

N° d'ordre 0051/IST/95



MEMOIRE

présenté pour obtenir le grade
D'INGENIEUR DE CONCEPTION

Spécialité : GEOLOGIE

par

MOUSSA DIBA

**ANALYSE COMPAREE DE DEUX METHODES D'EVALUATION
DE LA REPARTITION SPATIALE DE LA SALINITE DES SOLS :**
-LA PATE SATUREE (METHODE DE REFERENCE);
-LA CONDUCTIVIMETRIE ELECTROMAGNETIQUE.

soutenu publiquement le 1^{er} Avril 1995

devant la commission d'examen composée de :

MM A. DIA	Président	(IST)
P. BOIVIN	Rapporteur	(ORSTOM)
S. FAYE	Rapporteur	(Département de géologie)
A. BOURDEAU	Examineur	(IST)
F. FIOME	Examineur	(IST)
I. GBAGUIDI	Examineur	(IST)

2.2.2. Estimation du variogramme	19
2.2.3. Analyse du variogramme	
2.2.4. Krigeage	20
3. Le site étudié	22
3.1. Situation Géographique	
3.2. Les sols	
4. Démarche d'étude suivie	24
4.1. Plan d'échantillonnage	
4.2. Les mesures effectuées	25
III. RESULTATS ET INTERPRETATION	26
1. Variabilité spatiale de la conductivité électromagnétique	
1.1. Analyse statistique	
1.2. Analyse géostatistique	
2. Variabilité spatiale de la conductivité électrique à différentes profondeurs : 0-20 cm, 40-60 cm, 80-100 cm	30
2.1. Analyse statistique	
2.2. Analyse géostatistique	
2.2.1. La conductivité électrique à 0-20 cm de profondeur	
2.2.2. La conductivité électrique à 40-60 cm de profondeur	
2.2.3. La conductivité électrique à 80-100 cm de profondeur	31
2.2.4. Conclusion.....	
3. Relations entre conductivité électromagnétique et conductivité électrique sur extrait de pâte saturée aux différentes profondeurs	40
3.1. Etude des corrélations.....	
3.2. Recherche d'une équation de régression	
3.3. Variabilité de la conductivité électromagnétique estimée	41
4. Discussion et synthèse	47
CONCLUSION GENERALE	49
BIBLIOGRAPHIE	50
ANNEXES	

RESUME

Une grande partie des sols du monde entier est affectée par la salinisation. Cette dernière correspond essentiellement à une concentration anormale de sels solubles dans les horizons supérieurs des sols, ceci pouvant entraîner une baisse de leur fertilité. Ce phénomène s'étend de plus en plus suite au développement de l'agriculture irriguée souvent mal contrôlée.

Dans le cadre d'une cartographie de ces sols salés, une analyse comparée de deux méthodes d'évaluation de la répartition spatiale de la salinité des sols a été effectuée, à savoir la pâte saturée qui est la méthode de référence et la conductivimétrie électromagnétique (méthode in situ) appliquées à un sol salé de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal soumis à l'irrigation. Cette étude montre que l'utilisation du conductivimètre électromagnétique suivie d'un traitement géostatistique permet de cartographier la salinité avec une précision d'estimation acceptable, à moindre coût et à un temps réel. Par contre, la méthode de la pâte saturée utilisée classiquement pour mesurer la salinité est lourde d'emploi et le résultat peu fiable.

MOTS -CLÉS : sols salés, salinité, conductivité, cartographie, krigeage, moyenne vallée du fleuve Sénégal.

Avant-propos

Ce travail entre dans le cadre de mon mémoire de fin d'études à l'Institut des Sciences de la Terre de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Il permet d'obtenir un diplôme d'ingénieur de conception de spécialité géologie. Ce mémoire se propose de faire une analyse comparée de deux méthodes d'évaluation de la répartition spatiale de la salinité des sols : la pâte saturée (méthode de référence) et la conductivimétrie électromagnétique.

Ce travail a pu aboutir grâce à la collaboration d'un certain nombre de personnes dont je tiens à adresser mes vifs remerciements :

Je saisis cette occasion pour remercier d'abord Monsieur le Professeur Abdoulaye Dia Directeur de l'IST, d'avoir accepté de présider le jury.

Je remercie Monsieur P. Mathieu, Représentant de l'ORSTOM au Sénégal d'avoir accepté notre stage.

Je tiens à remercier particulièrement Monsieur Pascal Boivin, Chargé de recherche à l'ORSTOM de Dakar pour avoir initié et encadré ce travail.

Je remercie aussi Monsieur Sérigne Faye d'avoir bien voulu suivre ce travail au niveau de l'IST.

Je remercie également tous les membres de la commission d'examen d'avoir accepté de juger objectivement ce travail.

Je remercie également Monsieur Didier Brunet pour sa disponibilité à mon égard et de m'avoir profité de son expérience de terrain, sans oublier Thierry et J. L. Maeght pour leur appui sur le terrain.

Tous mes remerciements à Monsieur Duprey ex Chef du Laboratoire de Chimie et son équipe de m'avoir initié à la technique de la pâte saturée.

Toute ma gratitude également à tout le personnel enseignants de l'IST et du Département de géologie pour leur contribution à ma formation.

Mes remerciements s'adressent également à toute l'équipe du Laboratoire de Pédologie, je veux nommer : Badiane, Balla, Diémé, Faye; sans oublier mes complices camarades stagiaires: I. Bakhoun, A. Ilou, A. Niang et tous mes promotionnaires pour leur sympathie.

Et enfin je dédie ce mémoire à mes parents et à tous mes amis.

INTRODUCTION GENERALE

Les sols salés connaissent une grande extension dans le monde, particulièrement en zones arides. En effet, les déficits pluviométriques et la forte évaporation qui caractérisent le climat des régions arides entraînent la salinisation par concentration de sels dans les sols. Dans le même temps ces conditions climatiques contraignantes poussent les populations de ces régions à recourir à l'irrigation, considérée comme une des solutions aux problèmes du déficit alimentaire. Malheureusement, le développement de l'irrigation, s'il constitue un espoir pour les régions arides, a souvent comme inconvénient d'entraîner également la salinisation des sols. Celle-ci est due essentiellement à une remontée de la nappe superficielle et à une mauvaise maîtrise du drainage. Il se pose alors des problèmes de gestion de la salinité dans les zones alluviales.

Au Sénégal par exemple, comme dans tous les pays du Sahel, la superficie des terres affectées par la salinité est estimée à un million d'hectares, soit 5% du territoire national voire plus, suite à des dégradations multiformes entraînées par la sécheresse qui règne depuis 1971 d'une part (SADIO, 1989) et le développement d'une irrigation mal contrôlée provoquant l'apparition d'une salinité secondaire d'autre part (LOYER, 1989).

La salinisation, une des causes de la dégradation des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, a des effets néfastes sur les cultures. En effet, les concentrations élevées en sels solubles de la solution du sol augmentent la pression osmotique qui limite l'absorption de l'eau par les plantes. La salinisation peut être également à l'origine de phénomènes de toxicité pour les plantes (DAOUD *et al.*, 1994).

Dans ces conditions, il est important de cartographier la salinité avec précision et à moindre coût, afin d'évaluer les zones à risque et d'effectuer un suivi correct de l'évolution saline des sols. C'est sur ce thème de la cartographie de la salinité des sols que porte ce mémoire. Dans cette optique, des méthodes de mesure de la salinité sont comparées, par rapport à leurs caractéristiques de coût, de temps de réalisation, et de degré de précision. Pour ce travail, nous envisageons de comparer la pâte saturée (méthode de référence) avec la conductivimétrie électromagnétique, en s'intéressant en particulier aux caractéristiques de variabilité qu'elles permettent d'identifier.

Ainsi, après avoir posé le problème sous forme d'une synthèse bibliographique, nous rappellerons les protocoles de mesure de la salinité que nous avons comparés. Nous présentons ensuite brièvement les principes généraux de mise en oeuvre des méthodes quantitatives d'étude de la variabilité spatiale des paramètres du sol, les caractéristiques du site prospecté et la démarche d'étude suivie, pour enfin exposer et interpréter les résultats obtenus.

I. POSITION DU PROBLEME

Il nous semble important de préciser certaines notions relatives aux sols salés, avant d'évoquer les difficultés liées à leur cartographie

1. Quelques notions relatives aux sols salés

1.1. Définitions

Sol salé : c'est un sol renfermant des sels solubles en quantité anormalement élevée (et principalement du chlorure de sodium "NaCl").

Salinité globale d'un sol : c'est la quantité de sels dans la solution du sol. Elle peut être exprimée sous la forme de la conductivité électrique (CE), ou sous la forme de la somme des ions de son extrait de pâte saturée. Elle est également exprimée en grammes de chlorures de sodium (NaCl) par litre en utilisant un diagramme qui établit la correspondance entre CE et teneur en NaCl.

La salinité est appréhendée par les méthodes suivantes :

1.2. Méthodes de mesure de la salinité des sols

Elles peuvent être classées en deux grands groupes :

1.2.1. Les méthodes classiques de mesure sur extrait aqueux d'un échantillon de sol

La quantité de sels est estimée dans un extrait à l'eau d'un échantillon de sol, par la mesure de la conductivité électrique et/ou le dosage des ions de cette solution.

La démarche consiste à prélever des échantillons de quelques centaines de grammes. Le sol après séchage, broyage, tamisage est mélangé avec de l'eau déminéralisée. Selon le volume d'eau apporté, on distingue :

-Les extraits de pâte saturée

Cette méthode a été mise au point par les chercheurs de l'U.S.SALINITY LABORATORY. La pâte saturée correspond à la "limite de liquidité" d'Atterberg c'est-à-dire l'humidité à saturation. Dans ce cas le volume d'eau apporté est variable car dépendant fortement de la

texture du sol, donc de sa capacité de rétention. Cette façon de faire vise à se rapprocher au mieux de ce qui se passe dans le sol, tout en opérant en conditions standardisées.

Elle permet notamment de se rapprocher d'une réalité agronomique, l'humidité étant, à proximité de la capacité de rétention, la plus efficace pour la plante (LE BRUSQ et al., 1982).

Cependant, cette méthode apparaît techniquement très longue à mettre en oeuvre, de plus la confection de la pâte est difficile et l'extraction de la solution parfois impossible. C'est pourquoi aux extraits sur pâte saturée, on préfère souvent les extraits non saturés.

-Les extraits non saturés (1/n)

Cette deuxième méthode consiste à mélanger l'échantillon avec beaucoup d'eau pour obtenir de fortes dilutions (dans les rapports poids sol/poids eau de 1/1, 1/2, 1/5 ou 1/10). Elle permet d'extraire un maximum de sels contrairement aux extraits de pâte saturée, le rapport sol/eau restant constant quelle que soit la texture de l'échantillon.

Les extraits 1/n sont plus faciles à réaliser et permettent ainsi de faire un grand nombre d'analyses, ce qui est au contraire difficile, voire impossible par pâte saturée. Néanmoins, on peut établir une relation empirique entre la conductivité de l'extrait de pâte saturée et la conductivité 1/n, LE BRUSQ, et al., 1982 proposent :

$$\log (\text{Cté E.S.}) = \log (\text{Cté } 1/ n) + a \log (\text{H.S.}) + b$$

Avec :

H.S. : humidité à saturation (%),

a et b sont des constantes qui dépendent du type de salure du sol, c'est à dire du contenu en sels solubles (relation établie pour des sols du delta du fleuve Sénégal).

1. 2.2. Dispositifs de mesure "in situ"

-Le conductivimètre électromagnétique

Il mesure la conductivité apparente globale du sol jusqu'à deux mètres de profondeur environ. Le conductivimètre électromagnétique s'utilise "in situ" sans perturbation du sol. Le sol est soumis à un champ magnétique de haute fréquence qui induit des courants d'autant plus intenses que le sol est conducteur. Le champ induit par ces courants est mesuré en retour. Nous proposons une description détaillée du principe de fonctionnement de cette méthode en II.1.12.

-Les appareils de mesure de la résistivité du sol en place

Ils sont basés sur un principe simple : la capacité du sol à conduire le courant électrique est fonction de la concentration en électrolytes de la solution du sol.

Il s'agit par exemple d'un jeu de quatre électrodes ou quadripôles disposés horizontalement selon la configuration de WENNER. Il mesure la résistivité (l'inverse de la conductivité) du sol. L'épaisseur du sol prospecté est fonction de l'écartement entre les deux électrodes source. L'appareil est un matériel encombrant à manipuler et parfois le contact des électrodes avec le sol est imparfait aux faibles humidités (RIEU et *al.*, 1976; RHOADES et *al.*, 1976; CAMERON et *al.*, 1981).

- Autres dispositifs

Il existe d'autres outils très rarement utilisés. On peut notamment citer les "enregistreurs de salure" (salt sensors) qui mesurent la salure du sol "in situ". Le principe est celui de la diffusion des ions entre la solution du sol et l'eau des pores fins d'une céramique enterrée. L'inconvénient des "salt sensors" est qu'ils caractérisent la salure d'un volume très limité du sol.

Par ailleurs, étant enterrés, ils sont difficilement déplaçables. Ils se prêtent donc bien à des travaux d'expérimentation mais non à des travaux de cartographie.

1.3. Classification des sols salés

Dans chaque système de classification, les sols salés sont définis selon des critères de diagnostic dont l'importance diffère d'un système à un autre.

1.3.1. Légende F.A.O.

Les sols salés présentent une conductivité électrique de l'extrait pâte saturée supérieure à 15 ms/cm (à 25°C), à un moment de l'année, à moins de 125 cm de profondeur si la texture est grossière, à moins de 75 cm si la texture est fine; ou une conductivité de plus de 4 ms/cm à moins de 25 cm de profondeur si le pH est supérieur à 8,5. Ils appartiennent aux solonchaks, groupe des sols salins.

1.3.2. Référentiel Pédologique Français 1992

Les sols salés sont définis par la présence d'un horizon salique d'au moins 15 cm d'épaisseur, apparaissant à moins de 125 cm de profondeur et enrichi (ou susceptible de s'enrichir à partir de la solution du sol) en sels chlorurés, sulfatés bicarbonatés ou carbonatés plus solubles que le gypse; le cation le plus fréquent est le sodium.

. Enrichi en chlorures et/ou en sulfates (sels de la série neutre, pH de l'extrait de pâte saturée inférieur à 8,5), il est salique si, pendant une période de l'année, la conductivité de son extrait de pâte saturée atteint 8 ds/m à 25°C s'il est situé dans les 60 cm supérieurs, et 16 dS/m à 25°C s'il est situé plus profondément.

. Enrichi en bicarbonates et carbonates (sels de la série alcaline pH de l'extrait de pâte saturée supérieur à 8,5), il est défini comme salique si à une période quelconque de l'année, la conductivité de son extrait de pâte saturée atteint 8 dS/m.

1.3.4. Soil Taxonomy (U.S. Soil survey)

Dans cette taxonomie les sols salés sont définis par l'horizon salic de 15 cm d'épaisseur au moins contenant plus de 2% de sels plus solubles que le gypse. Ils appartiennent au groupe des salorthides dans le sous ordre des ORTHIDS.

Les salorthides sont caractérisés par la présence d'un horizon salique se trouvant dans les 75 premiers cm du sol et par la saturation en eau à une profondeur d'un mètre durant un mois ou plus par an.

2. Cartographie de la salinité des sols

Il existe diverses méthodes de cartographie de la salinité des sols. La méthode classique consiste à déterminer la valeur moyenne de la salinité d'une unité pédologique ou d'une parcelle à partir de quelques mesures de la conductivité électrique (CE) sur extraits aqueux. Mais, ces mesures sont très souvent peu nombreuses pour avoir une valeur moyenne statistique précise. De plus la quantité de sels mesurée sur un échantillon ne peut pas être extrapolée à un grand volume de sol, la répartition spatiale des sels étant généralement très hétérogène. Or, la cartographie des sols salés doit tenir compte de cette grande hétérogénéité. L'utilisation des méthodes géostatistiques nécessitant un très grand nombre de mesures permet par ailleurs, de quantifier et d'analyser cette variabilité de la salinité et de favoriser en plus une cartographie numérique par krigeage qui met en évidence les éventuelles structures. Des travaux antérieurs sur la variabilité et les possibilités de cartographie numérique de la salinité révèlent que l'étude de la répartition spatiale des sels dans le sol par les méthodes classiques de mesure de la conductivité électrique (CE) sur extraits aqueux est difficile du fait de leur grande variabilité. La conductivité électrique apparaît généralement comme une variable faiblement structurée dans l'espace ou purement aléatoire (BOIVIN, 1984). Par ailleurs la conductivimétrie électromagnétique, qui mesure de façon sensible la salinité sur un grand volume de sol serait plus apte à rendre compte de ses variations spatio-temporelles car contrairement à la variable CE, la conductivité électromagnétique (CEM) semble se comporter comme une variable présentant une structure spatiale (JOB et *al.*, 1987; BOIVIN et *al.*, 1988). Ces conclusions tirées à partir des études réalisées sur différents sites salés (Sénégal, Tunisie, Syrie, Espagne...)

et en des périodes différentes, restent-elles valables dans le cas d'un même site si les mesures sont effectuées à la même période? Nous tenterons de répondre à cette question en comparant la méthode de mesure de la salinité par extraits de pâte saturée (méthode de référence) avec celle de la conductivimétrie électromagnétique, appliquées à un sol salé de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal soumis à l'irrigation.

