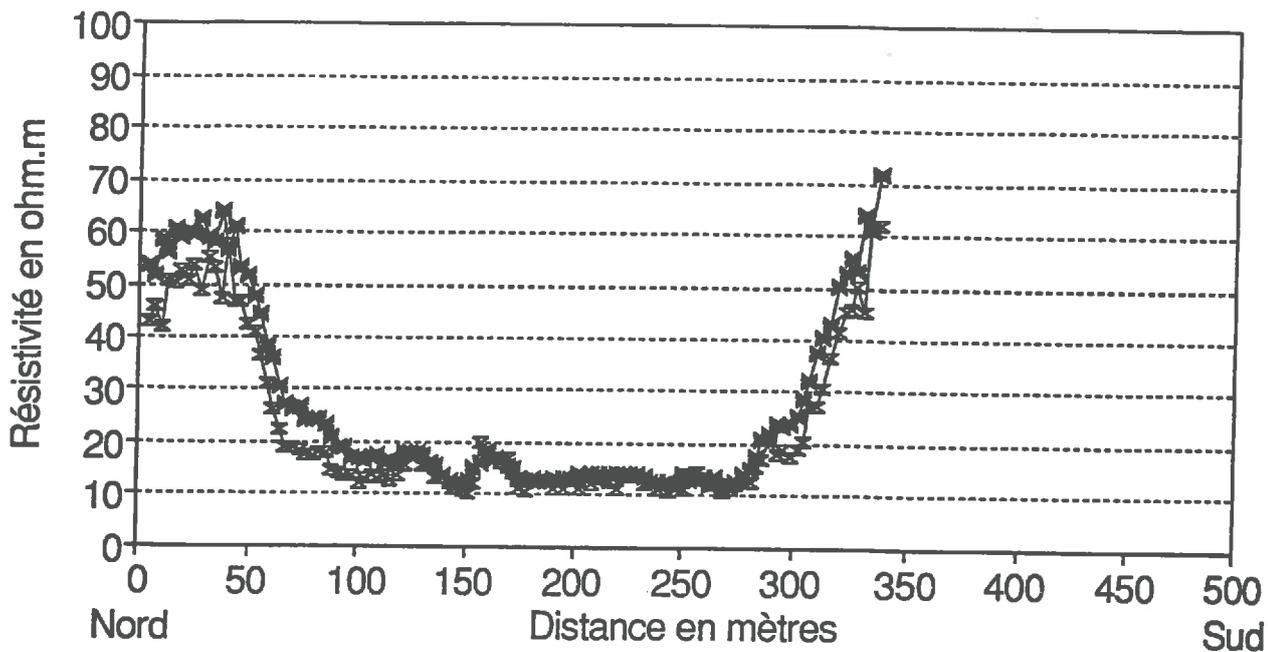
le 20 janvier 1993



—★— Mesures Wenner —×— Mesures Dipôle

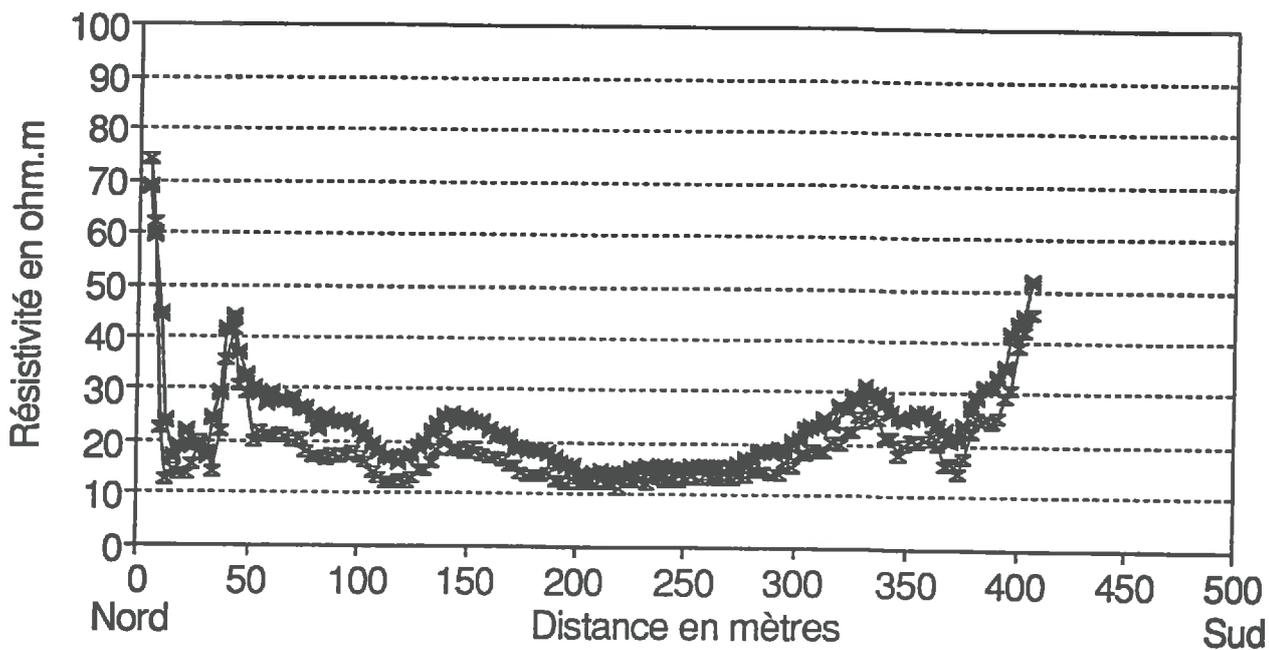
Profil électrique n° 5

le 20 janvier 1993



Profil électrique n° 6

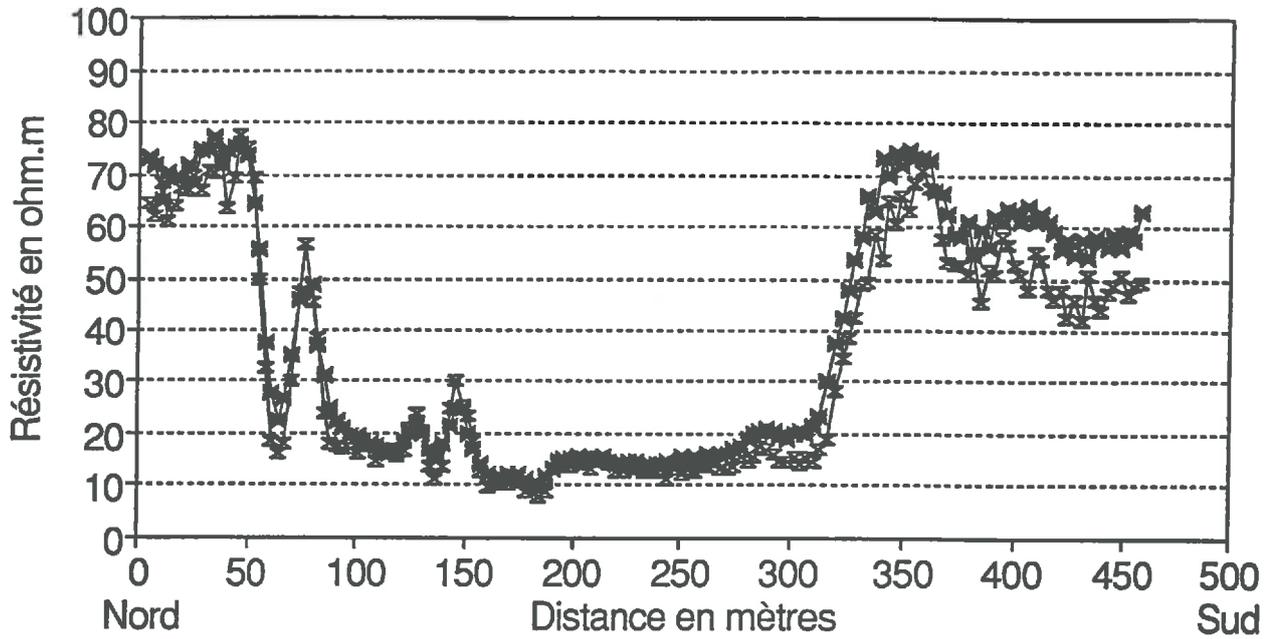
le 20 janvier 1993



—*— Mesures Wenner —x— Mesures Dipôle

Profil électrique n° 7

