

**DISTRIBUTION DES SOLS A ARGILES GONFLANTES
SUR CALCAIRES RÉCIFEAUX (ZONE CARAÏBE)
UTILISATION DE MESURES DE RÉSISTIVITÉ ÉLECTRIQUE**

**DISTRIBUCIÓN DE LOS SUELOS DE ARCILLAS DILATABLES FORMADOS
SOBRE CALIZAS ARRECIFALES (CARIBE)
UTILIZACIÓN DE LAS MEDIDAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA**

Y. M. CABIDOCHÉ

RÉSUMÉ

Les sols à argiles gonflantes sur calcaire corallien de la zone caraïbe montrent une très forte variabilité spatiale. Ils sont distribués en séquences courtes, de 10 à 200 m, comportant à un pôle des sols courts, riches en calcaire, de type rendzine, à l'autre des vertisols hydromorphes développés sur une argile gonflante profonde (4 à 5 m).

On ne peut décrire correctement ces séquences qu'en définissant la variation continue de l'épaisseur du matériau argileux, plus ou moins caillouteux, jusqu'à la roche, ainsi que la variation continue de la teneur en éléments grossiers.

La connaissance détaillée de la variation de ces paramètres est importante car elle permet d'approcher la variation spatiale des systèmes de porosités, et du fonctionnement hydrique des systèmes de sols. Ce dernier point a une influence déterminante sur les rendements en canne à sucre.

La cartographie de ces paramètres est très difficile par les techniques habituelles de sondage à la tarière, à cause de la forte variabilité, et de la pierrosité fréquente. La mesure de la résistivité électrique, méthode héritée de la géophysique, permet de définir la distribution des matériaux constitutifs des sols, grâce à leur contraste de résistivité :

- 3 Ω .m pour l'argile gonflante (80% smectite calcique), à structure continue.
- 15 à 50 Ω .m pour le calcaire.

Dans cette méthode on implante quatre électrodes, alignées équidistantes, en surface, (le sol n'est pas perturbé), et on augmente la profondeur de mesure en augmentant l'écartement des électrodes (sondage électrique).

La connaissance de différents sondages permet de choisir un écartement discriminant unique, qui correspond à une relation univoque entre la résistivité et la profondeur (et indirectement la pierrosité). Ainsi, par une mesure non perturbatrice et rapide (30 secondes), on obtient une estimation quantitative de ces derniers paramètres. Cette rapidité permet une densité de mesure élevée, condition nécessaire pour approcher la continuité des systèmes de sols à forte variabilité spatiale.

Cette technique est applicable seulement en saison humide, lorsque les fentes de retrait sont fermées, et la structure continue.

RESUMEN

Los suelos de arcillas expansivas sobre caliza coralina del caribe muestran una gran variabilidad espacial. Se distribuyen en secuencias cortas, de 10 a 200 m, que incluyen por un lado suelos poco profundos, a fuerte contenido en carbonatos, de tipo rendzina, por otro lado vertisoles hidromorficos formados sobre arcilla expansiva profunda (4 a 5 m).

No se pueden describir correctamente estas succuencias sin precisar la variación continua del espesor del material arcilloso, mas o menos pedregoso, hasta la roca, así como la variación continua del contenido en piedras.

El conocimiento detallado de la variación de estos parametros es importante pues permite aproximar la variación espacial de los sistemas de porosidad, y el funcionamiento hidrico de los sistemas de suelos. Este ultimo punto siendo un elemento fundamental en el rendimiento de la cana de azucar.

La cartografia de estos paramétros es muy difícil mediante las técnicas usuales de sondages, a causa de la fuerte variabilidad y de la frecuente pedregosidad. La medida de la resistividad electrica, metodo heredado de la geofisica, permite definir la distribución de los materiales constituyentes del suelo, gracias al constate de resistividad :

- 3 Ω .m : arcilla expansiva (80% de mineral esmectico calcico), a estructura continua ;
- 15 à 50 Ω .m para la caliza.

En este metodo se implantan cuatro electrodos en filo, equidistantes (no se perturba el suelo), y se aumenta la profundidad de la medida aumentando la distancia entre los electrodos (sondage electrico). La comparacion de diferentes sondages permite elegir una distancia discriminante unica que corresponde a una relacion univoce entre la resistividad y la profundidad (y indirectamente la pedregosidad). Asi, con una medida no perturbadora y rapida (30 segundos) se obtiene una estimacion cuantitativa de estos ultimos parametros. Esta rapidez permite una densidad importante de medidas, condicion necesaria , para aproximar la continuidad de sistemas de suelos a fuerte variabilidad espacial. Esta technica es solamente aplicable en periodo humedo, cuando las grietas de contraccion se sierran y la estructura queda continua.

INTRODUCTION

Une longue période a été consacrée à la cartographie des sols, à petite et moyenne échelle. Dans cette approche, les sols sont analysés sous forme de profils, distingués les uns des autres en référence à des sols-types assemblés en une classification ; cette classification est établie sur la base de collections de caractères et de paramètres dont la signification en terme de fonctionnements est plus ou moins forte. Ceci est vrai en particulier au niveau du fonctionnement hydrique : le régime hydrique climatique qui intervient dans certaines classifications est nettement insuffisant pour présumer de ce fonctionnement. Seule la classe des sols hydromorphes échappe à ce constat, en intégrant des identifiants morphologiques qui permettent de présumer de la durabilité de l'excès d'eau.

De nouvelles approches cartographiques ont vu le jour ces dernières années, engendrées par un double constat :

- il est très difficile de fournir une expression cartographique, à petite ou moyenne échelle, des systèmes de sols à forte différenciation latérale.
- cette forte différenciation latérale est souvent liée au fonctionnement hydrodynamique des systèmes de sol : on ne peut pas comprendre la logique de distribution des constituants des sols si on les découpe à priori en unités juxtaposées, et on ne peut pas comprendre non plus leur fonctionnement hydrodynamique.

Une bonne illustration de ces objections est fournie par les travaux récents concernant les sols de Guyane (BOULET et al, 1982).

Ces approches nouvelles ont en commun :

- le nécessaire recours à une grande échelle au niveau des investigations préliminaires (description des sols d'un versant élémentaire),

- le refus de l'introduction de limites verticales synthétiques arbitraires, pour s'approcher d'une description continue de la variation spatiale des caractères ou paramètres pris un par un.

Nous exposons ici de quelle manière l'emploi de la mesure de la résistivité électrique du sol, permet de décrire d'une manière pertinente la variation spatiale des matériaux constitutifs des sols à argiles gonflantes sur calcaires coralliens. Les courbes isorésistives constituent des jalons objectifs de la variation continue et permettent une expression cartographique conforme à la variation des fonctionnements hydriques de ces sols.

I- DISTRIBUTION DES SOLS A ARGILES GONFLANTES SUR CALCAIRE CORALLIEN

Les sols sur calcaire corallien (récifs soulevés) de la région caraïbe comportent tous une fraction argileuse importante dans laquelle prédominent les smectites, argiles très gonflantes. Sans discuter ici de leur origine, liée à notre avis au piégage de matériaux volcaniques et/ou sédimentaires dans les lagons, nous nous bornerons à constater qu'elles semblent en équilibre avec, d'une part un substrat riche en base, d'autre part un climat à saison sèche marquée de pluviométrie annuelle inférieure à 1500 mm.