II-MATERIEL ET METHODES

1. Méthodes d'évaluation de la salinité utilisées

1.1. Les extraits de pâte saturée

1.1.1. Protocole expérimental

On cherche à déterminer la quantité d'eau nécessaire pour saturer 100 grammes de sol (figure 1).

La démarche consiste à peser dans une capsule de porcelaine d'environ 20 cm de diamètre, à fond rond et sans bec, 100 grammes de terre fine séchée à l'air. On ajoute lentement à la burette, de l'eau déminéralisée en remuant régulièrement avec une large spatule jusqu'à l'obtention d'une pâte sans grumeaux, glissante sur les parois de la capsule, tombant en bloc et proprement de la spatule, brillante, non collante, ne rendant pas d'eau à la surface et ne se fendant pas au bout de quelques heures. On note le volume d'eau nécessaire.

Pratiquer au centre de l'échantillon un trou où l'eau pourrait s'accumuler si elle est de trop. Si c'est le cas, laisser évaporer le surplus. Si inversement le sol se fendille ou se casse, il faut rajouter de l'eau. Couvrir la capsule d'un morceau de papier Joseph bien imbibé d'eau pour éviter le séchage du sol. Attendre une heure et veiller à ce que le papier reste humide. Centrifuger et filtrer ou, si la centrifugation ne permet pas de retirer l'extrait saturée (sols sableux), filtrer sous vide sur un buchner sans mouiller les filtres et centrifuger si le filtrat n'est pas clair.

Il est important de bien pétrir la pâte pour favoriser la dissolution des sels.

Après extraction, on estime la salinité de l'extrait de pâte saturée en mesurant sa conductivité électrique (CE en millisiemens par centimètre (mS/cm) est proportionnelle à la charge ionique de l'extrait).

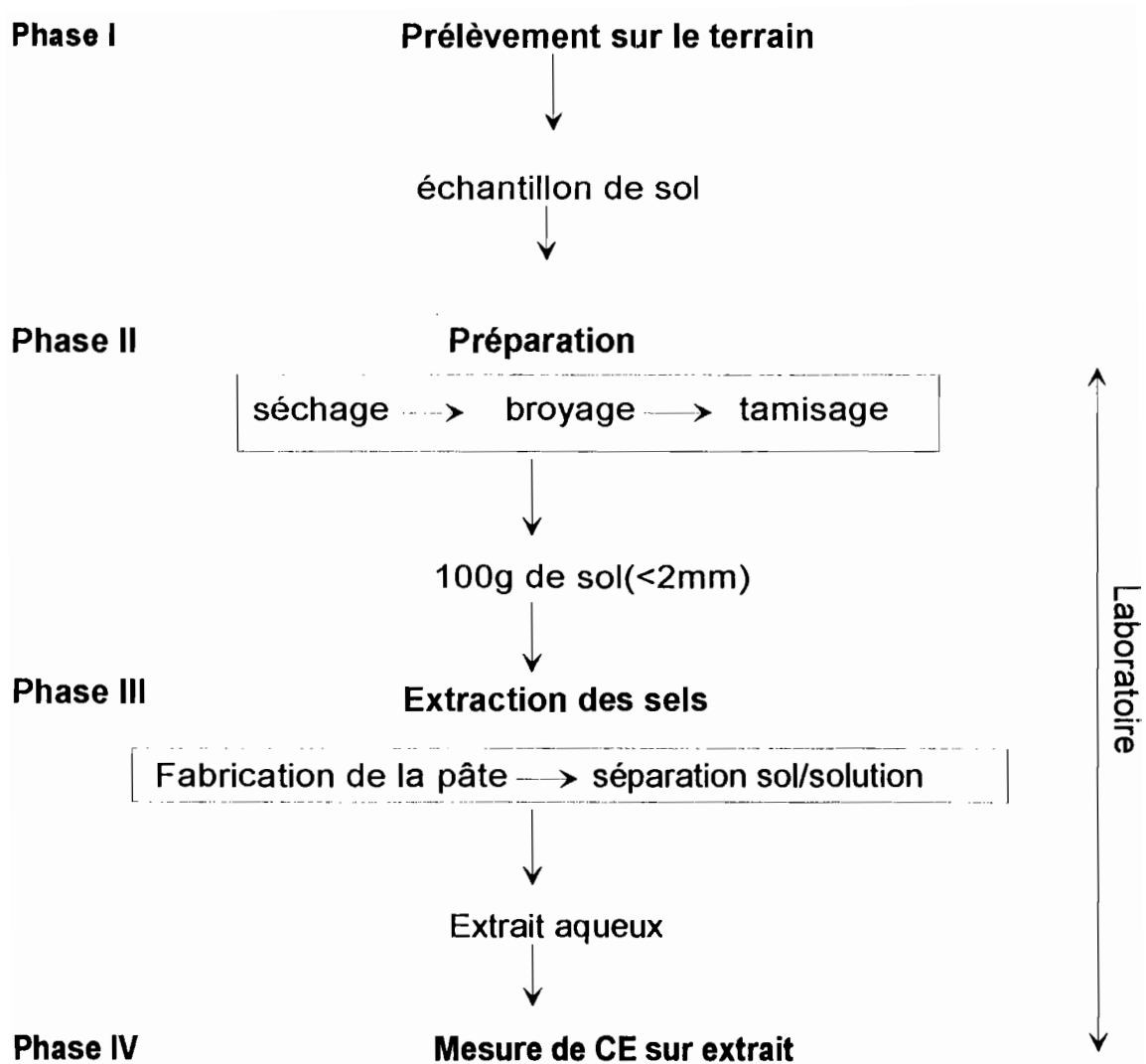


Figure 1 : Schéma du protocole expérimental de la pâte saturée

1.2. La conductivimétrie électromagnétique

1.2.1. Principe de fonctionnement

Le conductivimètre électromagnétique (figure 2) est constitué de deux bobines d'induction séparées d'un mètre. La bobine émettrice ou spire primaire SP, parcourue par un courant électrique de fréquence f produit un champ magnétique primaire HP de même fréquence qui induit dans le sol, supposé homogène, des courants (figure 3). Ces courants produisent un champ secondaire HS proportionnel à la conductivité du sol. Ce champ est capté par la bobine réceptrice (spire secondaire) SS. Si l'on néglige les interactions magnétiques entre les différentes lignes de courant, on peut mesurer la conductivité du sol qui dépend de la fréquence f et de la géométrie des lignes de courant induit dans le sol. Cette conductivité est liée à l'ordre de succession des résistivités vraies des matériaux rencontrés (JOB et *al.*, 1987).

La conductivité apparente ou conductivité électromagnétique est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_a = k (HS/HP)$$

Avec :

σ_a = conductivité apparente du sol (mS/m = millisiemens par mètre)

$k = 4/2\pi f \mu^\circ s^2$ (k est une constante qui dépend de l'appareil)

μ° = permittivité de l'air

f = fréquence

s = distance interspire

HP = champ reçu par SS (vide)

HS = champ reçu par SS (sol)

La conductivité électromagnétique (CEM) est proportionnelle à la conductivité propre du sol et de la solution. Par conséquent certains paramètres physiques telles que la porosité, la texture, l'humidité et la température sont susceptibles d'affecter la mesure et doivent théoriquement être pris en compte.

1.2.2. Types d'utilisation

On distingue deux modes d'utilisation du conductivimètre suivant le degré de salinité des sols :

Mesures en surface

Lorsque les conductivités électromagnétiques (CEM) sont inférieures à 1000 ms/m (valeur de saturation de l'appareil), on effectue des mesures de surface. L'appareil est posé sur le sol en maintenant l'axe des spires perpendiculairement (mode vertical) ou horizontalement (mode horizontal). La réponse d'une couche d'épaisseur $Z(m)$ diffère selon le mode utilisé (Mc NEILL cité par JOB et *al.*, 1987). En mode horizontal les premiers 50 cm du sol présentent une plus grande réponse que les niveaux inférieurs. Par contre en mode vertical les deux niveaux ont sensiblement la même réponse (figure 4). Par conséquent, il est possible de suivre l'évolution saline d'un profil de sol en comparant les mesures des deux modes d'utilisation. Ainsi si la conductivité électromagnétique mesurée en mode horizontal est supérieure à celle mesurée en mode vertical le profil salin est décroissant et inversement.

Mesures en hauteur (appareil au dessus du sol)

Elles sont généralement effectuées lorsque la salinité est très élevée (supérieure 1000 ms/m), du fait de la saturation de l'appareil en surface. Le vide entre l'appareil étant considéré comme une couche de sol de conductivité électromagnétique (CEM) nulle et d'épaisseur connue.

Il convient toujours d'étalonner les mesures de conductivité électromagnétique (conductivités apparentes globales) par rapport aux méthodes classiques conventionnelles pour une éventuelle interprétation quantitative des résultats (RHODES et CORWIN, 1981; JOB et *al.*, 1987).

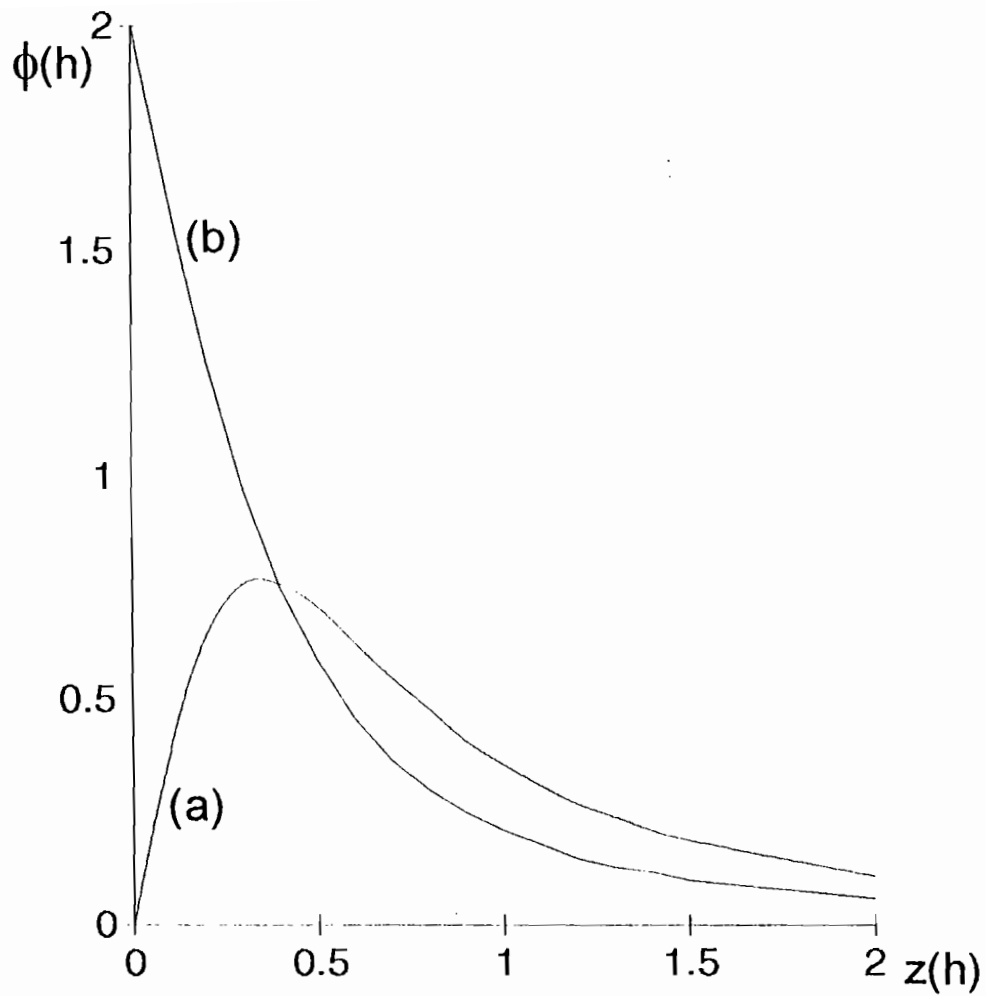


Figure 4 : Contribution d'une couche de sol élémentaire dz située à une profondeur normalisée z (en m) au champ secondaire H_s : (a) en mode vertical; (b) en mode horizontal (d'après McNEILL, 1980 cité par J.O. JOB et al., 1987)

2. Spatialisation et cartographie numérique

Nous rappelons brièvement dans ce paragraphe, la théorie et les principes de mise en oeuvre des approches de la statistique "classique" et de la géostatistique.

2.1. Approche de la statistique "classique"

La statistique "classique" des variables suppose l'indépendance des observations. Elle consiste à chercher la loi de distribution d'une variable, ainsi que ses principaux paramètres statistiques (moyenne, écart-type, coefficient de variation).

2.1.1. Détermination de la loi de distribution

La loi de distribution peut être déduite à partir de l'analyse de l'histogramme de fréquence ou du diagramme des fréquences cumulées des données. Ainsi, en présence d'une asymétrie, une loi log-normale peut éventuellement permettre de décrire l'histogramme expérimental. Pour tester l'ajustement d'une loi lognormale à la distribution d'une variable, on teste simplement l'ajustement à une loi normale de la transformée logarithmique de cette variable. Cette approche basée sur une analyse graphique subjective manque souvent de précision, ce qui justifie l'utilisation des tests statistiques d'ajustement qui permettent généralement de vérifier la nature de la loi de distribution de la variable aléatoire étudiée. Parmi les tests généralement utilisés on a : le test du CHI-DEUX, le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV, le test de CRAMER VON MISES, tests d'aplatissement et d'asymétrie, et le test de SHAPIRO et WILK. Pour plus de détails, on pourra se reporter à la synthèse proposée par VAUCLIN (1982).

2.1.2. Le coefficient de variation (CV)

Le coefficient de variation défini par la relation : $CV = \text{écart-type}/\text{moyenne}$ est fréquemment utilisé pour quantifier la variabilité. Si les observations sont indépendantes et leur nombre suffisant pour que le théorème central limite s'applique, la connaissance du coefficient de variation peut permettre de déterminer la taille de l'échantillonnage (N) avec un degré de précision acceptable (ϵ) et un intervalle de confiance de $(1-\alpha)$. N est donné par la formule suivante :

$$N = (t^2(\alpha')/\epsilon^2)CV^2$$

Avec :

N = taille de l'échantillonnage

t = variable de student

α' = risque d'erreur

ε = degré de précision

CV = coefficient de variation

Le nombre d'observations (N) est donc sensiblement proportionnel au coefficient de variation (CV). Et, il faut un grand nombre de mesures (N supérieur à 100) pour estimer des propriétés à forte variabilité (CV supérieur à 50%) en termes de valeurs moyennes avec une précision acceptable ($\varepsilon = 0.10$) et pour un intervalle de confiance de 95% (VAUCLIN, 1982; GASCUEL-ODOUX, 1984).

2.1.3. Conclusion

L'approche statistique "classique" est susceptible de quantifier la variabilité, mais elle ne donne aucune information sur la variabilité des observations en relation avec leur position dans l'espace. Elle semble donc, moins adaptée pour la définition d'une structure. Par contre, cette définition pourrait se faire par la géostatistique qui tient compte de la dépendance spatiale entre valeurs de la variable. Nous utiliserons principalement cette approche pour étudier la variabilité spatiale et les possibilités de cartographie numérique de la salinité.

2.2. Approche géostatistique

Elle est née de la théorie des variables aléatoires régionalisées proposée par MATHERON (1965). Cette théorie est bien adaptée aux problèmes de variabilité spatiale des propriétés du sol (DELIHOMME, 1978; VAUCLIN, 1982; GASCUEL-ODOUX, 1984; VOLTZ, 1986; BOIVIN, 1991).

Une variable régionalisée (V.R.) est une variable qui caractérise un phénomène se déployant dans l'espace (et/ou dans le temps) et y manifestant une certaine structure, c'est à dire une dépendance de la valeur prise entre deux points distincts.

2.2.1. Concepts de base

On considère la variable régionalisée comme une fonction aléatoire $Z(x)$. La fonction aléatoire étant une variable aléatoire à une infinité de composantes, correspondant chacune à un point de l'espace étudié.