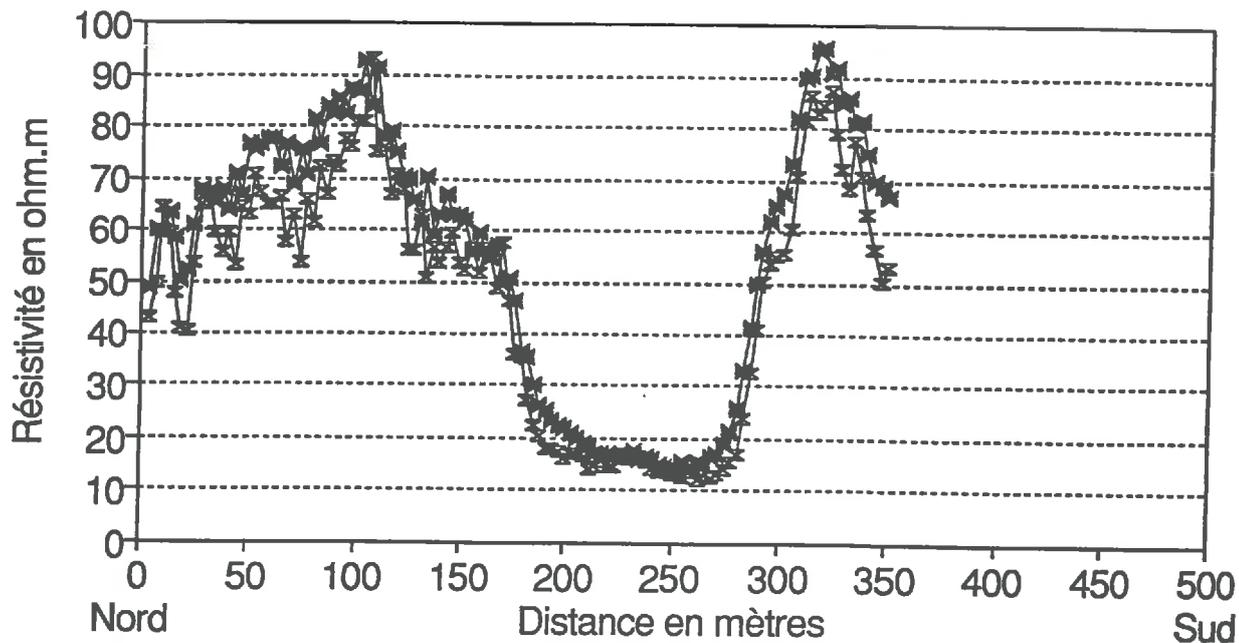
le 22 janvier 1993



—*— Mesures Wenner —x— Mesures Dipôle

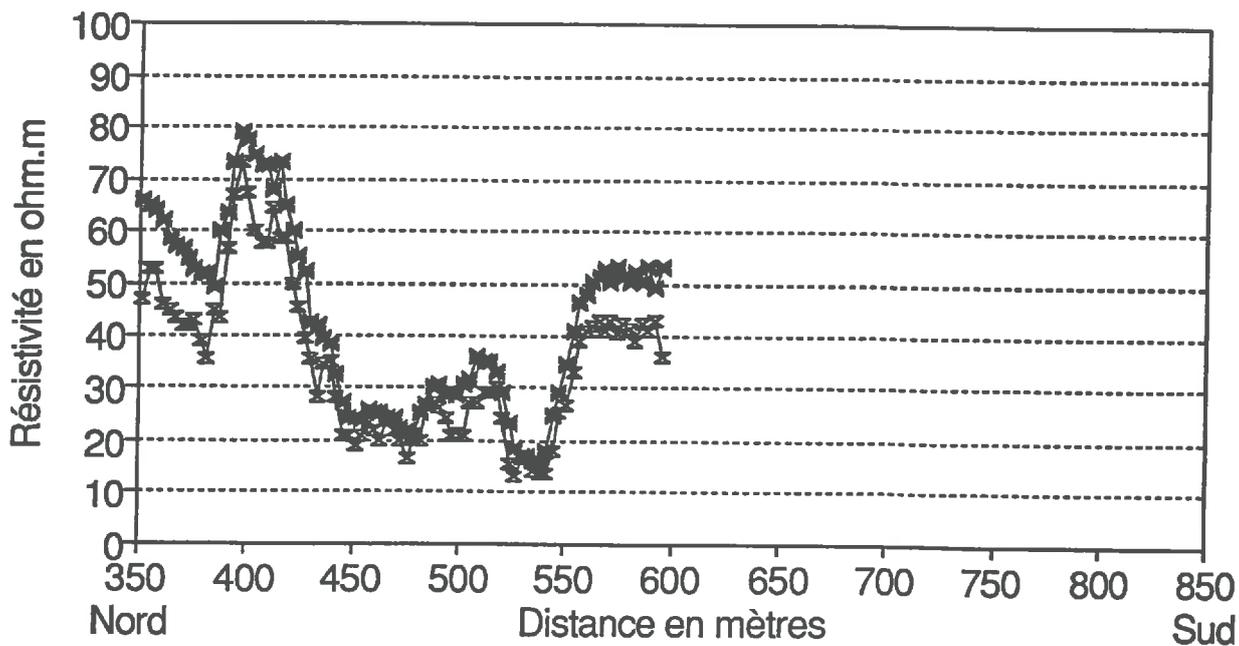
Profil électrique n° 8

le 21 janvier 1993



Profil électrique n° 8

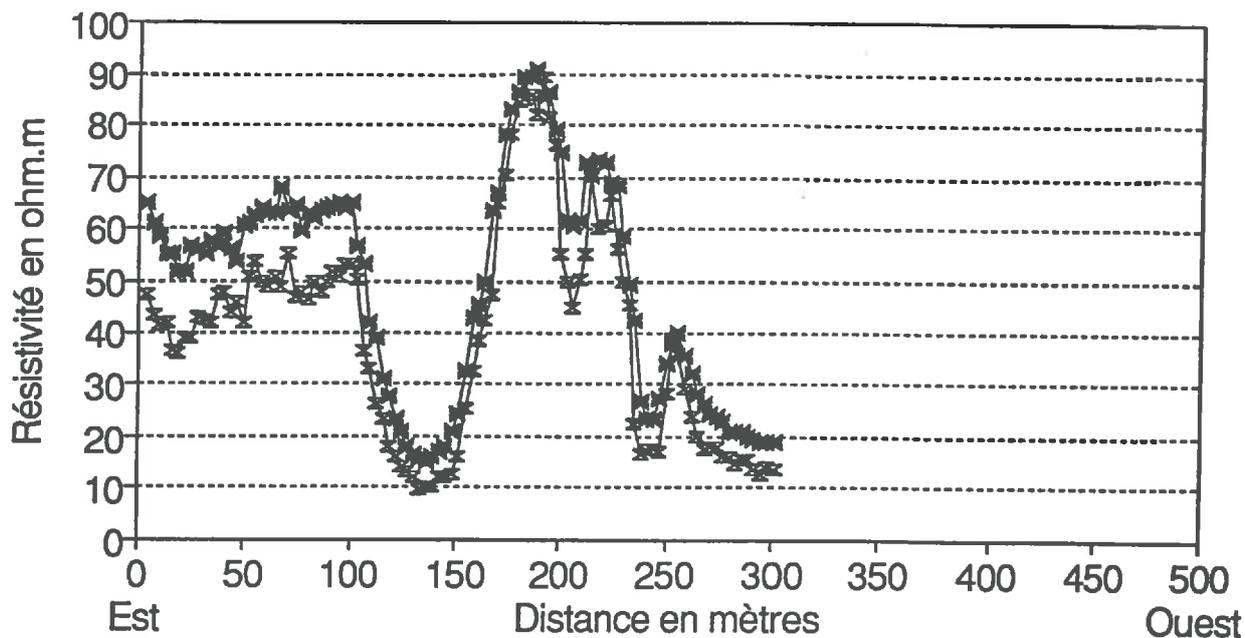
le 21 janvier 1993



—*— Mesures Wenner —x— Mesures Dipôle