Ces sols à argiles gonflantes peuvent être simplifiés sous la forme d'une juxtaposition de deux constituants majeurs:

- les smectites, de taille inférieure à 2 μm , saturées par le calcium
- le calcaire, sous forme de sables (rares), mais surtout de graviers. et cailloux.

1.1. - Les séquences types (*figure 1*)

Le paysage est généralement mollement ondulé sur les récifs soulevés les plus récents, mis à part les abrupts de raccordement entre niveaux différents. Il peut devenir très encaissé dans les régions les plus tectonisées, le réseau hydrographique s'enfonçant à l'occasion des fractures.

La proportion entre les deux constituants (smectites et calcaire), ainsi que l'épaisseur du sol, dépendent de la position topographique sur les versants élémentaires :

- les portions convexes et en forte pente portent des sols plus ou moins courts et caillouteux.
- les portions concaves et à faible pente portent des sols profonds, constitués essentiellement de smectites (plus de 80%).

Les distances entre les termes extrêmes de ces séquences sont généralement faibles, de 10 à 200 m.

1.2. - Les problèmes posés par la cartographie de ces sols

En Grande-Terre de Guadeloupe, ces sols ont fait l'objet d'une cartographie détaillée au 1/10000e (COLMET-DAAGE et al, 1968), dans laquelle ont été distingués, selon un découpage taxonomique arbitraire :

- les sols calcimorphes à tendance vertique ou rendziniformes (contenant des éléments calcaires),
- les vertisols et sols vertiques sans hydromorphie,
- les vertisols à hydromorphie temporaire.

Dans les deux premiers ensembles, des sous-ensembles ont été distingués en fonction de la profondeur de la discontinuité sol/roche, ou du caractère plus ou moins friable de la roche sous-jacente.

Si la distinction de ces unités taxonomiques permet de décrire complètement et d'insérer tous les termes d'une séquence, il n'en reste pas moins vrai que leur utilisation en unités cartographiques pose des problèmes de prospection et de délimitation, et ceci pour trois raisons :

- la pierrosité rend les sondages à la tarière difficiles et peu précis quant à la profondeur de la discontinuité sol/roche.
- la photo-extrapolation physiographique se trouve limitée par le fait que le passage d'un sol court à un sol profond est associé à un changement de concavité du relief de surface souvent trop faible pour être identifié en stéréoscopie ; par ailleurs, la surface des cannes à sucre en végétation masque les variations de la topographie.
- malgré l'utilisation d'une grande échelle, on ne peut souvent pas représenter des unités homogènes, selon les caractères retenus, à cause de la très forte variabilité spatiale des sols.

1.3. - La variabilité spatiale des fonctionnements hydriques conditionne étroitement les rendements des cultures

1.3.1. - Profondeur du sol, réserve utile et risque d'asphyxie

La proportion d'argile et de calcaire, ainsi que l'épaisseur du sol, commandent le comportement physique des sols, et par la même leur fonctionnement hydrique.

Lorsque l'argile est épaisse (>70 cm) on observe en saison sèche une fissuration liée au retrait, ainsi qu'une structuration centimétrique de l'horizon de surface riche en racines. Celles-ci explorent alors très profondément le sol, qui comporte manifestement une réserve utile élevée pour la canne à sucre. Mais en saison humide, la macro-porosité associée à ces deux niveaux de structuration disparaît à l'occasion du regonflement. La seule porosité existante alors, celle du réseau des tactoïdes argileux ($\approx 1 \mu\text{m}$), est remplie totalement par l'eau. Le sol devient alors asphyxiant, tandis qu'apparaissent des signes d'hydromorphie plus ou moins nets.

Pour des épaisseurs d'argiles plus faibles (<70 cm), la réserve utile reste élevée ; en revanche la fermeture des fissures est plus lente, car elles atteignent le calcaire sous-jacent qui draine l'eau susceptible de les remplir. Le sol ne présente alors pas de signe d'hydromorphie.

Enfin lorsque argile et cailloux sont en mélange, ces derniers permettent la création d'une structure plus fine que les massifs interfissurés (en jouant le rôle d'amorces multiples de rupture), et plus stable en période humide ; le calcaire proche permet l'évacuation rapide de l'eau infiltrée. Ces sols ne posent jamais de problèmes d'excès d'eau, en revanche la réserve utile est limitée par la faible profondeur et par la pierrosité.

1.3.2. - Exemple de réponse de la canne à sucre à la variabilité des sols

PELLERIN (1985) montre la relation linéaire entre les rendements en canne à sucre de l'Est de la Grande-Terre et le déficit hydrique ; celui-ci est calculé par simulation informatique du bilan hydrique en prenant en compte une réserve utile de 150 mm correspondant à une profondeur de 1 m. Cette réaction de la canne à sucre au déficit hydrique, à l'échelle interan-

nuelle, s'accompagne d'une réaction spatiale (sur une même année) à la variabilité des réserves utiles (*figure 2*).

- Relations rendements en canne-types de sol en année normale, (déficit n'intervenant que pendant la période d'accumulation du saccharose, besoins satisfaits pendant la période de croissance ; récolte 1981).

On observe une relation quasi linéaire entre les rendements et la profondeur de 0,2 à 0,8 m. Cette relation correspond à une probable corrélation entre les réserves en eau et la profondeur entre 0,2 et 0,8 m. Notons que les rendements varient alors du simple au double selon le type de sol. Au-delà de 0,8 m la croissance des rendements est plus lente, la variété exprimant alors pleinement son potentiel.

- Relations rendements en canne-types de sol en année excédentaire (excès d'eau pendant la période de repousse et de tallage ; récolte 1982).

Par rapport à la récolte 1981, on observe alors un effet bénéfique sur les sols les plus courts avec un gain de rendement de 10 à 15 t/ha. Au contraire il apparaît un effet dépressif sur les sols les plus profonds, avec une diminution de rendement de 15 à 35 t/ha. Il apparaît donc que la pluviométrie très élevée a compensé dans une certaine mesure la faiblesse de la réserve utile des sols calcimorphes ; au contraire elle a engendré un excès d'eau dans les vertisols profonds, qui ont exprimé leur hydromorphie potentielle, et ceci d'autant plus qu'ils sont suralimentés en eau. Quant à l'intervalle de profondeurs contenant le point d'effet nul, il correspond aux sols calcimorphes profonds et aux sols vertiques sans hydromorphie.

La connaissance de la distribution des sols à très grande échelle (intraparcellaire) apparaît donc nécessaire dans la mesure où elle conditionne la distribution des rendements en culture sèche sur une même parcelle, et les gains ou pertes de rendement que l'on peut obtenir selon les méthodes d'irrigation retenues. Ceci est valable non seulement pour la canne à sucre, mais aussi pour les cultures maraîchères irriguées dont les rendements peuvent varier du simple au double selon le type de sol à l'intérieur de parcelles souvent petites (0,25 ha) (B. NEY, 1985). Nous avons donc recherché une méthode de description de l'organisation des matériaux à très grande échelle,

qui soit peu coûteuse, plus rapide et pertinente que les sondages à la tarière, et non perturbatrice du sol.