Soit $Z(x)$ la valeur d'une réalisation d'une V.R. aux coordonnées x . Les hypothèses généralement utilisées sont l'hypothèse d'ergodicité qui stipule que l'étude d'une réalisation suffit pour rendre compte de l'ensemble des réalisations et l'hypothèse intrinsèque qui suppose

que les accroissements $Z(x+h) - Z(x)$ sont stationnaires. Donc l'accroissement $Z(x+h)-Z(x)$ ne dépend que de l'écart h et non des coordonnées x .

On définit :

$$2\gamma(h)=\text{VAR}(Z(x) - Z(x+h))$$

Si on pose l'hypothèse supplémentaire :

$$E(Z(x+h) - Z(x)) = 0$$

On obtient :

$$\gamma(h)=1/2 E((Z(x+h) - Z(x))^2)$$

Cette fonction $\gamma(h)$ appelée demi-variogramme (variogramme par simplification), est l'accroissement quadratique moyen entre deux points distants de h . En d'autres termes le variogramme représente la variance entre deux points de mesure en fonction de la distance qui les sépare.

2.2.2. Estimation du variogramme

En pratique, l'estimation du variogramme se fait à partir de couples de points expérimentaux regroupés par classes de distance. Le variogramme est calculé par la formule suivante :

$$\gamma(h) = 1/2N(h)\sum(Z(x_i+h)-z(x_i))^2$$

$N(h)$ = nombre de couples de points distants de h

$Z(x)$ = valeur d'une réalisation d'une V.R.

h = pas de distance ($h < 1/2$ de la longueur de la parcelle)

On trace ensuite le graphe $\gamma(h) = f(h)$

2.2.3. Analyse du variogramme

Le variogramme donne une description synthétique de la structure spatiale de la variable étudiée (DELHOMME, 1978).

-comportement à l'origine (figure 5)

Théoriquement on devrait avoir $\gamma(h) = 0$ pour $h = 0$, mais il arrive que ce dernier présente une ordonnée à l'origine non nulle.

Cette discontinuité à l'origine ou " effet de pépite " correspond soit à une variance s'exprimant pour des distances inférieures à h (microrégionalisation d'échelle très inférieure à h), soit à des erreurs de mesure ou "bruit de fond".

-comportement au voisinage de l'origine

La variance est normalement proportionnelle à h. Ceci se traduit par une pente du variogramme. En absence de pente le variogramme est dit " plat " ou " pépétique pur ". Il correspond au cas aléatoire pur où il y a absence totale de structure. On se trouve alors dans le domaine de l'application de la statistique classique.

-comportement à l'infini

Le variogramme se stabilise généralement à une valeur constante appelée "palier", à partir d'une distance appelée "portée" ou "distance d'autocorrelation ", c'est la distance limite où il y a interdépendance entre les valeurs de la variable.

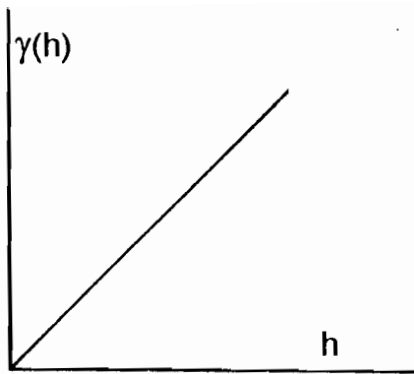
Le variogramme peut également croître sans cesse avec la distance. Lorsqu'il se rapproche d'une branche parabolique, on peut penser à la présence d' une dérive, qu'il faut corriger afin de satisfaire à l'hypothèse intrinsèque.

Cependant, le variogramme expérimental ne peut être utilisé comme tel pour l'estimation. On ajuste au variogramme expérimental, un modèle théorique de variogramme (modèle linéaire, sphérique, exponentiel...) qui sera utilisé comme interpolateur linéaire pour le krigeage (cette opération est appelée modélisation). Les caractéristiques principales d'un variogramme et les principaux modèles sont présentés en annexes.

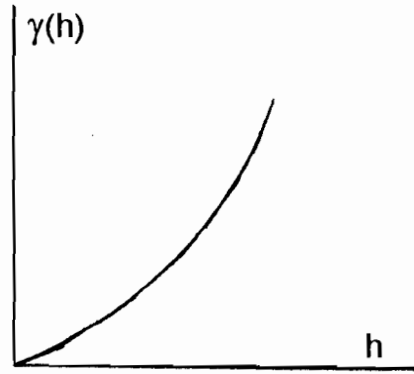
2.2.4. Krigeage

Le krigeage est une méthode d'estimation par interpolation linéaire. Il consiste à estimer les valeurs inconnues à partir d'un certain nombre de valeurs connues. Pratiquement, il est réalisé par voisinage glissant (estimation locale), c'est à dire une valeur est estimée en un point de la carte à partir d'un nombre limité de valeurs mesurées, situées dans un proche voisinage de la valeur recherchée. La dimension de ce voisinage est fixée par l'utilisateur en fonction de plusieurs critères et est généralement choisie de façon à contenir une moyenne de 7 à 8 valeurs mesurées.

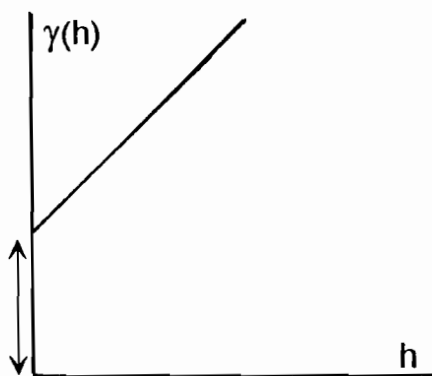
Le krigeage permet de spatialiser les données et d'obtenir ainsi des cartes interpolées (carte de valeurs estimées de la variable, carte de variances d'estimation), avec une erreur moyenne presque nulle (interpolation non "biaisée") et une moyenne quadratique de l'erreur minimisée (interpolation optimale).



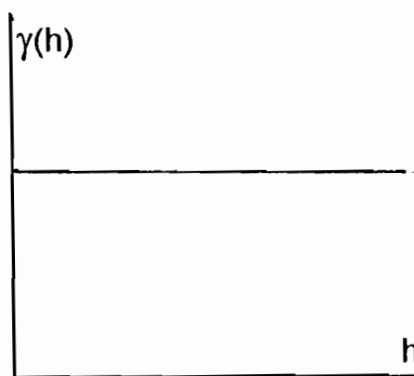
Continu



Dérivable



Effet de pépite



Aléatoire pur

Figure 5 : Comportement du variogramme à l'origine, d'après DELHOMME (1978)

3. Le site étudié

3.1. Situation géographique

La parcelle d'étude (Donaye 8) est située à 2 km environ au sud-ouest du village de Donaye et plus précisément à 16°37' de latitude Nord et 14°52' de longitude Ouest (figure 6). C'est une parcelle carrée de 16 ha appartenant aux périmètres irrigués villageois de la communauté rurale de Guédé (Département de Podor, Région administrative de Saint-Louis). Le secteur est caractérisé par un climat sahélo-saharien à deux saisons très contrastées; une courte saison des pluies de 2 à 3 mois à faibles précipitations et une longue saison sèche (octobre-juillet). Dans cette région de la moyenne vallée du Fleuve Sénégal, la mise en place des aménagements hydroagricoles, suite à la mise en eau des barrages (Diama et Manantali qui régularisent la crue du Fleuve Sénégal) favorise le développement des cultures irriguées.

3.2. Les sols

Le périmètre expérimental est situé dans une cuvette de décantation constituée essentiellement de vertisols. Par ailleurs le secteur est constitué principalement de sols peu évolués d'apport hydromorphe ou vertique, de vertisols et paravertisols (vertisol topomorphe non grumosolique), de sols hydromorphes à gley de surface et d'ensemble très peu représentés (F.A.O\SE.DA.GRI, 1969). En effet, les sols de la parcelle riches en gypse présentent une salinité secondaire entraînée par l'irrigation.

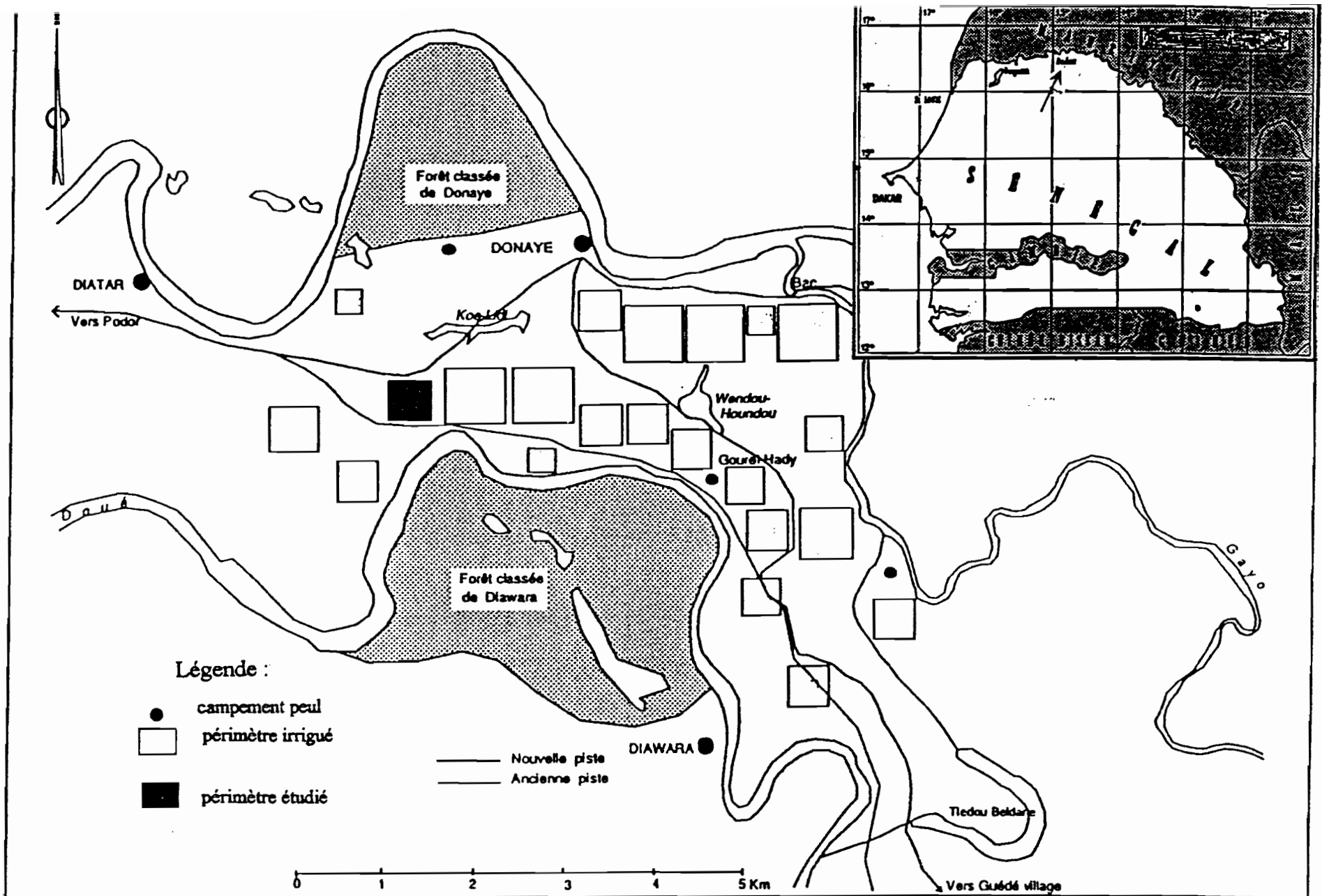


Figure 6 : Carte de situation du site étudié (d'après Claire Tarrière, 1995 modifiée)

4. Démarche d'étude suivie

4.1. Plan d'échantillonnage

Le choix d'un plan d'échantillonnage et du nombre de points de mesures obéit à un certain nombre de critères parmi lesquels on peut citer, la précision d'estimation désirée, le budget et le temps disponibles pour la réalisation des mesures. Pour cette étude, nous disposons d'un schéma d'échantillonnage (figure 7) de 16 ha (400 m sur 400 m). Il est obtenu par tirage au hasard de 100 points aux noeuds d'une grille régulière de 25 m de côté. Ce plan a été choisi parce qu'il offre une bonne couverture de la parcelle étudiée (la densité des points étant sensiblement homogène) et permet le calcul d'un variogramme de 25 à 200 m de distance, avec un nombre minimal de 30 couples de points par pas de distance. Ceci permet d'analyser la variabilité spatiale des paramètres étudiés en vue de mettre en évidence leurs éventuelles structures.

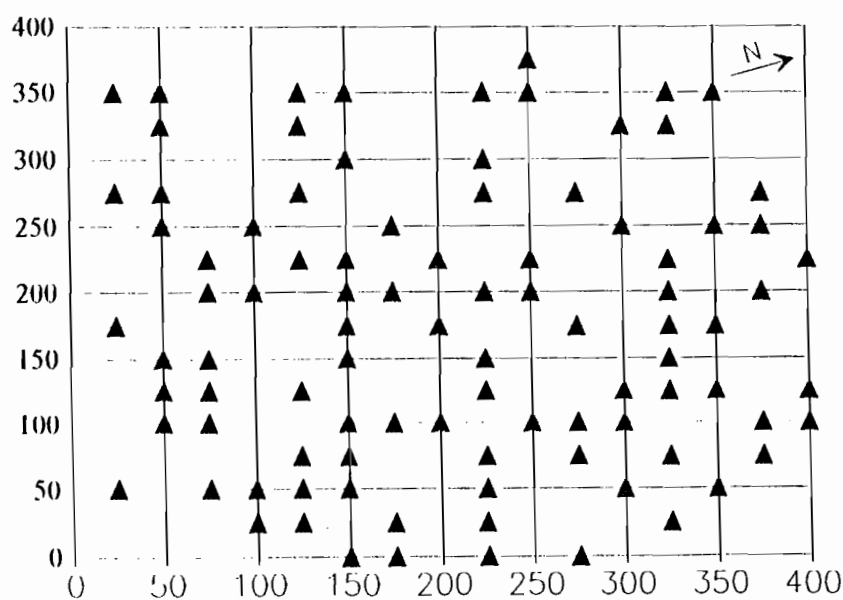


Figure 7 : Plan d'échantillonnage (distance en m)

4.2. Les mesures effectuées

Nous signalons d'emblée que parmi les 100 points retenus au départ par le plan d'échantillonnage, seulement 94 points ont été effectivement pris en compte, les 6 autres étant hors périmètre. Les mesures de conductivité électromagnétique sont faites au niveau du sol et en mode vertical à l'aide de l'appareil (EM-38). Celui-ci est calibré avant chaque séance de mesure (l'appareil étant trop sensible, nécessite donc de fréquents réglages). Les conductivités électriques sont mesurées sur extraits de pâte saturée en laboratoire à partir des échantillons prélevés, à l'aide de la tarière, à trois niveaux de profondeur : 0 - 20 cm, 40 - 60 cm, 80 - 100 cm. En plus, l'humidité pondérale est évaluée sur ces échantillons par gravimétrie pour tous les trois points.

Par ailleurs les traitements numériques des conductivités électriques et électromagnétiques en termes de variabilité spatiale et de cartographie numérique sont réalisés à l'aide du logiciel "GEOSTAT-PC" (BOIVIN, 1990).

Les résultats des analyses et les relevés de la conductivité électromagnétique sont consignés dans des tableaux en annexe.

III. RESULTATS ET INTERPRETATION

I. Variabilité spatiale de la conductivité électromagnétique

1.1. Analyse statistique

La figure 8 illustre l'histogramme des fréquences des valeurs de la conductivité électromagnétique. Cet histogramme présente une forme asymétrique, un regroupement des valeurs entre 0 et 250 mS/m à l'exception de la valeur 325 mS/m qui s'écarte de l'ensemble. Cette valeur susceptible de perturber à elle seule la structure du variogramme sera éliminée. Cette analyse statistique montre que les valeurs de la conductivité électromagnétique présentent une forte variabilité (coefficient de variation de 84%) et semblent suivre une loi de distribution lognormale.

1.2. Analyse géostatistique

Rappelons que les variogrammes ont été calculés pour des classes de distances espacées de 25 m, réunissant au moins 30 couples de points. La figure 9a représente le variogramme moyen des valeurs de la conductivité électromagnétique (CEM). Ce variogramme présente une structure sphérique, de portée 194 m, d'effet de pépite 0.064 et de palier 1,23 (valeurs normées par la variance expérimentale).

Par ailleurs, vue la distribution lognormale, nous avons construit le variogramme moyen de leurs transformées logarithmiques (figure 9b). Ce dernier apparaît un peu mieux structuré, de portée 238 m, d'effet de pépite nul et de palier 1,29. La différence entre les structures n'étant pas très importante, nous avons préféré travailler sur les valeurs de la conductivité électromagnétique plus faciles à traiter que leurs transformées logarithmiques.