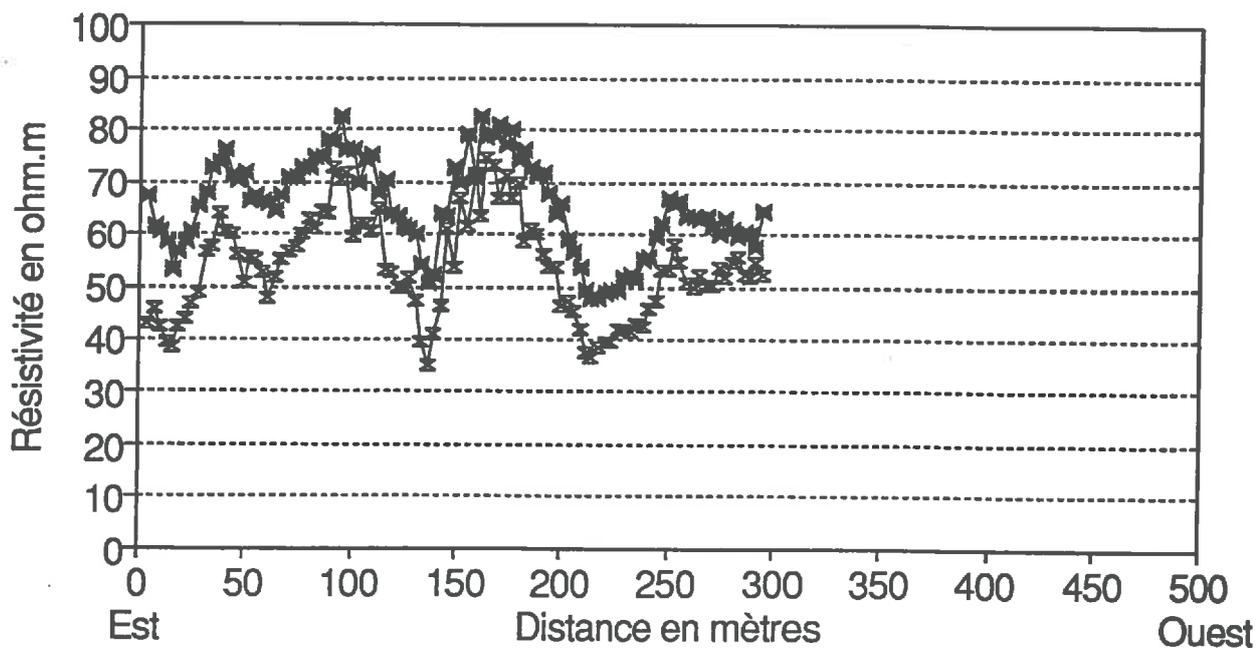
Profil électrique n° 9

le 28 janvier 1993



Profil électrique n° 10

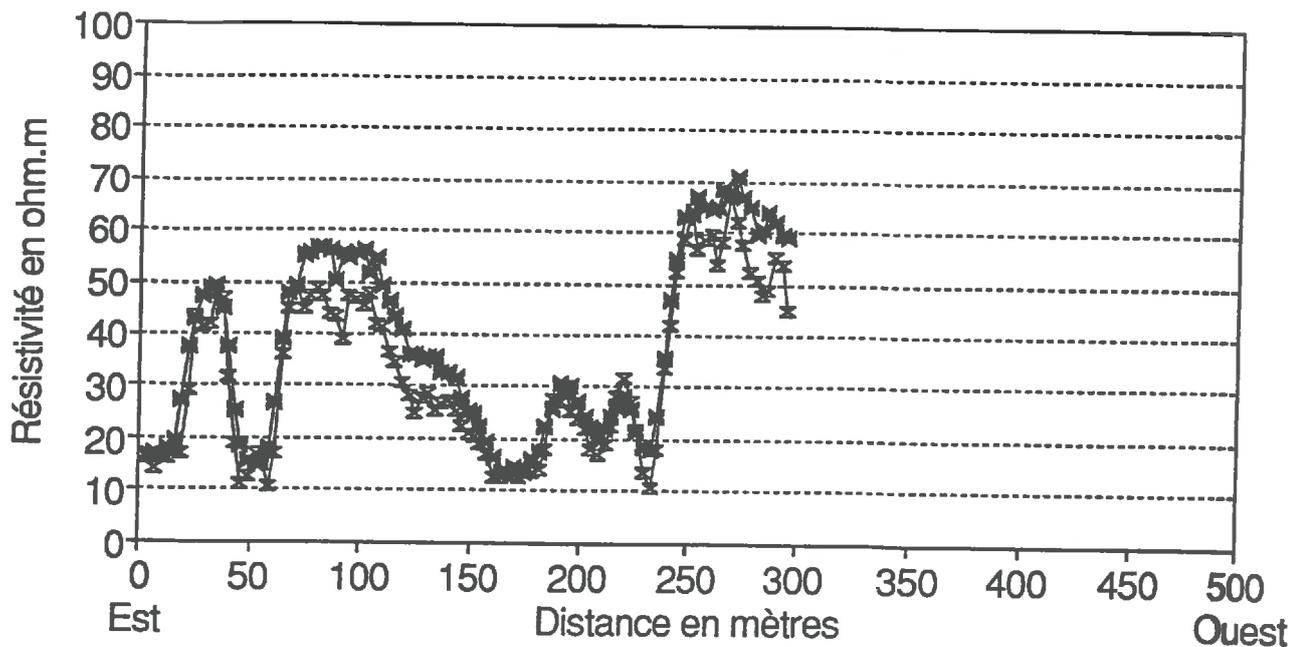
le 21 janvier 1993



—★— Mesures Wenner —×— Mesures Dipôle

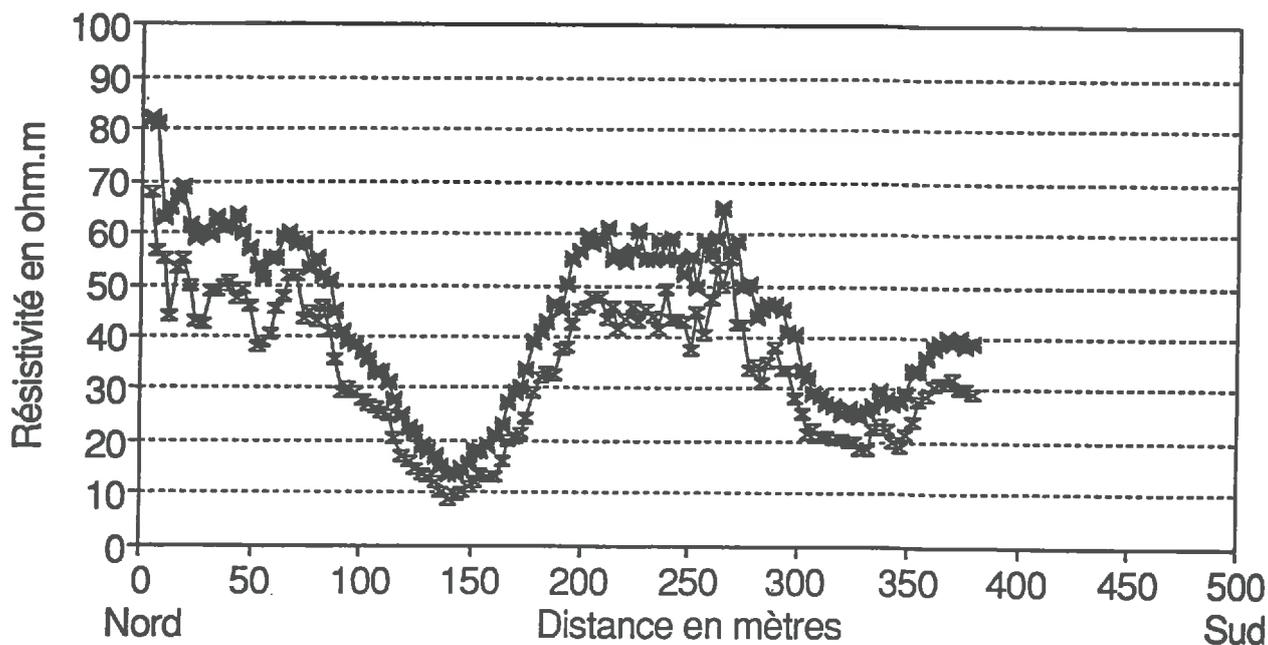
Profil électrique n° 11

le 22 janvier 1993



Profil électrique n° 12

le 28 janvier 1993