II- UTILISATION DES MESURES DE RESISTIVITE ELECTRIQUE POUR LA CARTOGRAPHIE DES SOLS A ARGILES GONFLANTES.

Compte-tenu des contraintes précédemment évoquées, nous avons rejeté les méthodes d'observation directe pour nous tourner vers les méthodes de prospection à partir de la surface utilisée en géophysique.

Parmi ces méthodes, la plus pratiquée, et la moins onéreuse, est la mesure de la résistivité électrique, que nous avons retenue : une étude préliminaire nous a montré que le contraste résistif des matériaux constitutifs des sols à argiles gonflantes de Grande-Terre est élevé (3 à 4 $\Omega.m$ pour l'argile à structure continue, 15 à 50 $\Omega.m$ pour le calcaire corallien), ce qui était à priori une bonne garantie quant à la possibilité de distinguer les matériaux par leur résistivité.

2.1. - Principes généraux de la méthode (figure 2)

Largement développée dans de nombreux ouvrages de géophysique (dont HESSE, 1966 et ASTIER, 1971), nous rappellons brièvement la théorie et les techniques utilisées dans la "méthode électrique".

2.1.1. - Mesure de la résistivité d'un milieu homogène, distribué sur un demi-espace

- Calcul de la résistivité

Soit une électrode ponctuelle implantée en surface, injectant un courant continu. Il s'établit un système de courant à symétrie radiale. A la distance r , la chute de potentiel dV créée par le passage du courant dans un tronc de cône élémentaire, de génératrice infiniment petite dr et de section ds est : $-dV = \rho \frac{dr}{ds} \times I$ (où I est l'intensité, et ρ la résistivité).

Soit pour une calotte hémisphérique d'épaisseur dr et de rayon r .

$$-dV = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \times I$$

Le potentiel à la distance r est donc, par intégration :

$$V = \rho \frac{I}{2\pi r} + \text{Cte}$$

Le potentiel en un point P du sol, situé entre deux électrodes A (d'entrée) et B (de sortie du courant),

$$V = \rho \frac{I}{2\pi} \left(\frac{1}{PA} - \frac{1}{PB} \right)$$

- La méthode des quatre électrodes

La méthode la plus utilisée est alors la mesure du champ au voisinage du plan médiateur de AB (passant par O milieu de AB) ; dans ce voisinage, on assimile les lignes de courant à des droites parallèles, et donc les surfaces équipotentielles à des plans parallèles. Ces surfaces sont interceptées par des électrodes M et N, dites "électrodes de potentiel", qui sont symétriques par rapport à O et placées sur la ligne AB (MN petit devant AB). Il s'agit alors du dispositif de Schlumberger.

Nous avons préféré la méthode de Wenner, où les électrodes sont équidistances ($AM = MN = NB = a$) (Figure 3), car sa sensibilité est indépendante de la longueur de la ligne AB.

Dans cette configuration :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi a} \quad \text{soit} \quad \rho = \frac{2\pi a}{(m)} \frac{V}{I} \quad \begin{array}{l} \swarrow (V) \text{ si on mesure à la fois} \\ \text{ddp et intensité} \\ \nwarrow (A) \end{array}$$

ou $\rho = 2\pi a R$ si l'on mesure directement
($\Omega \cdot m$) (m) (Ω) la résistance R.

- Matériel utilisé

Il s'agit d'un ohm-mètre (Megger, "Earth tester"), à mesure par équilibre de zéro, fournissant un courant alternatif d'une fréquence de 100 à 140 Hz. Ce matériel a été choisi pour plusieurs raisons :

- sa légèreté en fait un appareil facile à manipuler,
- la mesure directe de la résistance par un pont de Wheadstone simplifie le nombre de mesures à effectuer,

- le courant alternatif permet d'éviter la polarisation des électrodes, tandis que son inconvénient, "l'effet de peau", c'est à dire la faible profondeur explorée à cause des contre-courants induits, ne nous gêne pas puisque nous nous intéressons aux premiers mètres de la subsurface,
- la mesure "à équilibre de zéro", qui se fait à intensité nulle au niveau des électrodes M et N permet de s'affranchir de l'effet éventuel de leur résistance ("de piquet") dans la mesure.

L'incertitude sur la mesure, liée à l'appareillage, est inférieure à 1%.

2.1.2. - Identification d'une discontinuité horizontale

Si dans le cas d'un milieu homogène la résistivité mesurée est indépendante de AB (ou de a), il n'en n'est pas de même dans le cas de la superposition de deux couches horizontales de résistivités différentes ρ_1 et ρ_2 . (ρ_1 d'épaisseur e, ρ_2 d'épaisseur infinie).

Dans ce cas l'on mesure une résistivité apparente ρ_a , qui tend vers ρ_1 quand $a \rightarrow 0$, et vers ρ_2 quand $a \rightarrow \infty$

La résistivité R_a obtenue à écartement a n'est pas liée à ρ_1 , ρ_2 et $\frac{a}{e}$, par une relation mathématique simple.

La détermination de ρ_1 , ρ_2 et e se fait généralement à partir d'une série de mesures centrées au même point, obtenues en faisant varier a (sondage électrique) ; la courbe $\rho_a = f(a)$ établie en coordonnées logarithmiques, est alors comparée à des abaques construites sur modèles.

Un exemple complexe d'utilisation du sondage est résumé dans la *figure 4* ; cet exemple montre la pertinence des informations obtenues par un sondage électrique alors que l'usage de la tarière était manifestement limité.

2.1.3. - Spatialisation de la profondeur d'une discontinuité

Dans la mesure où sont superposés deux niveaux de résistivités différentes et constantes, on peut mettre en évidence les variations spatiales de la profondeur e de la discontinuité en déplaçant un dispositif dont l'écartement a, convenablement choisi, est constant. Les mesures sont alors généralement faites sur des transects ou "trainés résistifs".

2.2. - Les conditions d'utilisation correcte

2.2.1. - Les conditions relations aux matériaux

La condition primordiale pour obtenir une caractérisation résistive correcte des superpositions de matériaux est que le contraste de résistivité entre les matériaux soit suffisant.

En second lieu, il faut retenir que le conducteur essentiel du courant dans un sol est l'eau remplissant la porosité ; la résistivité sera donc influencée par la résistivité de l'eau et par l'humidité. Or l'humidité est un paramètre éminemment variable au cours du temps : ainsi, la résistivité d'un sable sera très variable en fonction de son état d'humidité. Cette propriété est du reste utilisée pour des mesures de potentiel de l'eau dans les sables (BOTTRAUD et al, 1985).