Remarque : le traitement d'une variable dont la distribution est lognormale pose des problèmes numériques, les résultats bien que similaires à ceux obtenus sur la variable transformée, étant plus difficile à interpréter. L'estimation du variogramme, notamment est plus sensible aux extrêmes de la fonction de répartition (DOWD cité par BOIVIN, 1991).

Les figures 10 et 11 illustrent la carte calculée par krigeage de CEM et celle de leur variance d'estimation. Nous constatons que la variance d'estimation est faible par rapport à la variance globale obtenue pour la conductivité électromagnétique (environ 1/4 de la variance expérimentale) et que cette variance augmente vers la bordure de la parcelle, mettant ainsi en évidence la détérioration de l'information à ce niveau (le nombre d'observations diminue).

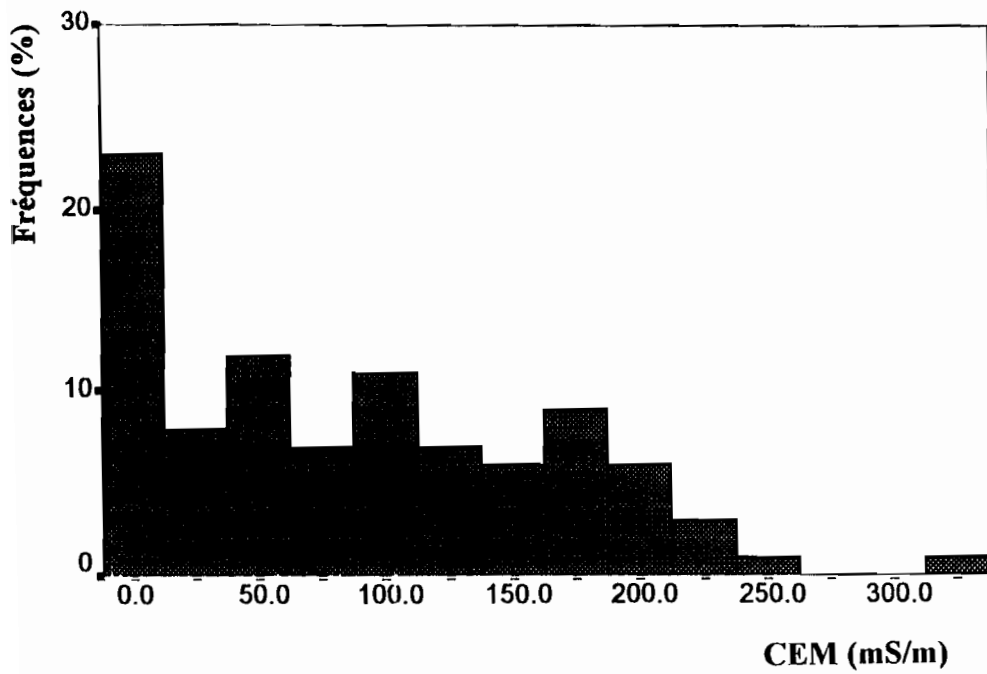


Figure 8 : Histogramme des fréquences des valeurs de la conductivité électromagnétique (CEM en mS/m)

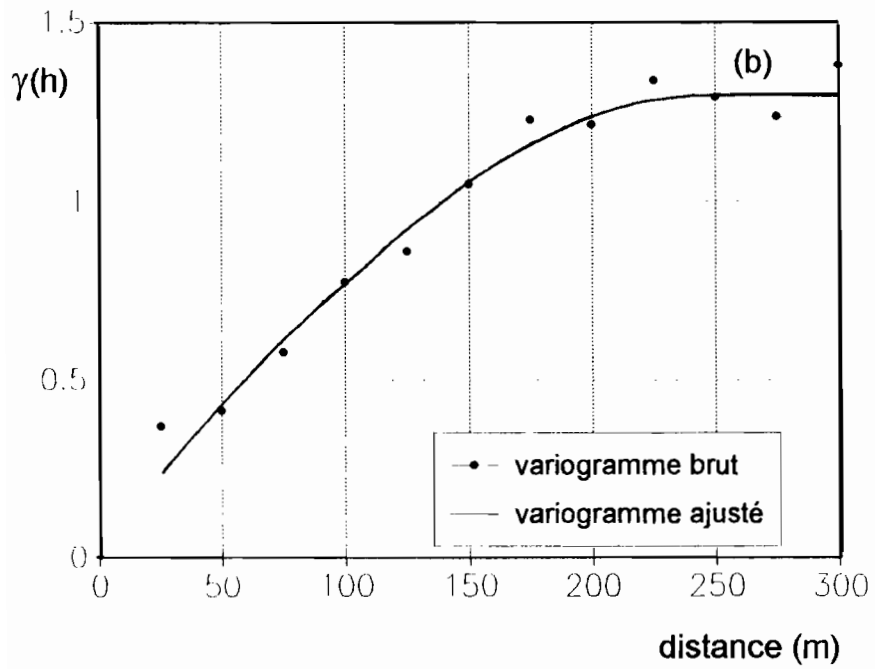
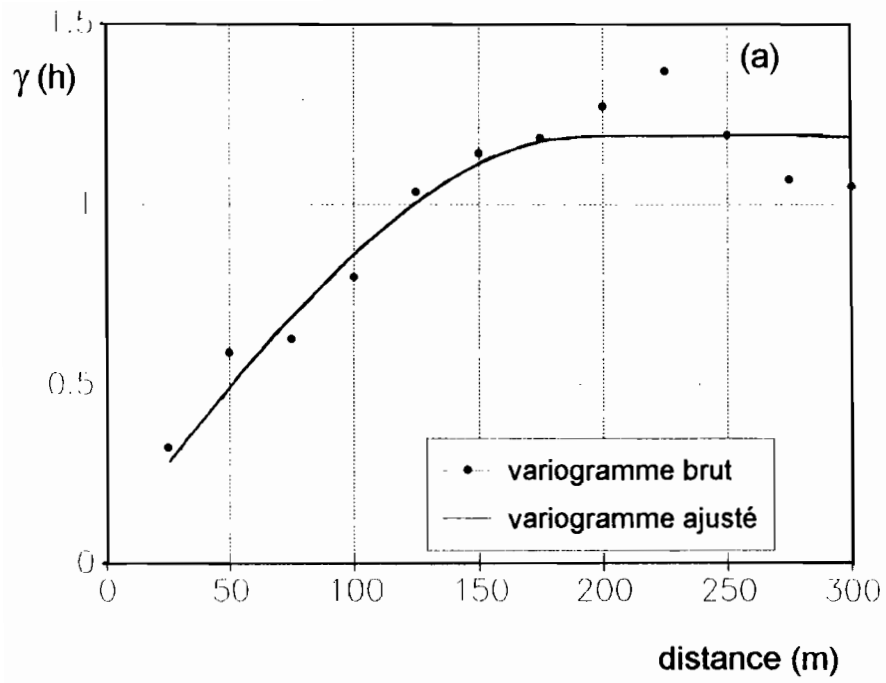


Figure 9 : Variogrammes moyens des valeurs de la conductivité électromagnétique (a) et de leurs logarithmes (b)

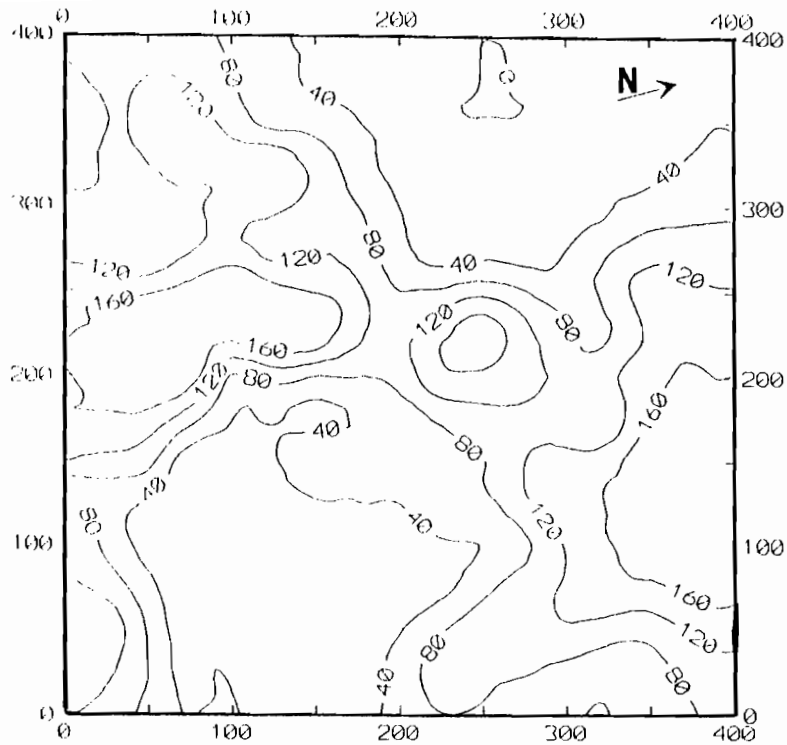


Figure 10 : Carte des isovalues de la conductivité électromagnétique (CEM) en mS/m (distances en m)

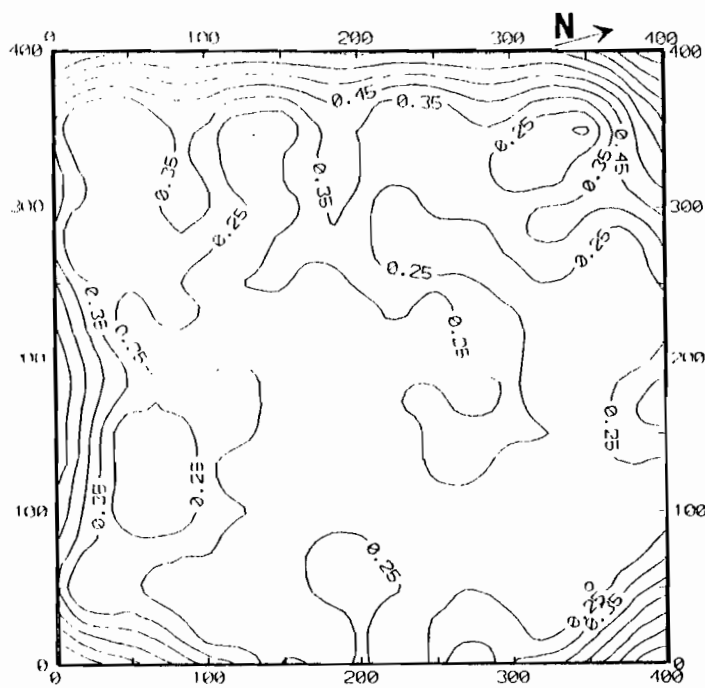


Figure 11 : Carte de variance d'estimation de la conductivité électromagnétique (CEM) en mS/m (distances en m)

2. Variabilité spatiale de la conductivité électrique à différentes profondeurs : 0-20 cm, 40-60 cm, 80-100 cm

2.1. Analyse statistique

Les figures 12, 13 et 14 représentent les histogrammes des valeurs de la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée des échantillons de sol prélevés aux trois niveaux de profondeur. Ils présentent tous une allure asymétrique et un écartement de certaines valeurs de l'ensemble de la population (valeurs qui seront éliminées pour le calcul des variogrammes pour des raisons déjà évoquées en III.1).

Les paramètres statistiques (tableau II), calculés suivant une loi de distribution normale montrent des coefficients de variation supérieurs à 100%.

Cette analyse statistique, nous permet de supposer que la conductivité électrique mesurée sur extrait de pâte saturée fortement variable, suit une loi de distribution lognormale.

2.2. Analyse géostatistique

Les variogrammes moyens (normés par la variance expérimentale) des valeurs de la conductivité électrique et de leurs logarithmes des trois niveaux de profondeur prospectés, sont calculés en utilisant également des classes de distance espacées de 25 m ayant un minimum de 30 couples de points et en éliminant toutes les valeurs jugées "extrêmes". C'est ainsi que les valeurs supérieures ou égales à 16 mS/cm des niveaux 0-20 cm (figure 12), 40-60 cm (figure13) et celles supérieures à 11 mS/cm du niveau 80-100 cm (figure 14) ont été supprimées.

2.2.1. La conductivité électrique à 0-20 cm de profondeur

A ce niveau de profondeur, la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée présente un variogramme sphérique (figure 15a) d'effet de pépité 0.62 de portée 65 m et de palier 0.40 (effet de pépité déduit). Cette structure apparaît plus nette pour les transformées logarithmiques des valeurs de cette conductivité (figure15b), avec un effet de pépité 0.53, une portée de 116 m et un palier de 0.48 (effet de pépité déduit).

Les cartes calculées par krigeage des valeurs de la conductivité et de leur variance d'estimation sont représentées par les figures 16 et 17. Nous remarquons que la variance d'estimation de la carte krigée est relativement élevée (86% à 96% de la variance expérimentale).

2.2.2. La conductivité électrique à 40-60 cm de profondeur

Les variogrammes moyens calculés sur les valeurs de la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée et sur leurs logarithmes sont représentés par la figure 18. La conductivité

électrique présente également à ce niveau une structure sphérique (figure 18a) d'effet de pépité 0.61, de portée 301 m et de palier 0.53 (effet de pépité déduit). Les valeurs logarithmiques ont également une structure sphérique (figure 18b). d'effet de pépité plus faible (0.21), de même pour la portée (114 m) et de palier 0.83 (effet de pépité déduit).

Les figures 19 et 20 présentent respectivement la carte de la conductivité électrique et de celle de sa variance d'estimation. A ce niveau, la précision d'estimation est également faible (la variance d'estimation étant de l'ordre de 64% à 72% de la variance expérimentale), mais meilleure que celle du niveau supérieur.

2.2.3. La conductivité électrique à 80-100 cm de profondeur

La figure 21 donne les variogrammes moyens des valeurs de la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée et de leurs logarithmes, calculés à ce niveau de profondeur. Ils illustrent une variable structurée de modèle sphérique d'effet de pépité 0.44, de portée 153 m environ et de palier 0.63 (effet de pépité déduit) pour les valeurs de la conductivité électrique. Nous retrouvons sensiblement la même structure pour leurs transformées logarithmiques, avec un effet de pépité de 0.43, une portée 176 m et un palier de 0.66 (effet de pépité déduit).

Les cartes estimées par krigeage de la conductivité électrique et de leurs variances d'estimation sont présentées par les figures 22 et 23.

De même que pour les conductivités électriques des niveaux 0-20 cm; 40-60 cm la carte figure 23 montre une forte variance d'estimation de l'ordre de 52% à 62%.

2.2.4. Conclusion

L'analyse géostatistique montre que la conductivité électrique mesurée sur extrait de pâte saturée aux différentes profondeurs est faiblement structurée et présente des cartes de variance d'estimation très forte témoignant ainsi d'une faible précision d'estimation de la conductivité électrique mesurée sur extrait de pâte saturée.