—x— Mesures Wenner —z— Mesures Dipôle

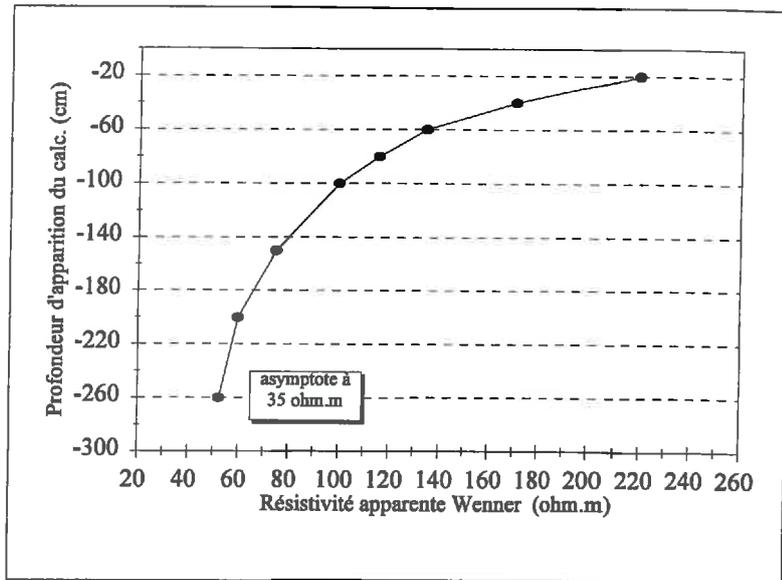


Figure III.14 : Modèle tabulaire plan 2D à 2 couches pour le calcul de la résistivité électrique apparente pour un quadripole Wenner de $a = 3$ m

ANNEXE 4

Variables climatiques
et
Détail des mesures de teneur en eau
sur les sondages à la tarière