Dans le cas qui nous préoccupe, l'argile gonflante montre aussi une résistivité variable avec l'humidité, mais d'une manière indirecte : ce n'est pas à cause du degré de remplissage variable de la porosité de l'argile par l'eau, mais à cause de l'apparition d'une macroporosité fissurale remplie par de l'air lors du retrait à la dessiccation.

La *figure 5* montre la nécessité de travailler en *saison humide* pour obtenir une caractérisation résistive fidèle des matériaux gonflants.

2.2.2. - Conditions relatives aux facteurs externes

- le relief intervient en rapprochant les surfaces équipotentielles si la ligne A, M, N, B est concave, et en les éloignant si elle est convexe. Il conviendra de s'assurer que la courbure est négligeable sur la ligne AB.

- la température : les faibles contrastes jour-nuit et annuel (< 4°C à 10 cm, nul à 50 cm) permettent de penser que la variation de température du sol est négligeable dans l'intervalle de temps de mesures d'un transect :

les mesures étant effectuées entre 10 et 16h, on peut considérer que l'amplitude thermique est < 1°C dans le volume exploré ;

D'Après HESSE 1966, $\frac{\Delta\rho}{\rho} = e^{-A(\Delta\theta)} - 1$ avec $0,016 < A < 0,021$, ce qui donne
donne $\frac{\Delta\rho}{\rho} < 2\%$

L'utilisation de cette technique deviendrait en fait beaucoup moins commode en région tempérée ou aride.

2.2.3. - Conditions relatives au dispositif

Le matériau dans lequel les électrodes sont implantées doit pouvoir être considéré comme homogène et isotrope. Dans la pratique il faut que les éléments hétérogènes soient d'une taille inférieure à 1/10e de l'écartement a . Ainsi les mesures de résistivité faites sur un sol dont l'horizon de surface comporte des cailloux de 5 cm seront fiables et fidèles pour des écartements a supérieurs à 0,5 m.

2.3. - Principe de cartographie utilisé

2.3.1. - Choix des écartements discriminants à partir de sondages

Pour une cartographie rapide, il convient de ne pas multiplier les écartements pour une station de mesure. Nous avons donc retenu deux solutions :

- choix d'un seul écartement discriminant, pour une cartographie très rapide (trainé électrique ou cartographie en grille).
- choix de trois écartements dans la position de courbe la plus représentative de la courbe complète $\rho = f(a)$

a) Cartographie résistive à écartement unique

. L'écartement retenu doit correspondre à la dispersion maximale des valeurs de résistivité associées aux différents types de sols.

La *figure 6* montre sur un ensemble de sondages $\rho = f(a)$ réalisés sur les divers types de sols à argiles gonflantes de Grande-Terre, le caractère discriminant de l'écartement $a = 2$ m qui permet dans notre cas de séparer correctement des profondeurs allant de 0,2 à 2,0 m les unes des autres.

. Le choix d'un écartement unique oblige à faire l'hypothèse d'une relation univoque entre la profondeur, la pierrosité du sol, et les caractéristiques porales du calcaire sous-jacent, c'est à dire

que la profondeur exprime implicitement les autres paramètres.

Cette hypothèse a été testée par comparaison des profondeurs z mesurées à la tarière et des profondeurs calculées à partir de la relation $\rho = f(\hat{z})$ ou \hat{z} est la profondeur de discontinuité estimée à partir des sondages électriques (*figure 7*).

Trois groupes de points se distinguent :

- la relation est bonne pour le groupe II, correspondant à une argile non ou peu caillouteux sur le calcaire.
- elle est apparemment moins bonne pour le groupe III : si l'on considère que la profondeur mesurée à la tarière est bonne, on observe des résistivités mesurées inférieures aux résistivités calculées selon I. Or l'augmentation de la pierrosité devrait au contraire donner des valeurs de résistivité supérieures. On est alors obligé d'admettre que c'est la sous-estimation de la profondeur à la tarière qui entâche la relation. En tout état de cause, la profondeur estimée par la résistivité est meilleure que la profondeur mesurée à la tarière.
- enfin la relation n'est plus vraie pour les sols très courts, (<20 cm), où les caractéristiques de remplissage et d'importance de la porosité du calcaire peuvent faire varier la résistivité entre 15 et 50 $\Omega.m$. Mais dans ce cas encore, la résistivité reste une grandeur pertinente car elle exprime un certain degré d'exploitabilité par les racines : les valeurs de 15 $\Omega.m$ sont associées à un calcaire pulvérulent, à interstices remplies par l'argile, c'est à dire matériau meuble et comportant une capacité de rétention d'eau ; les valeurs de 50 $\Omega.m$ correspondent au contraire soit à un calcaire compact, soit à un calcaire dur à forte macroporosité occupée par de l'air, c'est à dire à des matériaux inexploitable et/ou secs.

L'écartement $a = 2$ m a donc été utilisé pour faire des cartographies rapides (30 secondes par mesure).

b) Cartographie résistive à trois écartements

L'utilisation de trois écartements permet de reconstituer approxi-

mativement la courbe $\rho = f(a)$ complète à partir des abaques à deux niveaux résistifs.

Dans le cas qui nous intéresse, nous avons retenu (0,5, 1.0, 2.0 m). Cette technique, un peu plus longue à mettre en oeuvre, permet de s'affranchir de l'hypothèse de relation univoque pierrosité-profondeur-type de calcaire. On peut ainsi estimer ρ_1 (résistivité du sol liée à la pierrosité), ρ_2 (résistivité du calcaire liée à son faciès) et z (profondeur de la discontinuité).

2.3.2. - Un exemple de cartographie résistive à écartement unique (Dispositif de Wenner, $a = 2$ m, prospection en saison humide).

Rappelons que cette technique est particulièrement intéressante pour des cartographies à très grande échelle ; il s'agit dans l'exemple choisi d'une carte de définition des sols sur une parcelle de 5 ha de canne à sucre, destinée à un essai d'irrigation.

a) Les limites de la cartographie classique

Une cartographie à la tarière a été effectuée (*figure 8*), selon une grille orthogonale à maille de 20 m (temps de travail au terrain : 40 heures). Cette cartographie rend bien compte d'une distribution détaillée des sols argileux ; en revanche, les profondeurs atteintes dans les sols caillouteux montrent une variabilité telle qu'il n'a pas été possible de faire des différences spatiales organisées entre les classes de profondeur des sols calcimorphes. La profondeur a pourtant une importance agronomique capitale.

b) La calage de la méthode résistive

Cette opération a pour but de vérifier sur un périmètre, la validité des hypothèses de relation résistivité-profondeur utilisée. Elle est exprimée sur la *figure 9*.

Par ailleurs, elle permet de définir la variabilité spatiale des matériaux, qui conditionne la maille de mesures. (Nous n'aborderons pas ici tout l'intérêt que présente la résistivité, paramètre quantitatif synthétique, dans l'analyse géostatistique).

c) Cartographie résistive

Elle a été effectuée en seulement 24 h, pour une grille orthogonale à maille de 10 m, ce qui représente une vitesse d'information 6 fois supérieure à celle du sondage à la tarière.

La carte (*figure 10*) a été dessinée à partir des courbes isorésistives obtenues par interpolation sur 8 points.