CE à :	N	m	σ	CV (%)
0-20 cm	93	5.3	6.48	122
40-60 cm	93	2.9	3.73	129
80-100 cm	93	4	4.18	104

Tableau I : Paramètres statistiques de la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée à différentes profondeurs

Avec :

N= taille de l'échantillonnage

m = moyenne

σ = écart-type

CV = coefficient de variation

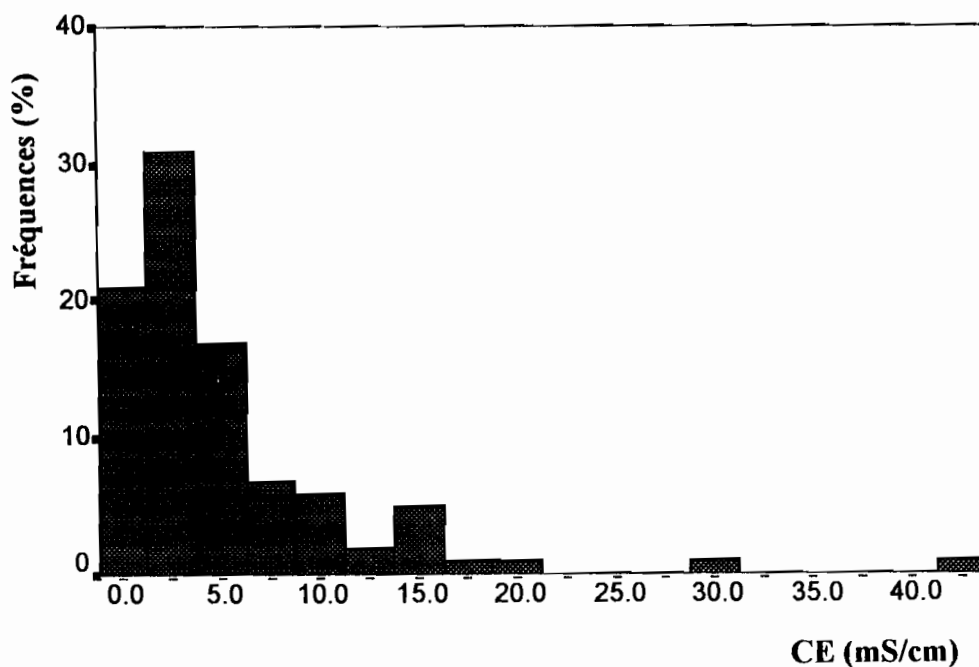


Figure 12 : Histogramme des fréquences de la conductivité électrique (CE en mS/cm) à 0-20cm de profondeur

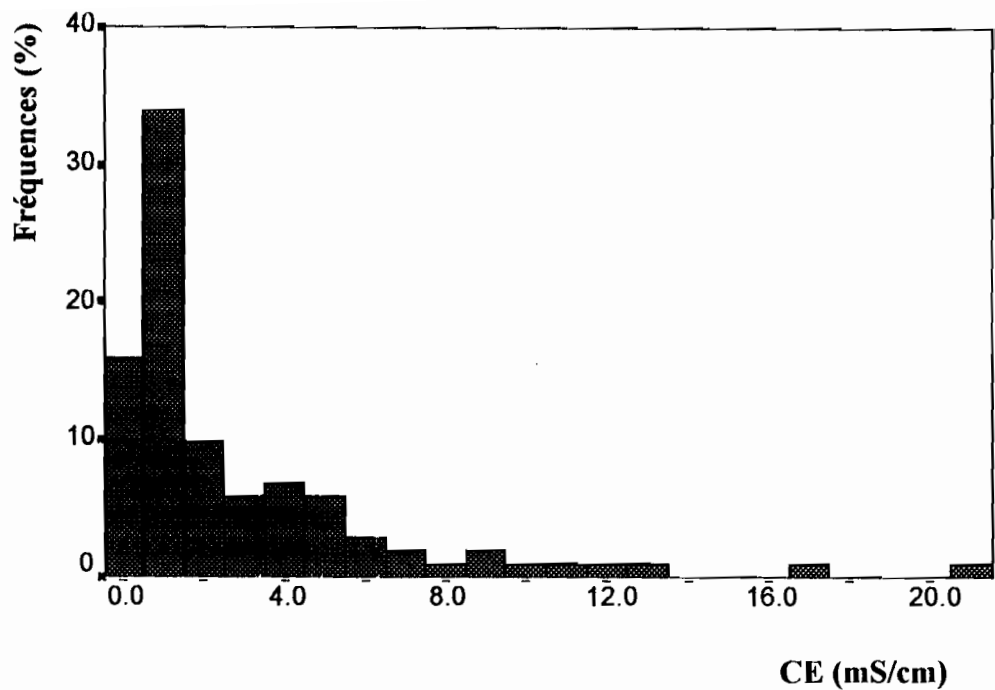


Figure 13 : Histogramme des fréquences de la conductivité électrique (CE en mS/cm) à 40-60cm de profondeur

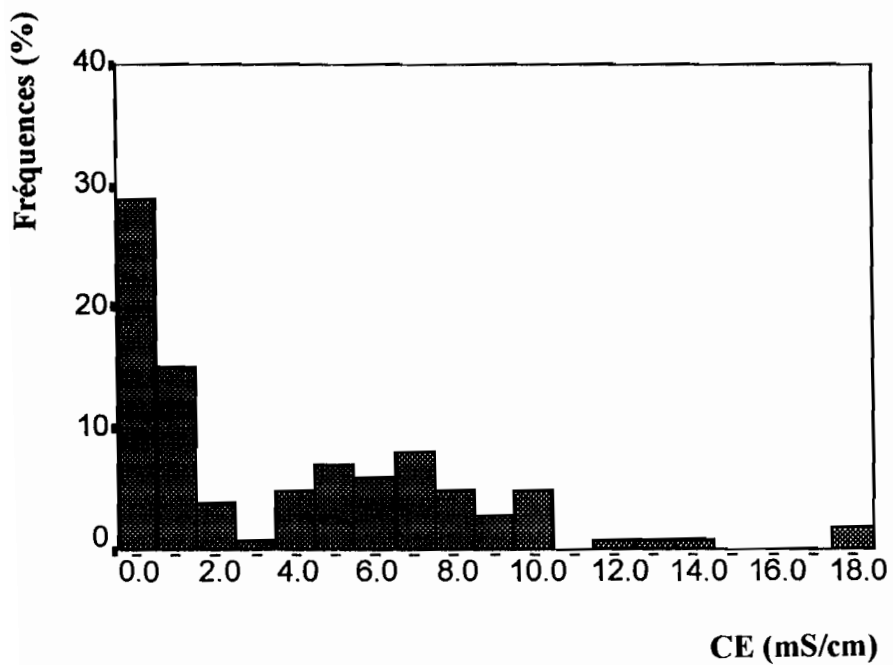


Figure 14 : Histogramme des fréquences de la conductivité électrique (CE en mS/cm) à 80-100cm de profondeur

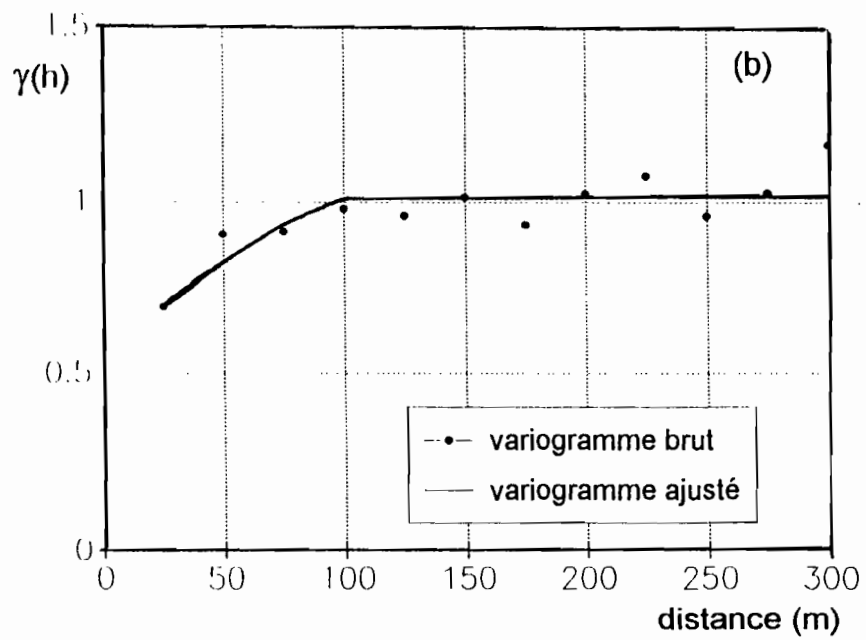
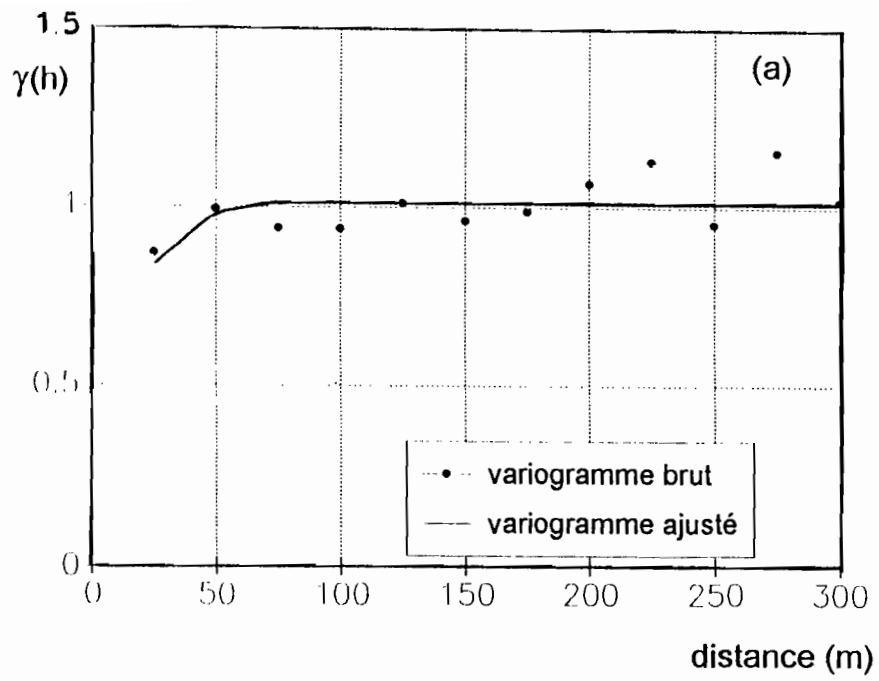


Figure 15 : Variogrammes des valeurs de la conductivité électrique et de leurs logarithmes à 0-20 cm de profondeur

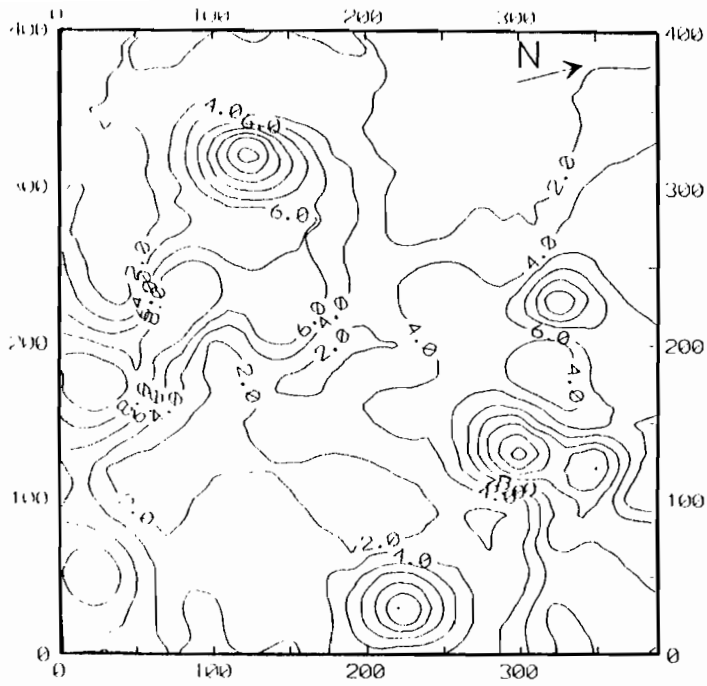


Figure 16 : Carte des isovaleurs de la conductivité électrique (CE en mS/cm) à 0-20 cm de profondeur (distance en m)

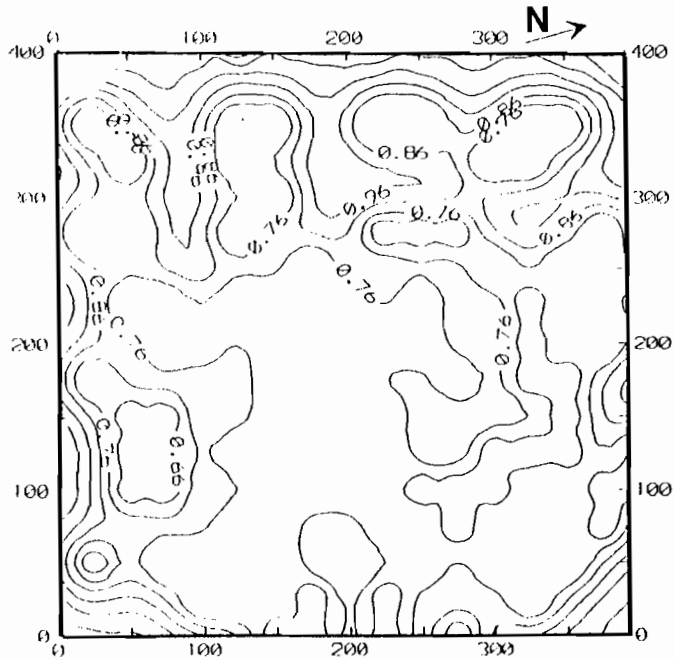


Figure 17 : Carte de variance d'estimation de la conductivité électrique (CE en mS/cm) à 0-20 cm de profondeur (distances en m)

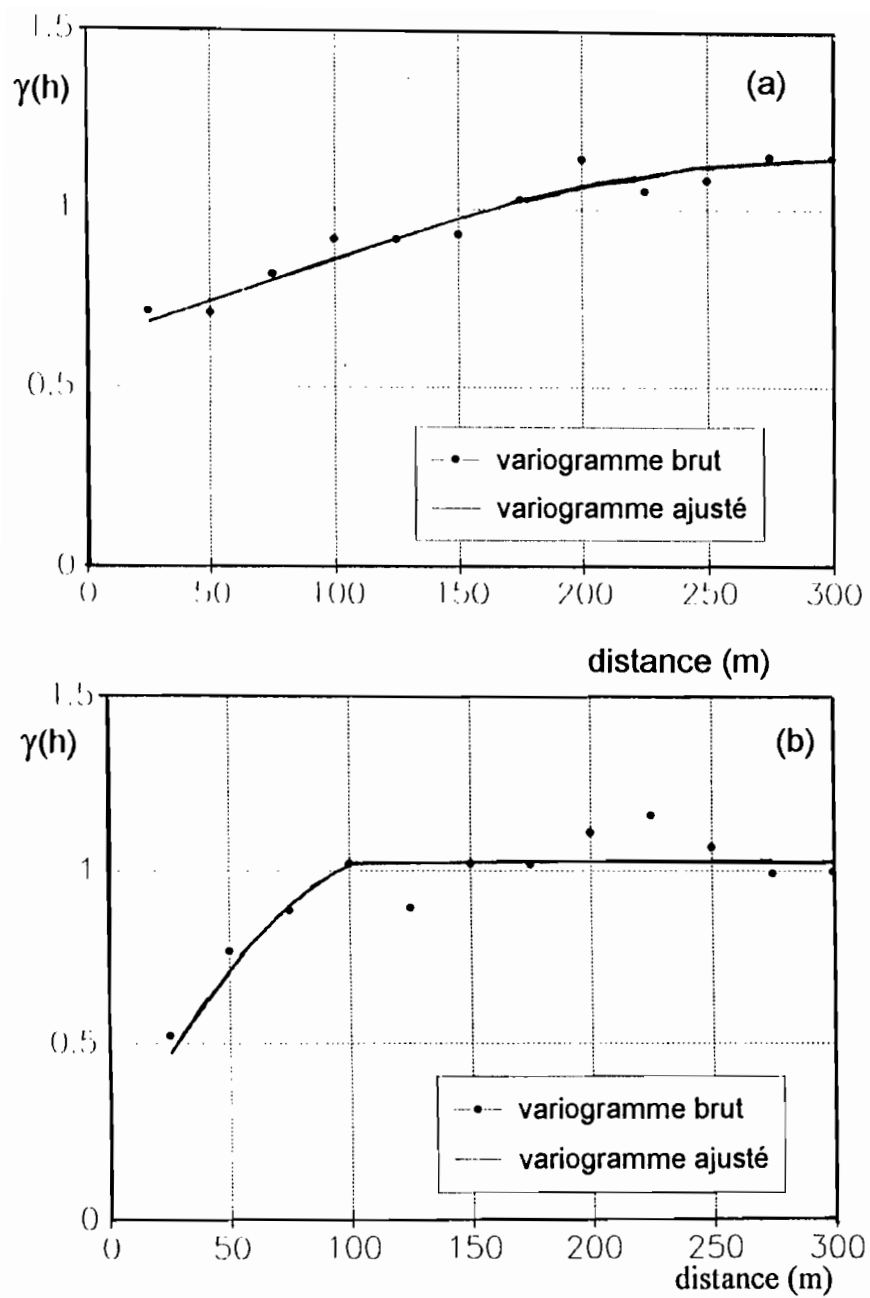


Figure 18 : Variogrammes moyens des valeurs de la conductivité électrique(a) et de leurs logarithmes à 40-60cm de profondeur(b)