BILAN HYDRIQUE DECAIDRE
DE LA STATION DE BRICY

Culture : nu
Indicatif : 45055001
Superficiel : 40 mm
Profond : 20 mm

Décade	ETP mm	Coeff k	ETM mm	PLUIE mm	ETR sup	ETR prof	ETR total	Réserves			Ecoule mm	ETM-ETR mm
								sup	prof	totale		
1 Jan 1990	0.7	0.50	0.4	0.3	0.4	0.0	0.4	40.1	20.0	60.1	0.0	0.0
2 Jan 1990	2.1	0.50	1.1	2.6	1.1	0.0	1.1	40.2	20.0	60.2	1.4	0.0
3 Jan 1990	14.4	0.50	7.2	20.7	7.2	0.0	7.2	40.2	20.0	60.2	13.5	0.0
1 Fév 1990	13.4	0.50	6.7	14.8	6.7	0.0	6.7	40.2	20.0	60.2	8.1	0.0
2 Fév 1990	10.1	0.50	5.1	23.5	5.1	0.0	5.1	40.2	20.0	60.2	18.4	0.0
3 Fév 1990	12.8	0.50	6.4	6.1	6.4	0.0	6.4	39.9	20.0	59.9	0.0	0.0
1 Mar 1990	15.3	0.50	7.7	0.2	7.7	0.0	7.7	32.4	20.0	52.4	0.0	0.0
2 Mar 1990	23.1	0.50	11.6	0.2	11.6	0.0	11.6	21.0	20.0	41.0	0.0	0.0
3 Mar 1990	21.9	0.50	11.0	11.3	11.0	0.0	11.0	21.3	20.0	41.3	0.0	0.0
1 Avr 1990	30.2	0.50	15.1	4.1	15.1	0.0	15.1	10.3	20.0	30.3	0.0	0.0
2 Avr 1990	25.7	0.50	12.9	23.8	10.3	2.6	12.9	23.8	17.4	41.2	0.0	0.0
3 Avr 1990	31.8	0.50	15.9	5.5	15.9	0.0	15.9	13.4	17.4	30.8	0.0	0.0
1 Mai 1990	45.4	0.50	22.7	12.9	13.4	8.1	21.5	12.9	9.3	22.2	0.0	1.2
2 Mai 1990	40.4	0.50	20.2	12.2	12.9	3.4	16.3	12.2	5.9	18.1	0.0	3.9
3 Mai 1990	47.6	0.50	23.8	0.7	12.2	3.4	15.6	0.7	2.5	3.2	0.0	8.2
1 Juin 1990	34.3	0.50	17.2	31.9	0.7	2.1	2.8	31.9	0.4	32.3	0.0	14.4
2 Juin 1990	35.4	0.50	17.7	12.7	17.7	0.0	17.7	26.9	0.4	27.3	0.0	0.0
3 Juin 1990	41.1	0.50	20.6	15.7	20.6	0.0	20.6	22.0	0.4	22.4	0.0	0.0
1 Juin 1990	38.3	0.50	19.2	18.9	19.2	0.0	19.2	21.7	0.4	22.1	0.0	0.0
2 Juin 1990	61.7	0.50	30.9	0.0	21.7	0.2	21.9	0.0	0.2	0.2	0.0	9.0
3 Juin 1990	62.6	0.50	31.3	10.2	0.0	0.3	0.3	10.2	-0.1	10.1	0.0	31.0
1 Aoû 1990	57.4	0.50	28.7	0.0	10.2	-0.1	10.1	0.0	0.0	0.0	0.0	18.6
2 Aoû 1990	45.1	0.50	22.6	12.1	0.0	0.0	0.0	12.1	0.0	12.1	0.0	22.6
3 Aoû 1990	42.7	0.50	21.4	3.1	12.1	0.0	12.1	3.1	0.0	3.1	0.0	9.3
1 Sep 1990	33.5	0.50	16.8	0.3	3.1	0.0	3.1	0.3	0.0	0.3	0.0	13.7
2 Sep 1990	30.7	0.50	15.4	0.1	0.3	0.0	0.3	0.1	0.0	0.1	0.0	15.1
3 Sep 1990	24.3	0.50	12.2	17.4	0.1	0.0	0.1	17.4	0.0	17.4	0.0	12.1
1 Oct 1990	18.2	0.50	9.1	2.1	9.1	0.0	9.1	10.4	0.0	10.4	0.0	0.0
2 Oct 1990	18.3	0.50	9.2	7.3	9.2	0.0	9.2	8.5	0.0	8.5	0.0	0.0
3 Oct 1990	14.7	0.50	7.4	55.6	7.4	0.0	7.4	40.2	16.5	56.7	0.0	0.0
1 Nov 1990	5.0	0.50	2.5	10.9	2.5	0.0	2.5	40.2	20.0	60.2	4.9	0.0
2 Nov 1990	6.9	0.50	3.5	25.4	3.5	0.0	3.5	40.2	20.0	60.2	21.9	0.0
3 Nov 1990	2.7	0.50	1.4	10.5	1.4	0.0	1.4	40.2	20.0	60.2	9.1	0.0
1 Déc 1990	3.0	0.50	1.5	2.9	1.5	0.0	1.5	40.2	20.0	60.2	1.4	0.0
2 Déc 1990	4.0	0.50	2.0	10.2	2.0	0.0	2.0	40.2	20.0	60.2	8.2	0.0
3 Déc 1990	2.9	0.50	1.5	27.1	1.5	0.0	1.5	40.2	20.0	60.2	25.6	0.0
1 Jan 1991	6.7	0.50	3.4	49.9	3.4	0.0	3.4	40.2	20.0	60.2	46.5	0.0
2 Jan 1991	5.0	0.50	2.5	8.3	2.5	0.0	2.5	40.2	20.0	60.2	5.8	0.0
3 Jan 1991	3.3	0.50	1.7	1.2	1.7	0.0	1.7	39.7	20.0	59.7	0.0	0.0
1 Fév 1991	2.8	0.50	1.4	3.8	1.4	0.0	1.4	40.2	20.0	60.2	1.9	0.0
2 Fév 1991	3.2	0.50	1.6	13.8	1.6	0.0	1.6	40.2	20.0	60.2	12.2	0.0
3 Fév 1991	6.0	0.50	3.0	4.4	3.0	0.0	3.0	40.2	20.0	60.2	1.4	0.0
1 Mar 1991	14.1	0.50	7.1	14.3	7.1	0.0	7.1	40.2	20.0	60.2	7.2	0.0
2 Mar 1991	18.3	0.50	9.2	11.7	9.2	0.0	9.2	40.2	20.0	60.2	2.5	0.0
3 Mar 1991	21.3	0.50	10.7	21.6	10.7	0.0	10.7	40.2	20.0	60.2	10.9	0.0
1 Avr 1991	25.7	0.50	12.9	10.2	12.9	0.0	12.9	37.5	20.0	57.5	0.0	0.0
2 Avr 1991	35.5	0.50	17.8	6.7	17.8	0.0	17.8	26.4	20.0	46.4	0.0	0.0
3 Avr 1991	25.5	0.50	12.8	14.2	12.8	0.0	12.8	27.8	20.0	47.8	0.0	0.0