On observera la très grande finesse d'image obtenue au sein des sols calcimorphes, en même temps que la très bonne adéquation au relief des nuances introduites : les zones biconvexes sont associées à des sols lithomorphes, dont la présence correspond à des pointements de calcaire plus dur et plus macroporeux (résistivité très élevée).

On notera dans la partie nord-orientale, l'anomalie correspondant à une ancienne mare rebouchée par une argile caillouteuse : le sol qui apparaissait court à la tarière, a montré une résistivité anormalement basse. Cette contradiction apparente a été levée par un sondage électrique qui a permis de mettre en évidence la présence de l'argile hydromorphe sous-jacente, confirmée par l'ouverture d'une fosse (*figure 4*).

Enfin, et surtout, si l'illustration des espaces entre deux courbes isorésistives par certains caractères du sol, réintroduit une représentation en unités pédologiques juxtaposées, le rapprochement ou l'éloignement de ces courbes isorésistives permettent d'exprimer la vigueur du gradient continu de variation de la profondeur et de la pierrosité. La continuité de ce gradient sera d'autant mieux exprimée que la densité de mesures résistives sera élevée.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La méthode électrique a montré son efficacité dans la description détaillée des systèmes de sols sur calcaires coralliens de la zone caraïbe.

Rappelons que cette efficacité est liée essentiellement à la superposition de deux matériaux de résistivité contrastée, l'argile (smectite calcique) de 3 Ω .m en structure continue, et le calcaire de 10-50 Ω .m selon les situations. Dans d'autres cas, on sera déçu de constater que des horizons pédologiques morphologiquement contrastés ne peuvent être mis en évidence par un sondage électrique.

On retiendra que les facteurs essentiels qui déterminent la résistivité sont :

- la porosité, son degré de remplissage par l'eau, ainsi que la continuité de cette phase liquide.
- la conductivité électrique de cette eau intersticielle.

Ainsi, on peut attendre des résultats intéressants de l'utilisation de la méthode électrique dans la cartographie d'états hydriques ou de salinités spatialement différenciés, que ces états soient permanents, liés à la nature et à l'organisation des constituants solides, ou variants saisonnièrement.

Nous avons présenté un exemple relatif à une cartographie des constituants permanents ; ceci nous a obligés à travailler à des états hydriques précis dans le temps ("saturation", saison humide, fentes fermées).

Nous présentons plus tard un exemple relatif à l'utilisation des variations de la résistivité dans le temps, appliquée au fonctionnement hydrique et poral d'un vertisol.

Dans les deux types d'utilisation (spatiale ou dans le temps) la mesure de résistivité séduit par son caractère non perturbateur du sol et rapide. Cette dernière qualité permet de faire en routine des prospections à densité de mesure élevée, compatibles avec la continuité des systèmes de sols.

- BIBLIOGRAPHIE -

- ASTIER J-L., 1971 - Géophysique appliquée à l'hydrogéologie - Masson, Paris, 44-75.
- BOULET R., CHAUVEL A., HUMBEL F-X., LUCAS Y., 1982 - Analyse structurale et cartographie en pédologie.
Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XIX, n°4, 309-352.
- BOTTRAUD J-C., BORNAND M., SERVAT E. - Etude d'une hétérogénéité du sol et variabilité des comportements agronomiques. Proposé, Science du Sol.
- COLMET-DAAGE E., LEVEQUE A., de CRECY J., POUMAROUX A., 1968 - Carte des sols de la Grande-Terre (Guadeloupe) à 1/10.000e ORSTOM, centre des Antilles.
- HESSE A., 1966 - Prospections géophysiques à faible profondeur.
Applications à l'archéologie. Dunod, Paris.
- NEY B. - Effets combinés de la profondeur, du travail du sol, de l'irrigation en vertisols, sur le rendement de la tomate. Proposé.
- PELLERIN S. - Analyse de séries chronologiques de rendements en canne à sucre obtenus en Guadeloupe, à partir d'un modèle de simulation du bilan hydrique. Agronomie, Proposé.

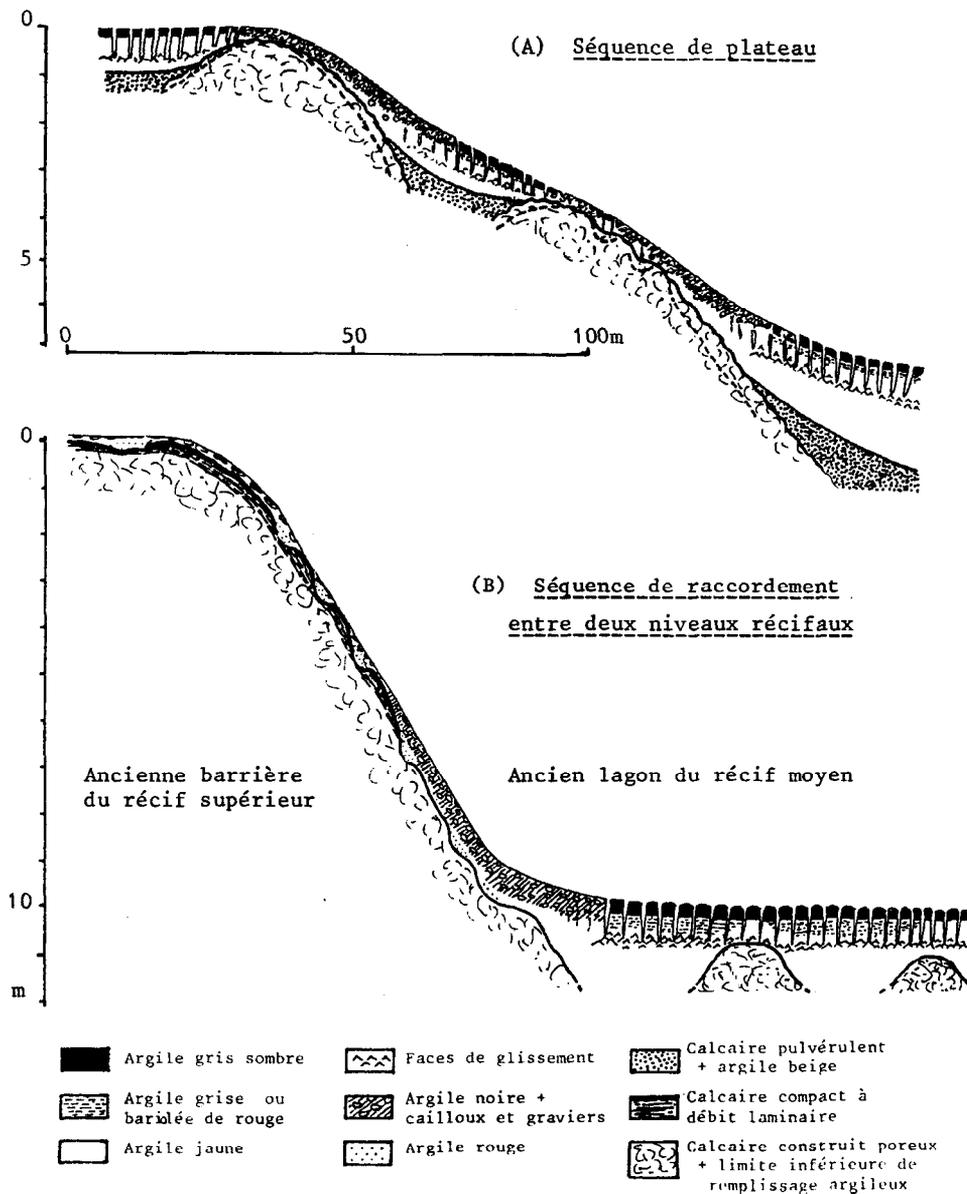


Fig. 1 : Séquences typiques de sols à argiles gonflantes sur calcaire corallien (Grande-Terre, Guadeloupe)