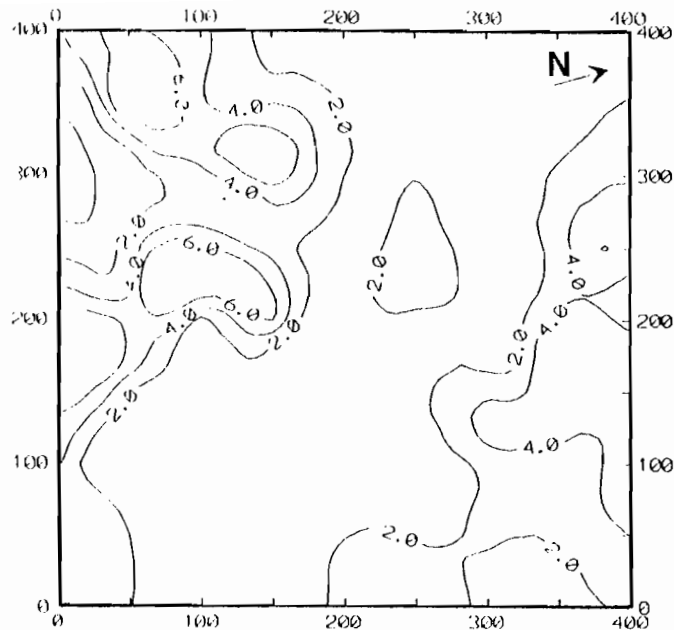


Figure 19 : Carte des isovaleurs de la conductivité électrique (EC en mS/cm) à 40-60 cm de profondeur (distance en m)

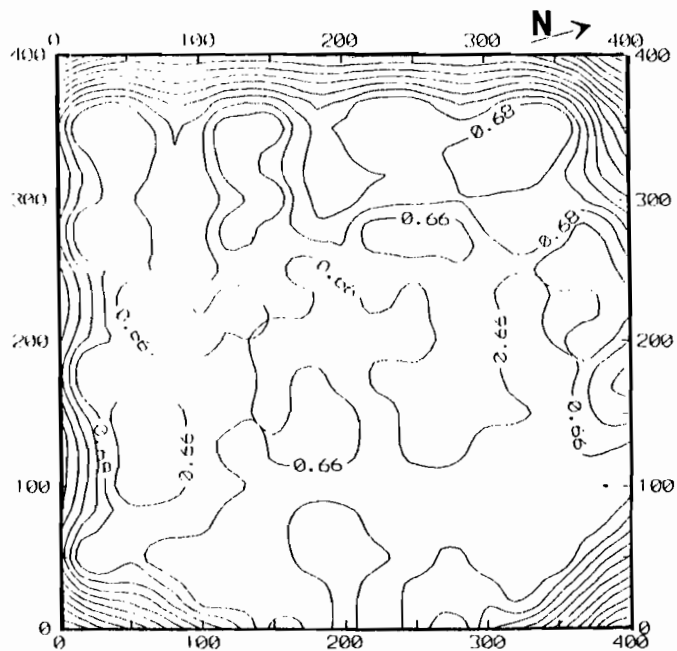


Figure 20 : Carte de variance d'estimation de la conductivité électrique (CE en mS/cm) à 40-60 cm de profondeur (distance en m)

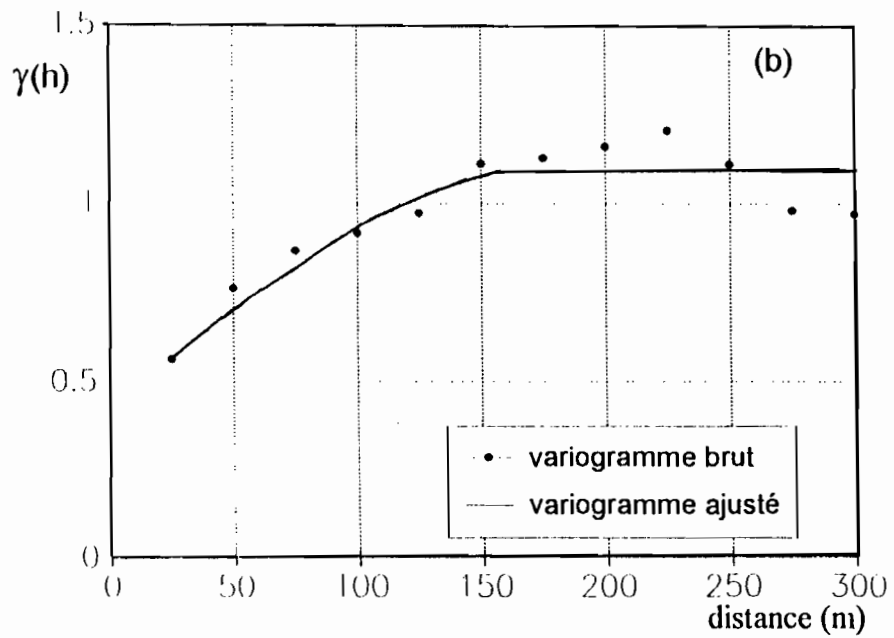
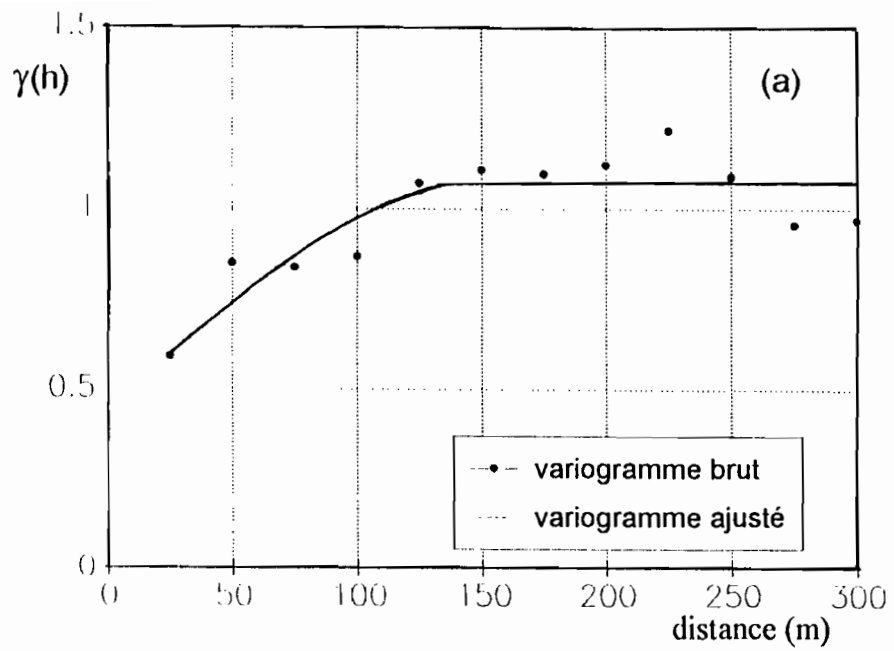


Figure 21 : Variogrammes de valeurs de la conductivité électrique (a) et de leurs logarithmes à 80-100 cm de profondeur

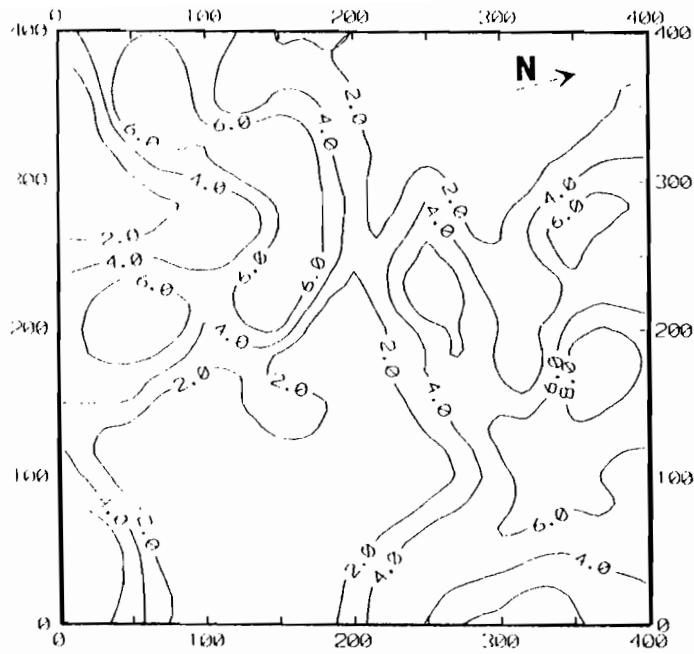


Figure 22 : Carte des isovaleurs de la conductivité électrique (CE en mS/cm) à 80-100 cm de profondeur (distance en m)

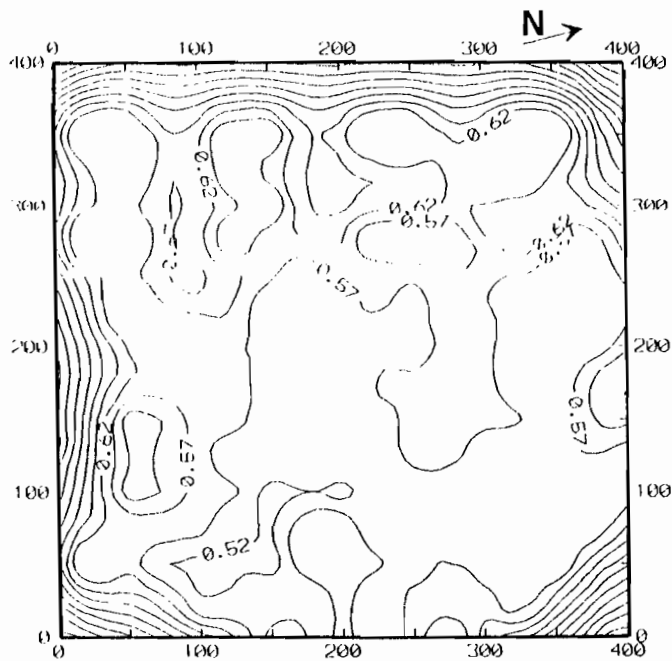


Figure 23 : Carte de variance d'estimation de la conductivité électrique à 80-100 cm de profondeur (distance en m)

3. Relations entre conductivité électromagnétique et conductivité électrique mesurée sur extrait de pâte saturée aux différentes profondeurs

Avant de discuter de la variabilité des conductivités électromagnétique et électrique, nous essayons d'abord de mettre en évidence les liens éventuels qui existent entre elles, en tenant compte particulièrement de l'humidité pondérale si c'est nécessaire.

3.1. Etude des corrélations

Le tableau II présente la matrice des corrélations entre les différentes variables. L'analyse de ce tableau montre que :

-la conductivité électromagnétique (CEM) est bien corrélée avec la conductivité électrique (CE), et que cette corrélation augmente avec la profondeur. Ce résultat confirme un peu la ressemblance de leurs cartes d'isovaleurs, des cartes parfaitement superposables surtout en profondeur.

-une bonne corrélation entre la CEM et les humidités à différentes profondeurs, à l'exception de celle mesurée entre 0 et 20 cm, du fait peut-être de la faible humidité à ce niveau.

-une forte corrélation entre les conductivités électriques des trois niveaux de profondeur. Par contre elles sont faiblement corrélées avec l'humidité pondérale. En effet, peut-il y avoir de liaisons rigoureuses entre la conductivité électrique et l'humidité étant donné que le protocole expérimental de la pâte saturée prévoit un séchage préalable à l'air libre de l'échantillon de sol (même s'il reste toujours une quantité d'eau résiduelle)?

Partant de ces corrélations, nous avons essayé de déterminer, par la régression multiple, une correspondance entre les conductivités électromagnétique et électrique.

3.2. Recherche d'une équation de régression

Nous avons d'abord calculé la régression multiple entre la conductivité électromagnétique (CEM) et les conductivités électriques à différentes profondeurs en tenant compte de l'humidité pondérale. Le coefficient de corrélation de 0.88, ainsi que la représentation graphique de cette régression (figure 24) suggèrent une forte correspondance entre ces variables. Dans un deuxième temps nous avons testé la part de l'humidité en recalculant la régression sans tenir compte de celle-ci. Le nouveau coefficient de corrélation de 0.85 obtenu, indique une faible influence de l'humidité pondérale, ce qui est illustré par la figure 25. Nous proposons par conséquent de retenir la relation directe entre conductivités électromagnétique et électrique sur extrait de pâte saturée. Cette relation est donnée par l'équation suivante :

$$\text{CEM} = -0,005784.\text{EC1} - 0,010720.\text{EC2} + 0,168438.\text{EC3} + 0,300940 \quad r = 0.85 \quad (1)$$

Avec :

CEM : conductivité électromagnétique

CE1 : conductivité électrique sur extrait saturé à 0-20 cm de profondeur

CE2 : conductivité électrique sur extrait saturé à 40-60 cm de profondeur

CE3 : conductivité électrique sur extrait saturé à 80-100 cm de profondeur

r = coefficient de corrélation

Cette équation de régression montre que les conductivités électriques sur extrait saturé des niveaux 0-20 cm et 40-60 cm de profondeur sont affectées par des coefficients de régression négatifs et presque nuls. Ce qui laisse supposer que la conductivité électromagnétique mesurée est essentiellement influencée par la tranche 80-100 cm de profondeur.

De même les équations d'étalonnage de la conductivité électromagnétique par rapport à la conductivité électrique sur extrait saturé pour chaque niveau de profondeur sont établies :

$$\text{EC1} = 0,06.\text{CEM} + 0.57 \quad r = 0.55 \quad (2)$$

$$\text{EC2} = 0,14.\text{CEM} + 0.50 \quad r = 0.68 \quad (3)$$

$$\text{EC3} = 0,15.\text{CEM} + 0.30 \quad r = 0.85 \quad (4)$$

3.3. Variabilité de la conductivité électromagnétique estimée

Le variogramme moyen construit sur les valeurs de la conductivité électromagnétique estimée à partir de la conductivité électrique à différentes profondeurs est donné par la figure 26. Il présente une structure sphérique d'effet de pépite 0.54 de portée 206 m et de variance 0.55.

Les cartes des isovaleurs de la conductivité électromagnétique (CEM) estimée et de sa variance d'estimation sont présentées par les figures 27 et 28. La comparaison de la carte des isovaleurs de CEM et de celle estimée par la relation (1) montre que cette dernière surestime les minima et sous estime les maxima. Ceci est imputable à la structure du variogramme identifiée, très proche de celle de EC3, moins nette que celle de CEM. L'emploi de ce variogramme pour obtenir une carte krigée a tendance à lisser les valeurs tout en augmentant les variances d'estimation (voir figure 29).

	CEM	EC1	EC2	EC3	H1	H2	H3
CEM	1	0.55	0.68	0.85	0.18	0.58	0.59
EC1		1	0.78	0.68	0.15	0.57	0.57
EC2			1	0.83	-0.01	0.39	0.37
EC3				1	-0.02	0.41	0.40
H1					1	0.44	0.32
H2						1	0.88
H3							1

Tableau II : Matrice des corrélations entre CEM, CE et H1,2,3

Avec :

CEM= conductivité électromagnétique

CE1 = conductivité électrique sur extrait saturé à 0-20 cm de profondeur

CE2 = conductivité électrique sur extrait saturé à 40-60 cm de profondeur

CE3 = conductivité électrique sur extrait saturé à 80-100 cm de profondeur

H1 = humidité pondérale à 0-20 cm de profondeur

H2 = humidité pondérale à 40-60 cm de profondeur

H3 = humidité pondérale à 80-100 cm de profondeur

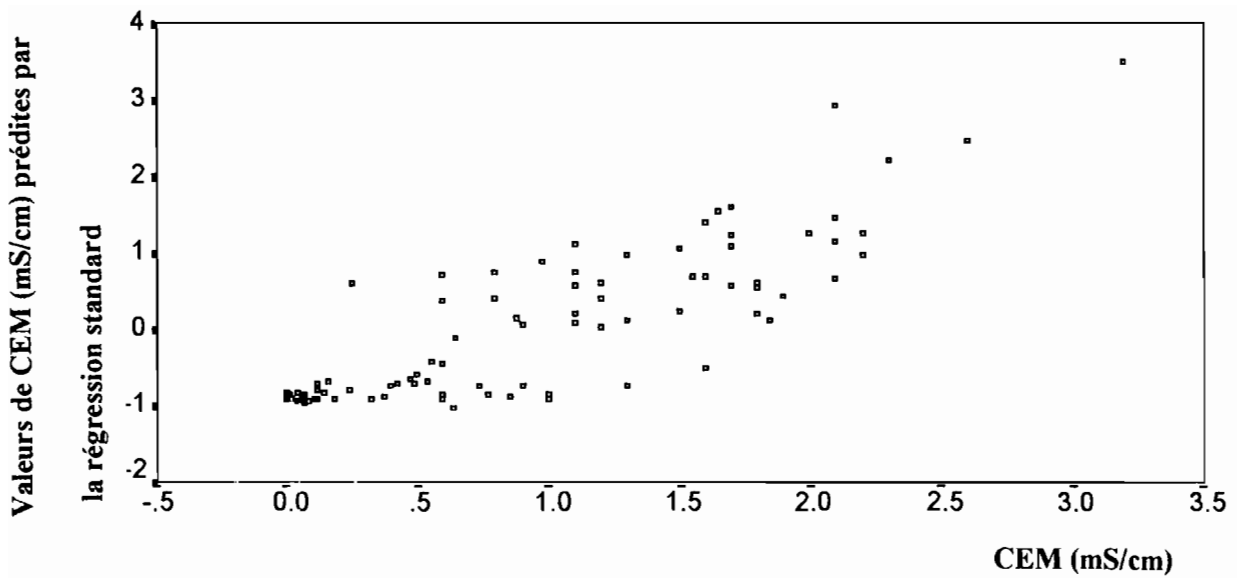


Figure 24 : Relation entre la conductivité électromagnétique (CEM en mS/cm) en abscisses et celle estimée par la régression standard à partir des valeurs de la conductivité électrique en mS/cm aux profondeurs (0-20cm, 40-60cm, 80-100cm), et de l'humidité pondérale (en %) en ordonnées