AGRENOC-Calculs de BH : Edité dans l'état des fichiers au 12/08/94

Tableau IV.1a : Données météo de Bricy

BILAN HYDRIQUE DECADAIRE
DE LA STATION DE BRICY

Culture : nu
Indicatif : 45055001
Superficiel : 40 mm
Profond : 20 mm

Décade	ETP mm	Coeff k	ETM mm	PLUIE mm	ETR sup	ETR prof	ETR total	Réserves			Ecoule mm	ETM-ETR mm
								sup	prof	totale		
1 Mai 1991	24.0	0.50	12.0	16.5	12.0	0.0	12.0	32.3	20.0	52.3	0.0	0.0
2 Mai 1991	30.7	0.50	15.4	3.5	15.4	0.0	15.4	20.4	20.0	40.4	0.0	0.0
3 Mai 1991	56.3	0.50	28.2	0.0	20.4	7.8	28.2	0.0	12.2	12.2	0.0	0.0
1 Juin 1991	33.3	0.50	16.7	16.4	6.0	10.2	10.2	16.4	2.0	18.4	0.0	6.5
2 Juin 1991	31.6	0.50	15.8	11.7	15.8	0.0	15.8	12.3	2.0	14.3	0.0	0.0
3 Juin 1991	35.7	0.50	17.9	19.0	12.3	0.6	12.9	19.0	1.4	20.4	0.0	5.0
1 Juin 1991	45.1	0.50	22.6	22.0	19.0	0.3	19.3	22.0	1.1	23.1	0.0	3.3
2 Juin 1991	42.8	0.50	21.4	10.2	21.4	0.0	21.4	10.8	1.1	11.9	0.0	0.0
3 Juin 1991	46.9	0.50	23.5	42.2	10.8	0.7	11.5	40.2	2.4	42.6	0.0	12.0
1 Août 1991	39.7	0.50	19.9	20.2	19.9	0.0	19.9	40.2	2.7	42.9	0.0	0.0
2 Août 1991	43.8	0.50	21.9	0.0	21.9	0.0	21.9	18.3	2.7	21.0	0.0	0.0
3 Août 1991	52.7	0.50	26.4	3.2	18.3	1.1	19.4	3.2	1.6	4.8	0.0	7.0
1 Sep 1991	36.8	0.50	18.4	37.9	3.2	1.2	4.4	37.9	0.4	38.3	0.0	14.0
2 Sep 1991	24.9	0.50	12.5	19.0	12.5	0.0	12.5	40.2	4.6	44.8	0.0	0.0
3 Sep 1991	16.4	0.50	8.2	23.5	8.2	0.0	8.2	40.2	19.9	60.1	0.0	0.0
1 Oct 1991	14.4	0.50	7.2	8.7	7.2	0.0	7.2	40.2	20.0	60.2	1.4	0.0
2 Oct 1991	12.0	0.50	6.0	20.8	6.0	0.0	6.0	40.2	20.0	60.2	14.8	0.0
3 Oct 1991	5.7	0.50	2.9	6.6	2.9	0.0	2.9	40.2	20.0	60.2	3.7	0.0
1 Nov 1991	5.6	0.50	2.8	13.2	2.8	0.0	2.8	40.2	20.0	60.2	10.4	0.0
2 Nov 1991	3.5	0.50	1.8	39.8	1.8	0.0	1.8	40.2	20.0	60.2	38.0	0.0
3 Nov 1991	2.0	0.50	1.0	0.0	1.0	0.0	1.0	39.2	20.0	59.2	0.0	0.0
1 Déc 1991	1.6	0.50	0.8	0.0	0.8	0.0	0.8	38.4	20.0	58.4	0.0	0.0
2 Déc 1991	2.1	0.50	1.1	12.0	1.1	0.0	1.1	40.2	20.0	60.2	9.1	0.0
3 Déc 1991	0.8	0.50	0.4	0.5	0.4	0.0	0.4	40.2	20.0	60.2	0.1	0.0
1 Jan 1992	0.9	0.50	0.5	5.6	0.5	0.0	0.5	40.2	20.0	60.2	5.1	0.0
2 Jan 1992	1.3	0.50	0.7	1.2	0.7	0.0	0.7	40.2	20.0	60.2	0.5	0.0
3 Jan 1992	3.9	0.50	2.0	0.0	2.0	0.0	2.0	38.2	20.0	58.2	0.0	0.0
1 Fév 1992	2.8	0.50	1.4	8.0	1.4	0.0	1.4	40.2	20.0	60.2	4.6	0.0
2 Fév 1992	3.2	0.50	1.6	12.5	1.6	0.0	1.6	40.2	20.0	60.2	10.9	0.0
3 Fév 1992	5.1	0.50	2.6	0.0	2.6	0.0	2.6	37.6	20.0	57.6	0.0	0.0
1 Mar 1992	15.7	0.50	7.9	4.5	7.9	0.0	7.9	34.2	20.0	54.2	0.0	0.0
2 Mar 1992	18.6	0.50	9.3	2.9	9.3	0.0	9.3	27.8	20.0	47.8	0.0	0.0
3 Mar 1992	20.0	0.50	10.0	30.6	10.0	0.0	10.0	40.2	20.0	60.2	8.2	0.0
1 Avr 1992	25.2	0.50	12.6	8.0	12.6	0.0	12.6	35.6	20.0	55.6	0.0	0.0
2 Avr 1992	24.6	0.50	12.3	12.4	12.3	0.0	12.3	35.7	20.0	55.7	0.0	0.0
3 Avr 1992	28.9	0.50	14.5	11.1	14.5	0.0	14.5	32.3	20.0	52.3	0.0	0.0
1 Mai 1992	32.8	0.50	16.4	4.9	16.4	0.0	16.4	20.8	20.0	40.8	0.0	0.0
2 Mai 1992	54.0	0.50	27.0	0.0	20.8	6.2	27.0	0.0	13.8	13.8	0.0	0.0
3 Mai 1992	44.2	0.50	22.1	13.6	0.0	15.2	15.2	13.6	-1.4	12.2	0.0	6.9
1 Juin 1992	33.8	0.50	16.9	11.6	13.6	-0.2	13.4	11.6	-1.2	10.4	0.0	3.5
2 Juin 1992	44.5	0.50	22.3	8.2	11.6	-0.6	11.0	8.2	-0.6	7.6	0.0	11.3
3 Juin 1992	38.2	0.50	19.1	22.7	8.2	-0.3	7.9	22.7	-0.3	22.4	0.0	11.2
1 Juin 1992	29.4	0.50	14.7	17.8	14.7	0.0	14.7	25.8	-0.3	25.5	0.0	0.0
2 Juin 1992	44.9	0.50	22.5	10.7	22.5	0.0	22.5	14.0	-0.3	13.7	0.0	0.0
3 Juin 1992	54.5	0.50	27.3	4.0	14.0	-0.2	13.8	4.0	-0.1	3.9	0.0	13.5
1 Août 1992	49.1	0.50	24.6	14.6	4.0	-0.1	3.9	14.6	0.0	14.6	0.0	20.7
2 Août 1992	35.0	0.50	17.5	13.0	14.6	0.0	14.6	13.0	0.0	13.0	0.0	2.9
3 Août 1992	33.5	0.50	16.8	20.3	13.0	0.0	13.0	20.3	0.0	20.3	0.0	3.8