Fig. 1 : Secuencias típicas de suelos con arcillas dilatables sobre calizas arrecifales (Grande-Terre, Guadeloupe)

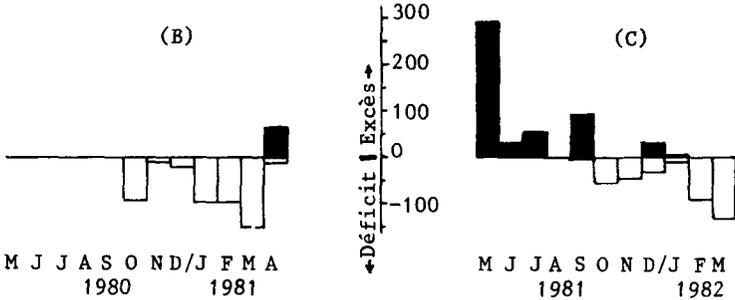
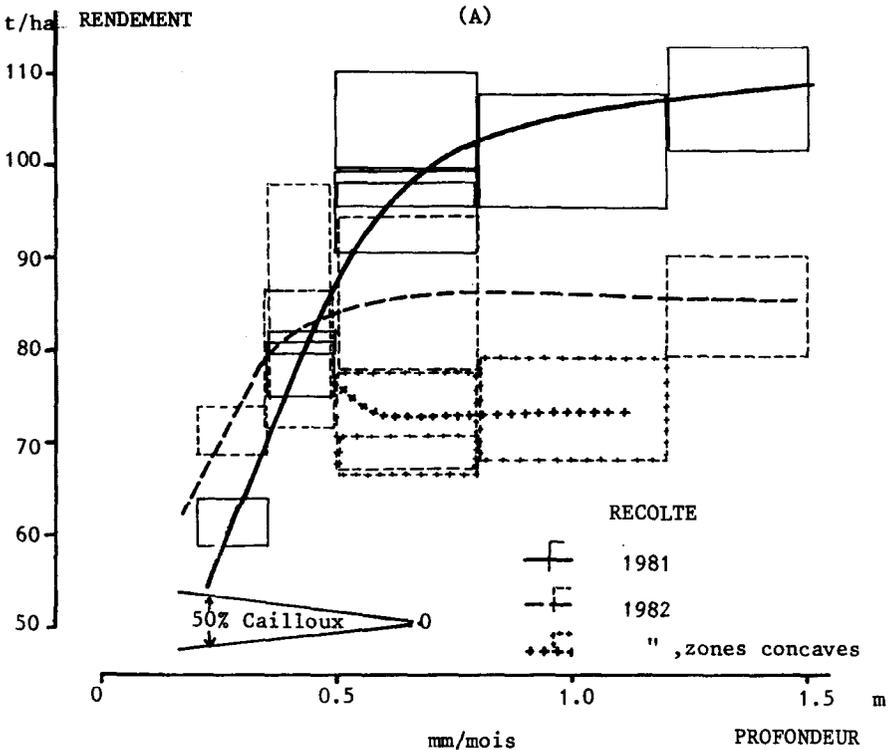
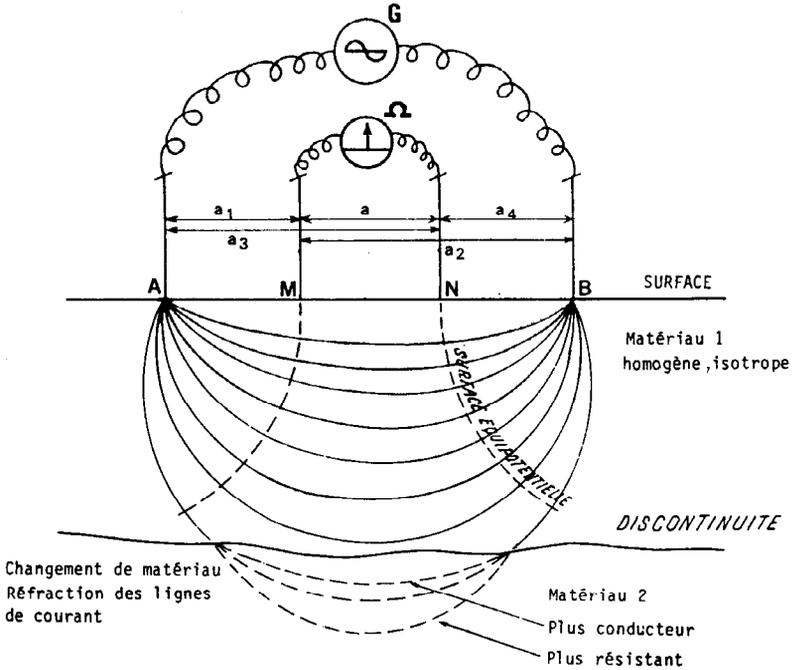


Fig. 2 : Effet de la profondeur du sol, à travers la variation de la gestion de l'eau, sur les rendements bruts en canne à sucre

Fig. 2 : Efecto de la profundidad del suelo, a través de la variación de la explotación del agua, sobre los rendimientos brutos de la caña de azúcar

(A) Comparaison des relations rendement-profondeur sur les deux premières récoltes (mesures sur des placettes d'une même parcelle) Y.M. CABIDOCHÉ et P. ARCHER

(B) et (C) Distribution de l'excès et du déficit climatiques mensuel en eau, sur chacune des campagnes (Bilan calculé au pas journalier, pour des vertisols de 1m, RU=150 mm, RFU=85 mm, programme S. PELLERIN, 1985)



A, B = Electrodes de courant
M, N = Electrodes de potentiel

G : Générateur de courant alternatif
Ω Mesure de la résistance
"à équilibre de zéro", R (ohms)

$$\text{Cas général : } \rho = 2 \pi R \times \frac{1}{\left(\frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_2}\right) - \left(\frac{1}{a_3} - \frac{1}{a_4}\right)}$$

En configuration de Wenner : $a_1 = a = a_4$

$$\rho = 2 \pi a R$$

$\Omega \cdot m$ $m \cdot \Omega$

Fig. 3 : Principe de la mesure de la résistivité apparente du sol par la méthode des "quatre électrodes"