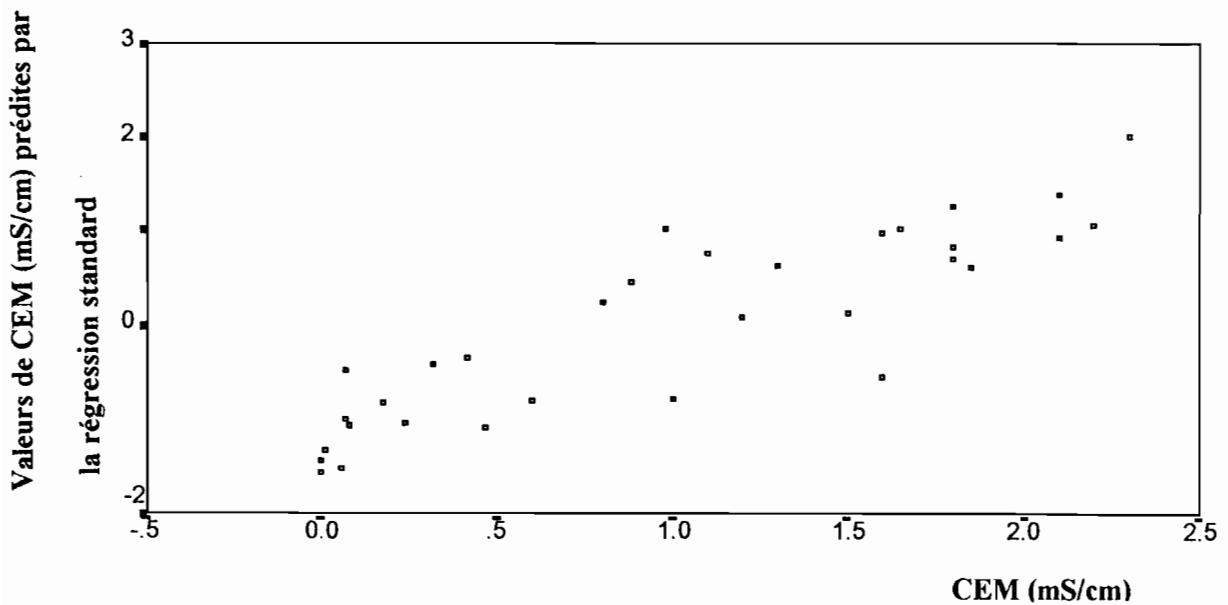


Figure 25 : Relation entre la conductivité électromagnétique (CEM en mS/cm) en abscisses et celle estimée par la régression standard à partir des valeurs de la conductivité électrique en (mS/cm) aux profondeurs : 0-20 cm, 40-60 cm, 80-100 cm en ordonnées

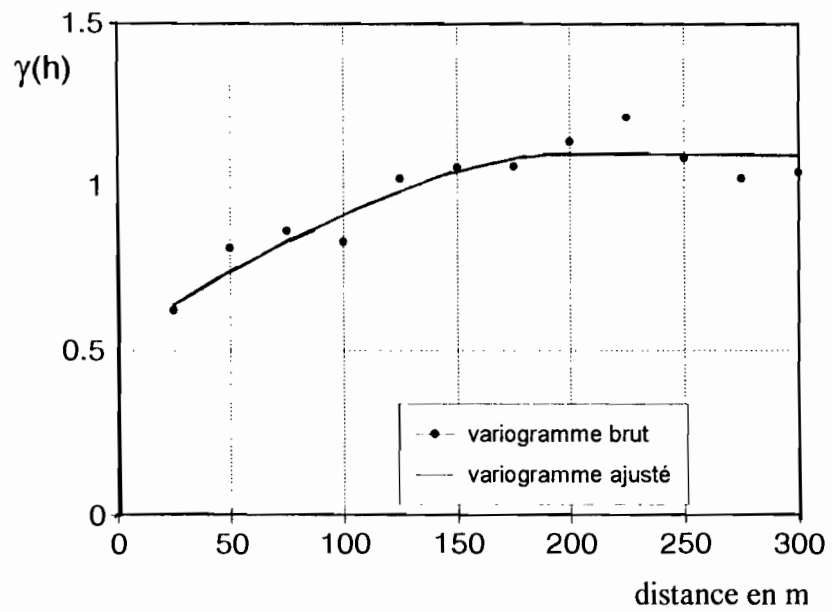


Figure 26 : Variogramme moyen des conductivités électriques estimées à partir de la conductivité électrique à différentes profondeurs

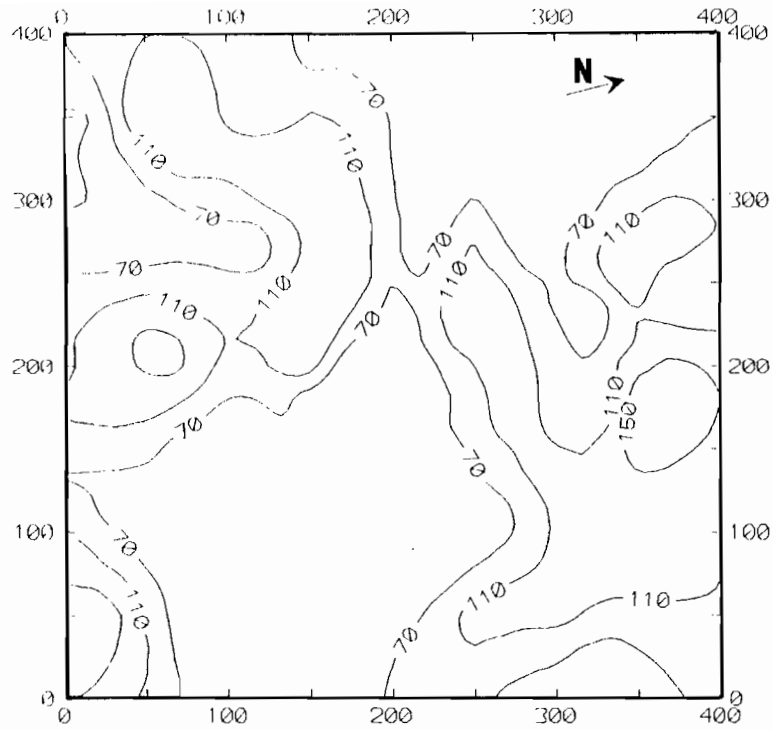


Figure 27 : Carte des isovaleurs de la conductivité électromagnétique estimée en mS/m à partir de la conductivité électrique à différentes profondeurs (distance en m)

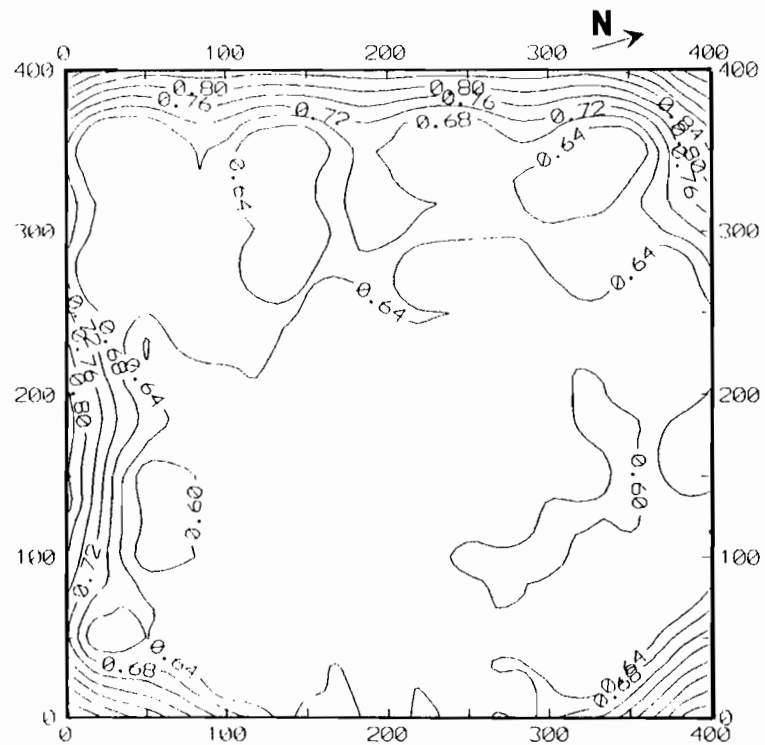
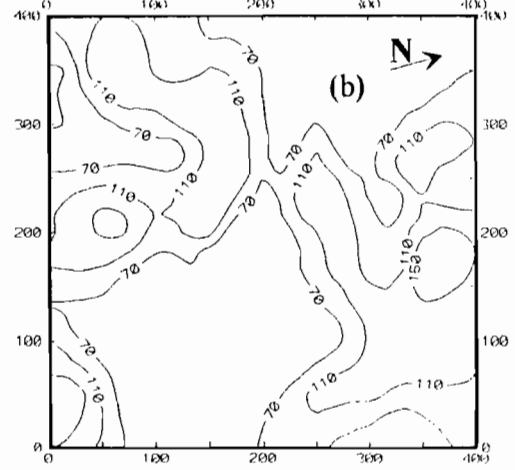
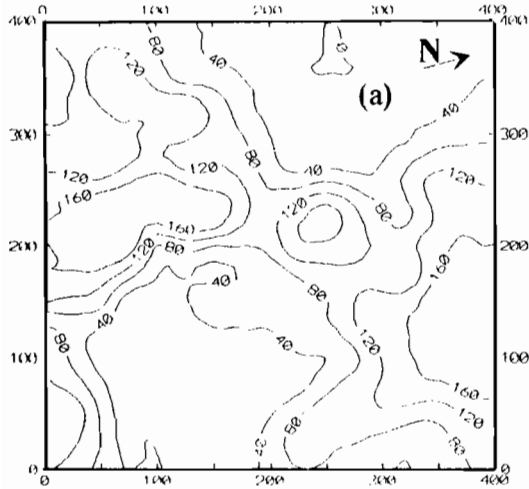


Figure 28 : Carte de variance d'estimation de la conductivité électromagnétique estimée à partir de la conductivité électrique à différentes profondeurs (distance en m)

Estimation



variance d'estimation

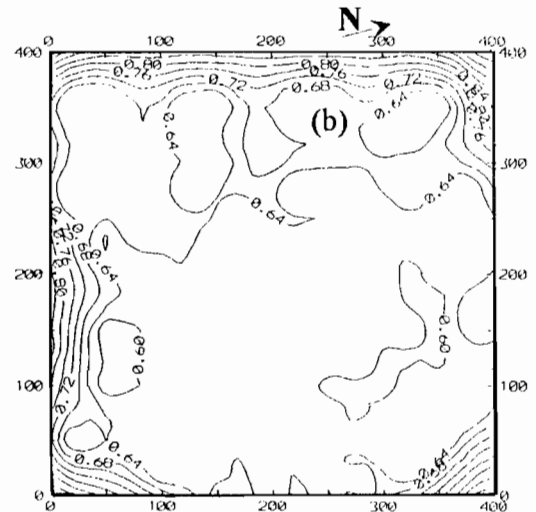
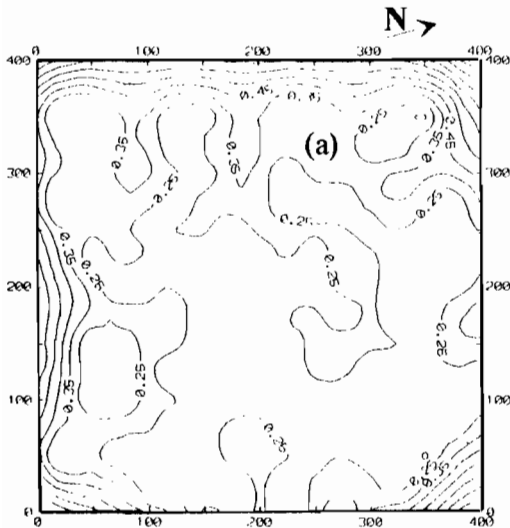


Figure 29 : Comparaison des cartes d'isovaleurs et des cartes de variance de la conductivité électromagnétique (a) et celle estimée (b) par la régression multiple à partir de la conductivité électrique à différentes profondeurs

4. Discussion et synthèse

Cette étude de la variabilité spatiale permet donc d'apprécier la qualité de la détermination de la salinité par différentes méthodes. Le tableau III donne la comparaison des principales caractéristiques de la variabilité des conductivités électrique (CE) et électromagnétique (CEM). L'examen de ce tableau montre que :

-Les coefficients de variation présentés par la conductivité électrique mesurée sur extrait de pâte saturée, sont nettement plus élevés que celui de la conductivité électromagnétique. Ce qui implique qu'il faut un nombre d'observations plus élevé (supérieur à 100) pour déterminer la salinité en valeur moyenne avec une erreur relative de 10%, pour la conductivité électrique que pour la conductivité électromagnétique. Ce qui est pratiquement difficile (voire impossible) par pâte saturée compte tenu de la lourdeur de l'expérimentation : coût et temps de réalisation. De plus la forte structure spatiale présentée par la conductivité électromagnétique permet une estimation par krigeage de la CEM entraînant une réduction considérable de la variance d'estimation et du nombre d'observations nécessaires.

-la conductivité électrique présente toujours une faible structure avec un effet de pépite très élevé correspondant probablement à un problème inhérent au protocole de mesure, la conductivité d'un extrait de sol ne représentant qu'une partie de la salinité (LE BRUSQ et LOYER, 1982). Il est par conséquent très difficile d'avoir une notion exacte de la variation dans le temps de la conductivité électrique à partir de mesures sur extraits de pâte saturée, la variation dans l'espace étant déjà très forte. Même en prélevant au même endroit plusieurs fois de suite nous risquons d'interpréter la variation spatiale comme une variation temporelle. De plus les cartes calculées par krigeage à partir des valeurs mesurées sur extrait de pâte saturée présentent toujours une forte variance d'estimation (supérieure à 50%).

-la conductivité électromagnétique par contre apparaît fortement structurée avec un effet de pépite presque nul. Cette structure permet de cartographier par krigeage la salinité avec une assez bonne précision en choisissant un pas d'échantillonnage approprié (inférieur à la distance d'autocorrelation ou portée).

variable	loi de distribution	Coef. de variation (%)	modèle de variog.	effet de pépite	portée (m)	palier	variance d'estimation (%)
CEM	log-normale	84	sphérique	0.064	194	1.23	25 à 45
CE : (0-20cm)	log-normale	122	sphérique	0.62	65	0.40	66 à 96
CE : (40-60cm)	log-normale	129	sphérique	0.61	301	0.53	66 à 68
CE (80-100cm)	log-normale	104	sphérique	0.44	153	0.63	52 à 62

Tableau III : Comparaison des principales caractéristiques de variabilité des conductivités électromagnétique et électrique à différentes profondeurs

CONCLUSION GENERALE

L'analyse comparée de la variabilité des conductivités électrique et électromagnétique montre que la conductivimétrie électromagnétique permet de cartographier par krigeage la salinité avec une précision d'estimation satisfaisante, en tenant compte de son hétérogénéité. D'autre part sa facilité de mise en oeuvre et sa grande reproductibilité (si les mesures sont faites dans des conditions identiques : sols à humidité comparable) font de cette méthode un outil performant pour la caractérisation des sols salés. C'est donc une méthode très adaptée pour le développement de l'agriculture. Elle permet de suivre l'évolution temporelle de la salinité des sols en un temps réel et à un coût moindre, ce qui est très intéressant dans le cas de programmes de courte durée de suivi de l'évolution de la salinité des sols. Ceci justifie son utilisation de plus en plus fréquente pour suivre l'effet de l'irrigation sur la salinisation des sols. Cependant, une interprétation quantitative de la conductivité électromagnétique n'est possible que par étalonnage avec les méthodes conventionnelles en particulier la pâte saturée (méthode de référence). Or la conductivité électrique mesurée sur extrait saturé, outre la lourdeur de la mesure, présente toujours un écart-type d'estimation élevé qui met en cause la fiabilité de cette méthode.

Ces résultats sont sensiblement identiques à ceux obtenus par BOIVIN *et al* (1988) pour des sols salés d'origines diverses, les mesures étant réalisées en des périodes différentes. Ils permettent ainsi, de s'interroger sur la pertinence de la détermination de la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée comme outil pour la classification, la taxonomie et la cartographie des sols salés.