ciel AGRONOE-Calculs de BH : Edité dans l'état des fichiers au 12/08/94

Tableau IV.1b : Données météo de Bricy

BILAN HYDRIQUE DECAIDRE
DE LA STATION DE BRICY

Culture : nu
Indicatif : 45055001
Superficiel : 40 mm
Profond : 20 mm

Décade	ETP mm	Coeff k	ETM mm	PLUIE mm	ETR sup	ETR prof	ETR total	Réserves sup	Réserves prof	Réserves totale	Ecoul mm	ETM-ETR mm
1 Sep 1992	25.0	0.50	12.5	6.6	12.5	0.0	12.5	14.4	0.0	14.4	0.0	0.0
2 Sep 1992	23.2	0.50	11.6	1.2	11.6	0.0	11.6	4.0	0.0	4.0	0.0	0.0
3 Sep 1992	17.8	0.50	8.9	42.1	4.0	0.0	4.0	40.2	1.9	42.1	0.0	4.9
1 Oct 1992	10.7	0.50	5.4	20.7	5.4	0.0	5.4	40.2	17.2	57.4	0.0	0.0
2 Oct 1992	9.9	0.50	5.0	2.1	5.0	0.0	5.0	37.3	17.2	54.5	0.0	0.0
3 Oct 1992	8.7	0.50	4.4	19.2	4.4	0.0	4.4	40.2	20.0	60.2	9.1	0.0
1 Nov 1992	3.7	0.50	1.9	26.8	1.9	0.0	1.9	40.2	20.0	60.2	24.9	0.0
2 Nov 1992	5.0	0.50	2.5	41.7	2.5	0.0	2.5	40.2	20.0	60.2	39.2	0.0
3 Nov 1992	3.7	0.50	1.9	13.1	1.9	0.0	1.9	40.2	20.0	60.2	11.2	0.0
1 Déc 1992	3.9	0.50	2.0	59.0	2.0	0.0	2.0	40.2	20.0	60.2	57.0	0.0
2 Déc 1992	4.5	0.50	2.3	5.5	2.3	0.0	2.3	40.2	20.0	60.2	3.2	0.0
3 Déc 1992	1.7	0.50	0.9	2.4	0.9	0.0	0.9	40.2	20.0	60.2	1.5	0.0
1 Jan 1993	1.8	0.50	0.9	6.8	0.9	0.0	0.9	40.2	20.0	60.2	5.9	0.0
2 Jan 1993	6.2	0.50	3.1	35.9	3.1	0.0	3.1	40.2	20.0	60.2	32.8	0.0
3 Jan 1993	4.2	0.50	2.1	13.8	2.1	0.0	2.1	40.2	20.0	60.2	11.7	0.0
1 Fév 1993	2.2	0.50	1.1	0.8	1.1	0.0	1.1	39.9	20.0	59.9	0.0	0.0
2 Fév 1993	3.5	0.50	1.8	0.6	1.8	0.0	1.8	38.7	20.0	58.7	0.0	0.0
3 Fév 1993	5.8	0.50	2.9	23.3	2.9	0.0	2.9	40.2	20.0	60.2	18.9	0.0
1 Mar 1993	11.0	0.50	5.5	0.0	5.5	0.0	5.5	34.7	20.0	54.7	0.0	0.0
2 Mar 1993	17.9	0.50	9.0	0.0	9.0	0.0	9.0	25.7	20.0	45.7	0.0	0.0
3 Mar 1993	20.1	0.50	10.1	8.2	10.1	0.0	10.1	23.8	20.0	43.8	0.0	0.0
1 Avr 1993	18.3	0.50	9.2	16.8	9.2	0.0	9.2	31.4	20.0	51.4	0.0	0.0
2 Avr 1993	22.2	0.50	11.1	7.5	11.1	0.0	11.1	27.8	20.0	47.8	0.0	0.0
3 Avr 1993	27.4	0.50	13.7	46.3	13.7	0.0	13.7	40.2	20.0	60.2	20.2	0.0
1 Mai 1993	25.5	0.50	12.8	25.1	12.8	0.0	12.8	40.2	20.0	60.2	12.3	0.0
2 Mai 1993	29.4	0.50	14.7	42.1	14.7	0.0	14.7	40.2	20.0	60.2	27.4	0.0
3 Mai 1993	37.0	0.50	18.5	15.0	18.5	0.0	18.5	36.7	20.0	56.7	0.0	0.0
1 Juin 1993	41.2	0.50	20.6	9.8	20.6	0.0	20.6	25.9	20.0	45.9	0.0	0.0
2 Juin 1993	36.3	0.50	18.2	18.8	18.2	0.0	18.2	26.5	20.0	46.5	0.0	0.0
3 Juin 1993	44.6	0.50	22.3	3.0	22.3	0.0	22.3	7.2	20.0	27.2	0.0	0.0
1 Juin 1993	45.0	0.50	22.5	1.5	7.2	15.3	22.5	1.5	4.7	6.2	0.0	0.0
2 Juin 1993	36.1	0.50	18.1	14.9	1.5	3.9	5.4	14.9	0.8	15.7	0.0	12.7
3 Juin 1993	44.5	0.50	22.3	6.0	14.9	0.3	15.2	6.0	0.5	6.5	0.0	7.1
1 Aoû 1993	44.2	0.50	22.1	3.0	6.0	0.4	6.4	3.0	0.1	3.1	0.0	15.7
2 Aoû 1993	46.1	0.50	23.1	2.8	3.0	0.1	3.1	2.8	0.0	2.8	0.0	20.0
3 Aoû 1993	43.8	0.50	21.9	2.6	2.8	0.0	2.8	2.6	0.0	2.6	0.0	19.1
1 Sep 1993	30.1	0.50	15.1	24.4	2.6	0.0	2.6	24.4	0.0	24.4	0.0	12.5
2 Sep 1993	24.2	0.50	12.1	40.4	12.1	0.0	12.1	40.2	12.5	52.7	0.0	0.0
3 Sep 1993	16.9	0.50	8.5	32.9	8.5	0.0	8.5	40.2	20.0	60.2	16.9	0.0
1 Oct 1993	15.3	0.50	7.7	43.0	7.7	0.0	7.7	40.2	20.0	60.2	35.3	0.0
2 Oct 1993	13.0	0.50	6.5	30.5	6.5	0.0	6.5	40.2	20.0	60.2	24.0	0.0
3 Oct 1993	11.2	0.50	5.6	4.6	5.6	0.0	5.6	39.2	20.0	59.2	0.0	0.0
1 Nov 1993	5.8	0.50	2.9	7.7	2.9	0.0	2.9	40.2	20.0	60.2	3.8	0.0
2 Nov 1993	5.5	0.50	2.8	2.8	2.8	0.0	2.8	40.2	20.0	60.2	0.0	0.0
3 Nov 1993	2.7	0.50	1.4	10.0	1.4	0.0	1.4	40.2	20.0	60.2	8.6	0.0
1 Déc 1993	4.0	0.50	2.0	10.5	2.0	0.0	2.0	40.2	20.0	60.2	8.5	0.0
2 Déc 1993	5.5	0.50	2.8	25.7	2.8	0.0	2.8	40.2	20.0	60.2	22.9	0.0
3 Déc 1993	3.9	0.50	2.0	26.3	2.0	0.0	2.0	40.2	20.0	60.2	24.3	0.0