Fig. 3 : Principio de la medida de la resistividad aparente del suelo por el método de los "cuatro electrodos"

MESURES DE RESISTANCE A DIVERS ECARTEMENTS

a (m)	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,1	1,4	1,8	2,2	3,0	4,0	6,0
R (Ω)	13,8	11,4	9,47	6,02	3,70	1,74	0,91	0,60	0,47	0,37	0,32	0,29
ρ(Ω.m)	17,3	21,5	23,8	22,7	18,6	12,0	8,0	6,8	6,5	6,9	8,0	11,0

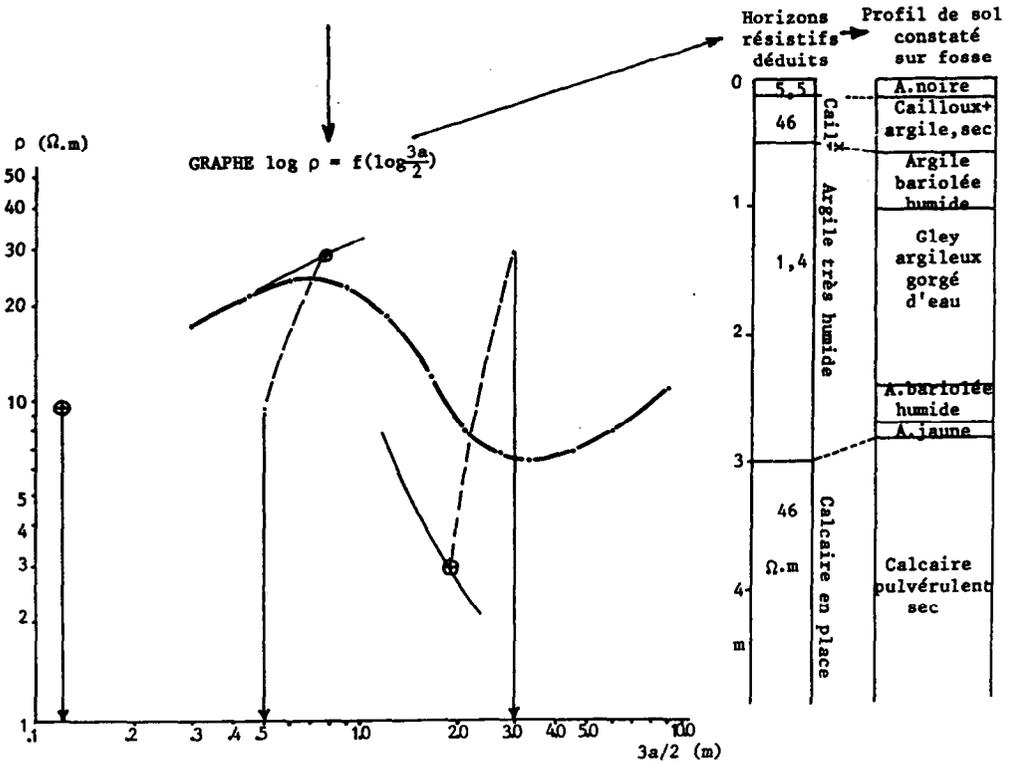


Fig. 4 : Les étapes de réalisation d'un sondage électrique

Fig. 4 : Las etapas de realizaci3n de una prospecci3n el3ctrica

Cas d'un sol profond à recouvrement caillouteux, qualifié à tort de "sol court" lors d'une prospection à la tarière

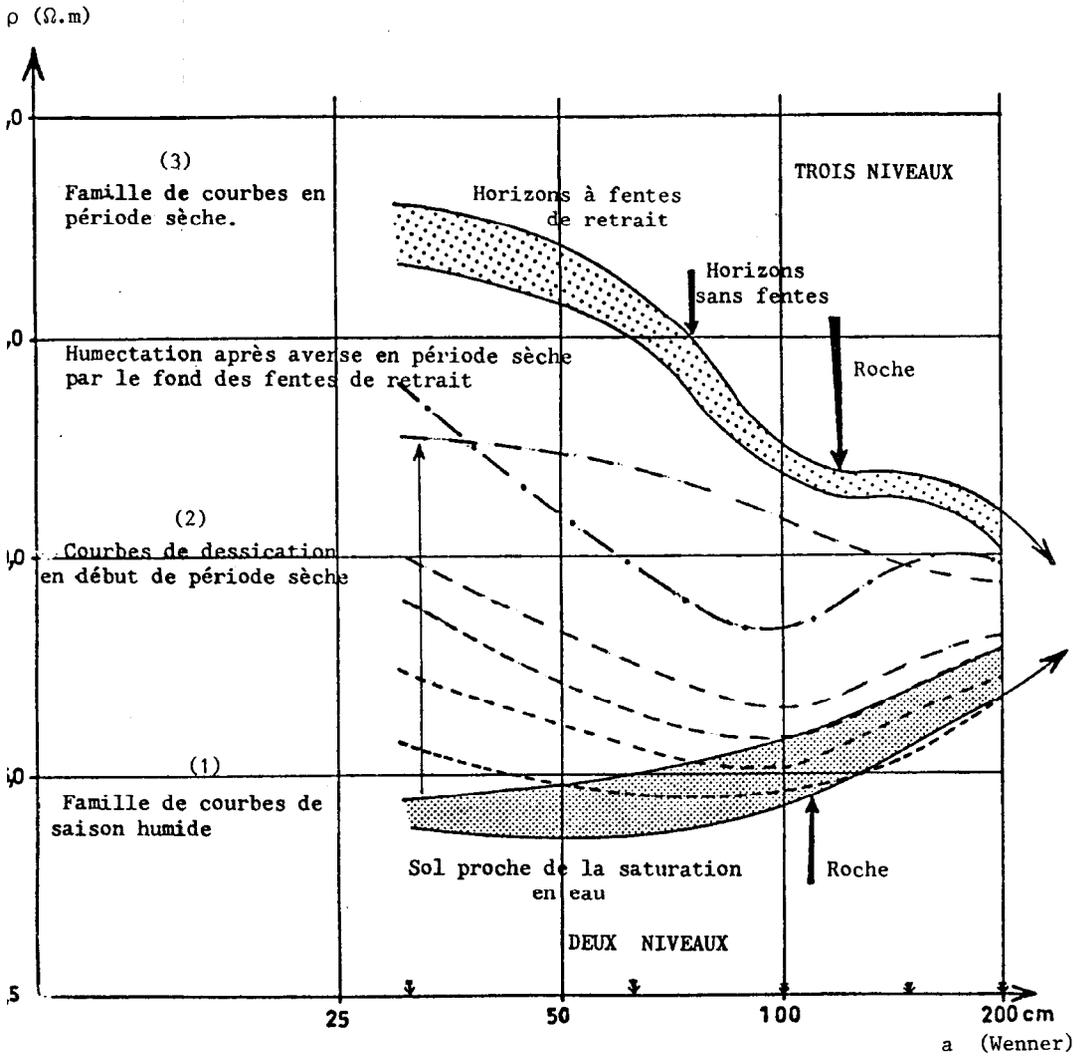
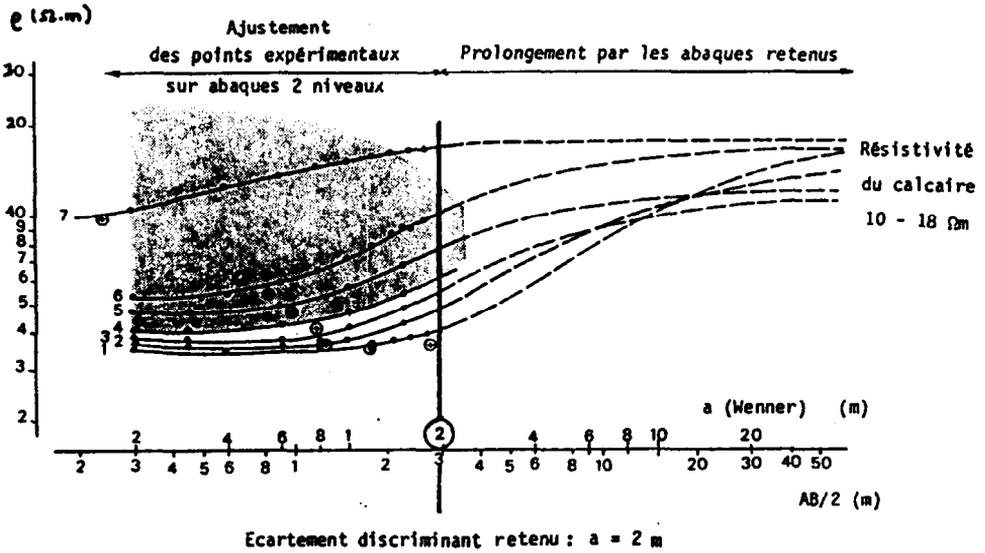