BIBLIOGRAPHIE

- BOIVIN P. (1984).** - Etude pédologique de la vallée de Koubalan (Koulanyes Casamance) . Etude de la variabilité spatiale du pH et de la conductivité d'un sol de tanne. Rapport multigr.. ORSTOM/Dakar, 74 p.
- BOIVIN P., BRUNET D. et JOB J.O. (1988).** - Conductivimétrie électromagnétique et cartographie des sols salés, Cah. ORSTOM, Sér. Pédo., Vol. XXIV, n°1, pp.39-48.
- BOIVIN P., HACHICHA M., JOB J.O. et LOYER J.Y. (1989).** - Une méthode de cartographie de la salinité des sols - Conductivité électromagnétique et interpolation par krigeage. Science du sol, 27 (1), pp. 69-72.
- BOIVIN P. (1990).** - GEOSTAT - PC, logiciel interactif pour calcul géostatistique. Editions de l'ORSTOM, Collection Logorstom, 66p.
- BOIVIN P. (1991).** - Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katourée (basse Casamance Sénégal). Etude de la variabilité spatiale et relation avec les caractéristiques pédologiques. Thèse de doctorat de l'université de Paris VI, 226p.
- CAMERON D.R., De JONG E., READ D.W.L., OOSTERVELD M. (1981).** - Mapping salinity using resistivity and electromagnetic techniques. Can. J. Soil. Sci., 61 pp.67-78.
- DAOUD Y. et HALITIM A. (1994).** - Irrigation et salinisation au Sahara algérien. Sécheresse n°3, vol. 5, pp.151-159.
- DELHOMME, J.P. (1978).** - Application de la théorie des variables aléatoires régionalisées dans les sciences de l'eau. Bull. BRGM, III, N°4. pp.341-375.
- FAO/SEDAGRI, (1969).** - Cartes pédologiques et géomorphologiques de la vallée et du delta du fleuve Sénégal au 1/50 000 ème, FAO, Dakar.
- GASCUEL - ODOUX C. (1984).** - Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité des propriétés hydriques du sol. Thèse de docteur ingénieur, Ecole Nationale Supérieur des mines de Paris.INRA, Rennes, 235p.

GASCUEL - ODOUX C. and BOIVIN P. (1994). - Variability of variograms and spatial estimates due to soil sampling : a case study. *Geoderma*, 62 Elsevier Science B.V., Amsterdam. pp.165-182.

GASCUEL - ODOUX C., BOIVIN P et WALTER C. (1994). - Eléments de géostatistique. Modélisation mathématique des processus pédologiques. *Manuels scientifiques et techniques Actes Editions*, Rabat, pp.217-248.

JOB J.O., LOYER J.Y. et AILOUL M. (1987). - Utilisation de la conductivité électromagnétique pour la mesure directe de la salinité des sols. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, Vol 2, pp.123-131.

LE BRUSQ J. Y. et LOYER J.Y. (1982). - Relations entre les mesures de conductivités sur des extraits de sols de rapports sol/solution variables, dans la vallée du fleuve Sénégal. *Cah. ORSTOM.*, sér. Pédol., Vol. XIX, n° 3 pp. 293-301.

LOYER J.Y. (1989). - Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal. Caractérisation, distribution sous cultures. *Etudes et Thèses. Editions de l'ORSTOM.* 137p.

RHODES J.D., VAN SCHILFGRAADE (J). - (1976). - An Electrical Conductivity Probe for Determining soil salinity. *Soil Sci. Soc. Am.*, 40 : 647-650.

RIEU M. et CHEVERRY C. (1976). - Mise au point bibliographique sur quelques recherches récentes en matière de sols salés. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol.XIV, n°1, 1976 pp.39-61.

SADIO. S. (1989). - Pédogénèse et potentialités forestières des sols sulfatés acides salés des tannes du Sine Saloum Sénégal. Thèse de Ph. D de l'université Wageningen des Pays-Bas, 269p.

TARRIERE C. (1995). - Les groupements de producteurs, village de Donaye (département de Podor, communauté rurale de Guédé) dans « Nianga , Laboratoire de la culture irriguée dans la moyenne vallée du fleuve Sénégal ». *ORSTOM, Colloques et Séminaires*, à paraître.

VAUCLIN, M. (1982). - Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol, *Colloque SHF-INRA*, Avignon, pp.9-45.

VOLTZ M. (1986). -Variabilité spatiale des propriétés physiques du sol en milieu alluvial. Thèse de docteur ingénieur, Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 198p.

N°Pt.	X(m)	Y(m)	CEM	EC1	EC2	EC3	H1(%)	H2 (%)	H3 (%)
41	175	25	6	2.93	0.57	0.13			
42	175	200	85	1.37	0.75	0.32			
43	175	0	24	4.21	1.00	0.79	9.6	15.2	9.0
44	175	100	14	0.31	0.42	0.52			
45	200	175	40	3.61	0.72	0.98			
46	200	225	100	2.90	0.47	0.31	9.9	12.1	11.1
47	200	100	5	0.32	0.20	0.09			
48	225	25	110	16.01	5.50	5.28			
49	225	75	18	1.24	0.18	0.22	12.4	14.1	11.1
50	225	125	77	2.76	0.77	0.53			
51	225	150	49	4.98	1.77	1.15			
52	225	200	160	1.76	2.15	1.87	13.0	11.1	10.5
53	225	275	6	0.91	0.14	0.08			
54	225	300	12	-----	-----	-----			
55	225	350	0	0.67	0.37	0.47	4.3	3.4	6.0
56	225	0	80	3.7	4.67	5.58			
57	225	50	110	5.31	1.41	6.12			
58	250	200	150	4.64	0.78	4.72	8.90	10.3	12.9
59	250	225	210	8.0	4.43	9.77			
60	250	100	37	2.17	0.38	0.32			
61	250	350	0	0.74	0.28	0.39	3.7	6.7	4.4
62	250	375	25	1.18	4.14	6.26			
63	275	0	50	2.55	2.3	1.55			
64	275	175	110	5.25	1.46	6.75	11.4	14.7	13.8
65	275	100	60	2.82	0.82	2.01			
66	275	275	12	2.56	0.64	0.67			
67	275	75	180	1.62	1.48	4.56	8.6	17.1	20.0
68	300	50	120	2.09	2.34	6.15			
69	300	250	56	1.47	0.8	2.06			
70	300	125	180	18.30	5.47	6.77	10.0	23.4	22.7
71	300	100	120	2.13	2.62	5.41			
72	325	175	74	1.10	0.89	0.85			
73	325	200	120	1.97	1.53	3.91	5.6	14.7	15.1
74	325	225	64	15.73	0.66	0.29			
75	325	25	42	9.42	0.98	1.32	9.0	17.1	20.0
76	325	75	160	9.76	2.64	6.75			
77	325	325	0	1.27	0.34	0.26			
78	325	350	1	1.14	0.60	0.41	5.9	13.7	6.3
79	300	325	0	0.22	0.25	0.27			
80	325	125	155	11.05	4.90	7.00			
81	350	125	210	16.15	4.50	7.02	13.2	21.9	20.5

Tableau V : Suite des valeurs des conductivités électrique (EC1,2,3 en mS/cm) et électromagnétique (CEM en mS/m) et de l'humidité pondérale (H1,2,3 en%) de la parcelle de Donayé 8. ----- : non mesuré

ANNEXES

A - Résultats des analyses

N°Pt.	X(m)	Y(m)	CEM	EC1	EC2	EC3	H1(%)	H2 (%)	H3 (%)
1	25	50	160	11.14	3.85	9.66	4.8	13.2	13.6
2	25	175	320	13.75	11.21	18.22			
3	25	275	100	0.60	0.13	0.38			
4	25	350	60	2.10	0.73	0.22	15.8	13.2	10.7
5	50	150	110	6.19	2.12	4.36			
6	50	250	220	1.41	1.38	7.57	10.6	15.8	13.4
7	50	100	18	0.78	0.27	0.15			
8	50	275	60	0.44	0.23	0.42			
9	50	125	32	1.31	0.58	0.22	15.7	15.2	16.0
10	50	350	170	29.70	11.88	11.57			
11	50	325	120	1.28	2.19	3.91			
12	75	200	210	9.14	5.59	8.72	6.0	19.9	21.6
13	75	100	7	1.04	0.33	0.32			
14	75	225	260	14.86	13.09	14.47			
15	75	125	2	0.79	0.33	0.20			
16	75	50	4	2.36	0.56	0.57			
17	75	150	7	0.94	0.66	0.46	14.1	15.1	15.2
18	100	25	54	3.33	0.70	1.15			
19	100	50	7	3.33	1.34	0.29	7.3	11.6	12.5
20	100	250	210	42.80	20.80	17.66			
21	100	200	65	0.82	0.88	3.27			
22	125	225	230	7.38	8.73	12.86	8.9	18.8	15.1
23	125	275	90	1.24	0.50	0.83			
24	125	50	60	3.43	2.74	6.65			
25	125	75	6	7.37	0.91	0.45	6.4	6.6	7.1
26	125	125	7	1.36	0.69	0.47			
27	125	325	170	19.23	8.63	9.53			
28	125	350	47	0.52	0.64	1.20	2.9	5.8	8.9
29	125	25	16	4.62	2.40	1.38			
30	150	225	220	12.12	17.49	10.04			
31	150	75	8	4.83	0.26	0.20	8.4	12.1	11.7
32	150	100	4	2.30	0.91	0.21			
33	150	50	7	3.91	1.1	0.18			
34	150	150	88	3.77	2.53	4.54	3.4	18.9	20.3
35	150	300	110	9.28	7.67	8.77			
36	150	175	12	1.13	0.51	0.25			
37	150	200	80	6.53	7.18	7.14	5.4	8.9	11.1
38	150	350	60	1.32	3.99	5.38			
39	150	0	12	0.95	0.88	0.98			
40	175	250	130	5.34	1.27	7.61	8.7	10.3	10.4

Tableau IV : Valeurs des conductivités électrique (EC1,2,3 en mS/cm) et électromagnétique (CEM en mS/m) et de l'humidité pondérale (H1,2,3 en%) de la parcelle de Donaye 8

N°Pt.	X(m)	Y(m)	CEM	EC1	EC2	EC3	H1(%)	H2 (%)	H3 (%)
82	325	150	200	3.56	5.39	8.92			
83	350	50	90	3.83	2.21	4.14			
84	350	175	165	7.15	9.61	10.48	9.6	11.3	9.6
85	350	350	11	2.5	0.65	0.28			
86	375	250	150	5.87	2.36	8.05			
87	375	200	170	8.34	4.33	8.34			
88	375	75	180	11.61	3.71	6.57	16.2	23.1	23.0
89	375	100	190	3.56	3.03	5.61			
90	375	250	130	4.14	7.29	1.37			
91	375	275	98	7.6	4.65	7.6	12.1	16.3	16.7
92	400	125	170	4.55	3.96	6.28			
93	400	225	130	4.36	2.54	4.42			
94	400	100	185	4.76	6.23	4.68	9.1	21.2	21.4

Tableau VI : Suite des valeurs des conductivités électrique (EC1,2,3 en mS/cm) et électromagnétique (CEM en mS/m) et de l'humidité pondérale (H1,2,3 en%) de la parcelle de Donaye 8.

B - Les principales caractéristiques d'un variogramme et les principaux modèles

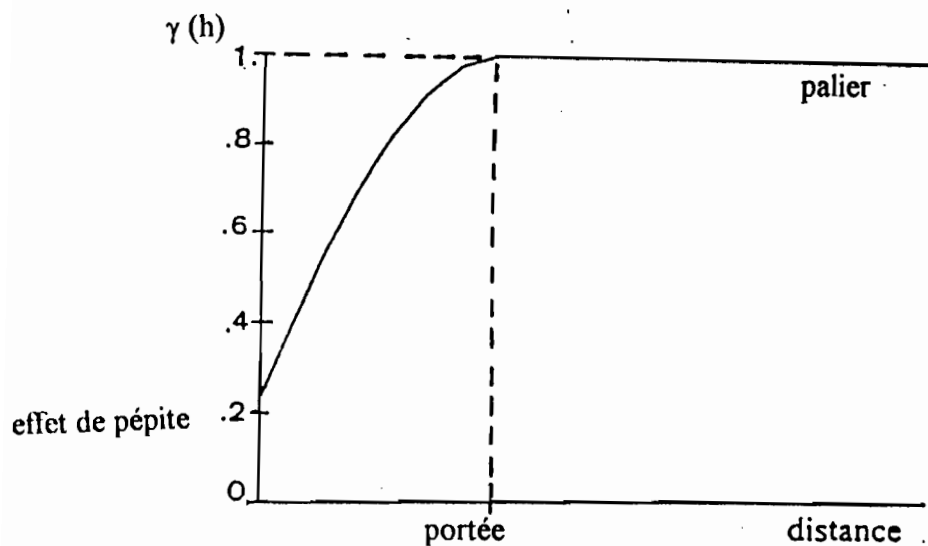
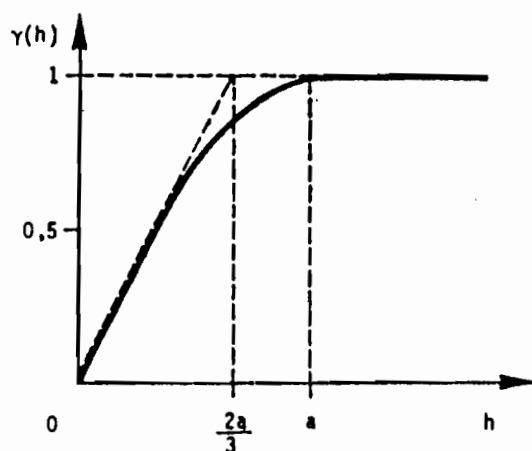


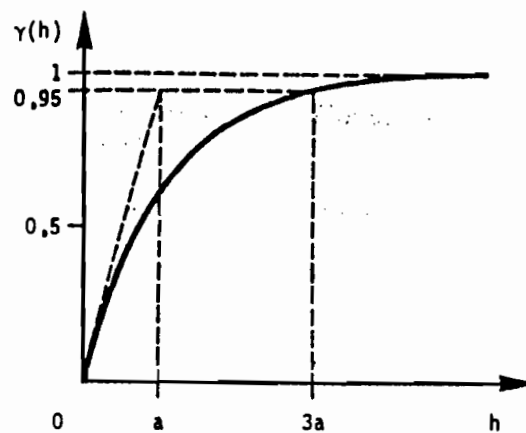
Figure 30 : Principales caractéristiques d'un variogramme



Modèle sphérique :

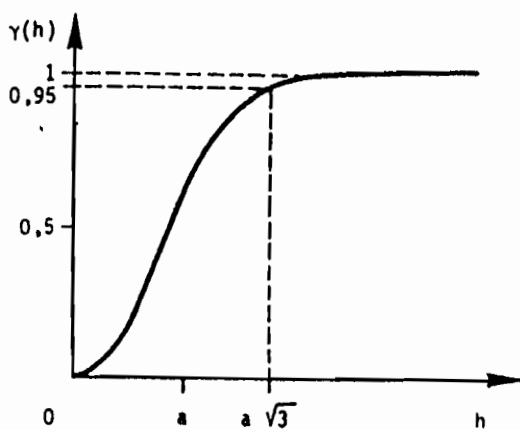
$$h < a \quad \gamma(h) = \omega \left[\frac{3}{2} \cdot \frac{|h|}{a} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{|h|}{a} \right)^3 \right]$$

$$h > a \quad \gamma(h) = \omega$$



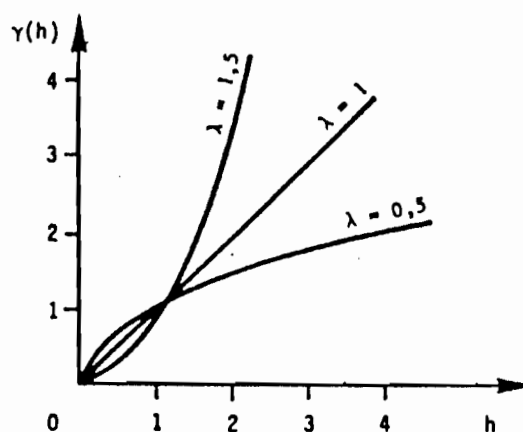
Modèle exponentiel :

$$\gamma(h) = \omega \left[1 - e^{-\frac{|h|}{a}} \right]$$



Modèle Gaussien :

$$\gamma(h) = \omega \left[1 - e^{-\left(\frac{|h|}{a} \right)^2} \right]$$



Modèle en h^λ :

$$\gamma(h) = \omega |h|^\lambda$$

Figure 31 : Principaux modèles de variogrammes