AGRONOE-Calculs de BH : Edité dans l'état des fichiers au 12/08/94

Tableau IV.1c : Données météo de Bricy

Mars 1991

Sondage	Epaisseur du LA (cm)	W% moy. vol. (mm/cm)	Parcelle	Occupation du sol	Irrigation
1	75	3.42	1	BLE DUR	0
2	80	3.38	1	BLE DUR	0
3	80	3.35	1	BLE DUR	0
4	40	3.54	2	SEIGLE	0
5	35	3.47	2	SEIGLE	0
6	30	3.22	1	BLE DUR	0
7	78	3.46	1	BLE DUR	0
8	95	3.43	3	COLZA	0
9	75	3.37	3	COLZA	0
10	45	3.26	3	COLZA	0
11	75	3.34	2	SEIGLE	0
12	90	3.19	3	COLZA	0
13	70	3.27	3	COLZA	0
14	90	3.25	3	COLZA	0
15	35	2.92	3	COLZA	0
16	90	3.30	3	COLZA	0
17	100	3.26	5	ORGE	0
18	90	3.62	4	BLE DUR	0
19	110	3.21	4	BLE DUR	0
20	110	3.28	3	COLZA	0
21	90	3.41	3	COLZA	0
22	90	3.26	6	BLE DUR	0
23	90	3.30	6	BLE DUR	0
24	75	3.41	5	ORGE	0
25	50	3.56	5	ORGE	0
26	75	3.36	5	ORGE	0
27	90	3.34	4	BLE DUR	0
28	85	3.42	8	MAIS	1
29	30	3.30	8	MAIS	1
30	100	3.31	6	BLE DUR	0
31	70	3.31	6	BLE DUR	0
32	100	3.19	6	BLE DUR	0
33	100	3.37	5	ORGE	0
34	50	3.50	10	POIS	1
35	80	3.29	9	BLE	1
36	30	3.47	9	BLE	1
37	110	3.45	8	MAIS	1
38	90	3.60	8	MAIS	1
39	60	3.27	7	BLE TENDRE	0
40	28	3.73	13	BLE	0
41	80	3.52	10	POIS	1
42	25	3.45	10	POIS	1
43	60	3.73	10	POIS	1
44	65	3.56	7	BLE TENDRE	0
45	70	3.43	7	BLE TENDRE	0
46	55	3.96	11	MAIS	1
47	45	3.61	11	MAIS	1
48	60	3.38	7	BLE TENDRE	0
49	110	3.34	7	BLE TENDRE	0
50	60	3.40	7	BLE TENDRE	0

Tableau IV.2 : Détail des mesures de teneurs en eau réalisées sur les sondages à la tarière (sondages 1 à 50)

Septembre 1991

Sondage	Epaisseur du LA (cm)	W% moy. vol. (mm/cm)	Parcelle	Occupation du sol	Irrigation
51	65	1.92	14	FRICHE	0
52	20	2.07	2	CHAUM SEIGLE	0
53	40	2.74	1	CHAUM BLE D	0
54	40	2.60	1	CHAUM BLE D	0
55	80	2.08	14	COLZA	0
56	90	2.40	14	CHAUM POIS	0
57	55	2.51	3	CHAUM COLZA	0
58	55	2.50	2	CHAUM SEIGLE	0
59	50	2.13	2	CHAUM SEIGLE	0
60	90	2.49	1	CHAUM BLE D	0
61	80	2.39	3	CHAUM COLZA	0
62	80	2.26	3	CHAUM COLZA	0
63	90	2.24	3	CHAUM COLZA	0
64	85	2.51	3	CHAUM COLZA	0
65	45	2.49	14	LABOUR	0
66	70	2.42	4	CHAUM BLE D	0
67	65	2.05	3	CHAUM COLZA	0
68	70	2.41	3	CHAUM COLZA	0
69	35	2.71	3	CHAUM COLZA	0
70	75	2.40	5	CHAUM ORGE	0
71	75	2.64	5	CHAUM ORGE	0
72	65	2.49	5	CHAUM ORGE	0
73	110	2.23	4	CHAUM BLE D	0
74	90	2.41	4	CHAUM BLE D	0
75	75	3.16	8	MAIS	1
76	50	2.69	6	CHAUM BLE D	0
77	110	2.08	6	CHAUM BLE D	0
78	125	2.26	6	CHAUM BLE D	0
79	100	2.21	5	CHAUM ORGE	0
80	90	2.25	5	CHAUM ORGE	0
81	110	2.67	9	CHAUM BLE	1
82	50	3.21	8	MAIS	1
83	60	2.97	8	MAIS	1
84	100	2.43	8	MAIS	1
85	90	2.05	6	CHAUM BLE D	0
86	50	2.53	6	CHAUM BLE D	0
87	65	2.49	10	CHAUM POIS	1
88	50	2.56	10	CHAUM POIS	1
89	45	2.90	9	CHAUM BLE	1
90	65	2.62	9	CHAUM BLE	1
91	45	2.45	7	LABOU BLE T	0
92	40	2.60	7	LABOU BLE T	0
93	120	2.14	13	CHAUM BLE	0
94	40	3.27	11	MAIS	1
95	30	2.63	10	CHAUM POIS	1
96	30	2.98	10	CHAUM POIS	1
97	75	2.33	7	LABOU BLE T	0
98	50	2.51	7	LABOU BLE T	0
99	80	2.60	7	LABOU BLE T	0
100	100	2.28	7	LABOU BLE T	0

Tableau IV.3 : Détail des mesures de teneurs en eau réalisées sur les sondages à la tarière (sondages 51 à 100)

Septembre 1992

Sondage	Epaisseur du LA (cm)	W% moy. vol. (mm/cm)	Parcelle	Occupation du sol	Irrigation
151	65	2.23	1	ORGE	0
152	80	1.87	1	ORGE	0
153	75	2.22	1	ORGE	0
154	45	1.94	2	ORGE	0
155	40	2.07	2	ORGE	0
156	50	2.15	1	ORGE	0
157	35	1.88	1	ORGE	0
158	50	2.24	3	BLE	0
159	50	1.97	3	BLE	0
160	50	2.42	3	BLE	0
161	40	2.10	3	BLE	0
162	70	1.96	2	ORGE	0
163	50	2.22	3	BLE	0
164	65	1.99	3	BLE	0
165	70	2.00	3	BLE	0
166	50	2.60	3	BLE	0
167	85	1.92	5	BLE	0
168	80	2.13	5	POIS	0
169	80	1.95	4	POIS	0
170	65	1.97	4	POIS	0
171	80	1.91	3	BLE	0
172	115	2.03	6	TOURNESOL	0
173	95	2.03	5	POIS	0
174	85	2.07	5	POIS	0
175	75	2.49	5	POIS	0
176	90	2.35	5	POIS	0
177	70	2.64	8	BLE IR.	1
178	40	3.26	8	BLE IR.	1
179	30	2.45	6	TOURNESOL	0
180	80	2.12	6	TOURNESOL	0
181	80	1.91	6	TOURNESOL	0
182	75	2.44	5	POIS	0
183	60	2.55	10	MAIS IR.	1
184	55	2.60	9	POIS IR.	1
185	45	3.29	9	POIS IR.	1
186	50	2.24	8	BLE IR.	1
187	60	2.78	7	BLE	0
188	100	2.49	6	TOURNESOL	0
189	50	2.89	13	BLE IR.	1
190	75	2.20	12	ARBUSTE	0
191	40	3.31	10	MAIS IR.	1
192	50	3.42	10	MAIS IR.	1
193	35	3.37	10	MAIS IR.	1
194	80	2.18	7	BLE	0
195	65	3.32	14	MAIS IR.	1
196	80	2.71	11	BLE IR.	1
197	35	2.94	11	BLE IR.	1
198	80	2.09	7	BLE	0
199	75	2.27	7	BLE	0
200	115	2.20	7	BLE	0

Tableau IV.4 : Détail des mesures de teneurs en eau réalisées sur les sondages à la tarière (sondages 151 à 200)