Fig. 5 : Variations saisonnières d'un sondage électrique en vertisol

Fig. 5 : Variaciones estacionales de una prospección eléctrica en un vertisuelo

- (1) Sondages regroupés, interprétables en deux niveaux résistifs : argile à structure continue/calcaire
- (2) Structuration, par dessiccation, de l'horizon de surface ; sondage à trois niveaux résistifs
- (3) Intervention des fentes de retrait : l'hypothèse d'homogénéité n'est plus respectée ; sondage ininterprétable



- ⊙ "Croix de l'abaque" = point dont l'abscisse en AB/2 est la profondeur de la discontinuité (épaisseur d'argile).
- 1 Vertisol hydromorphe (argile grise/argile gris-clair ou gris + rose bariolé)
 - 2 Vertisol hydromorphe (argile grise/argile gris-clair ou gris + rose bariolé)
 - 3 Vertisol modal (argile grise/argile jaune)
 - 4 Vertisol modal (argile grise/argile jaune) = Plage de variation intersaisonnière du sondage
 - 5 Sol vertique (argile noire + quelques cailloux/argile jaune)
 - 6 Sol vertique (argile noire + quelques cailloux/argile jaune)
 - 7 Sol calcique mélanisé court (argile sableuse et caillouteuse)

Fig. 6 : Effet de la profondeur (et de la pierrosité) sur les sondages électriques ; choix d'un écartement a unique, discriminant (a=2m)

Fig. 6 : Efecto de la profundidad (y de la pedregosidad) sobre las prospecciones eléctricas ; selección de una distancia a única, discriminante (a=2m)

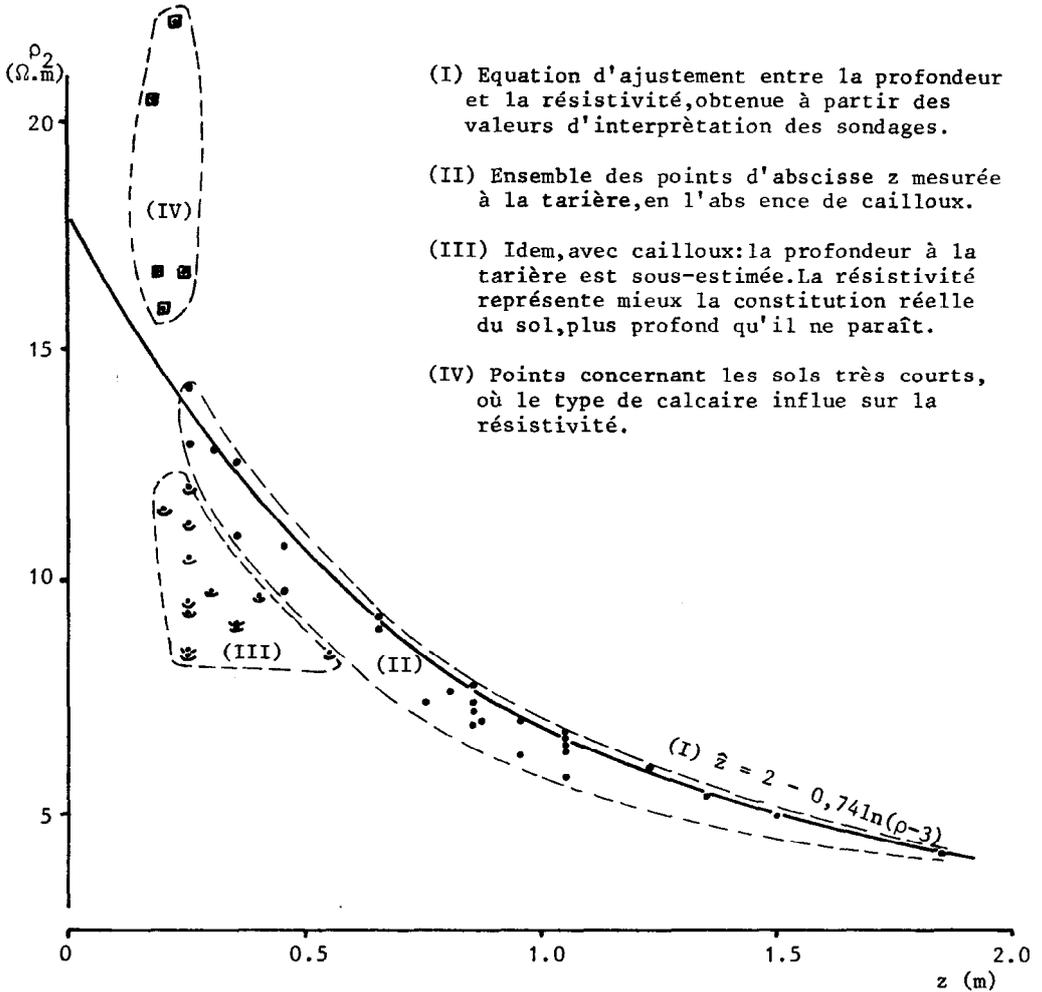


Fig. 7 : Relation entre la résistivité ρ_2 ($a=2m$) et la profondeur du sol (z)

Fig. 7 : Relación entre la resistividad ρ_2 ($a=2m$) y la profundidad del suelo (z)

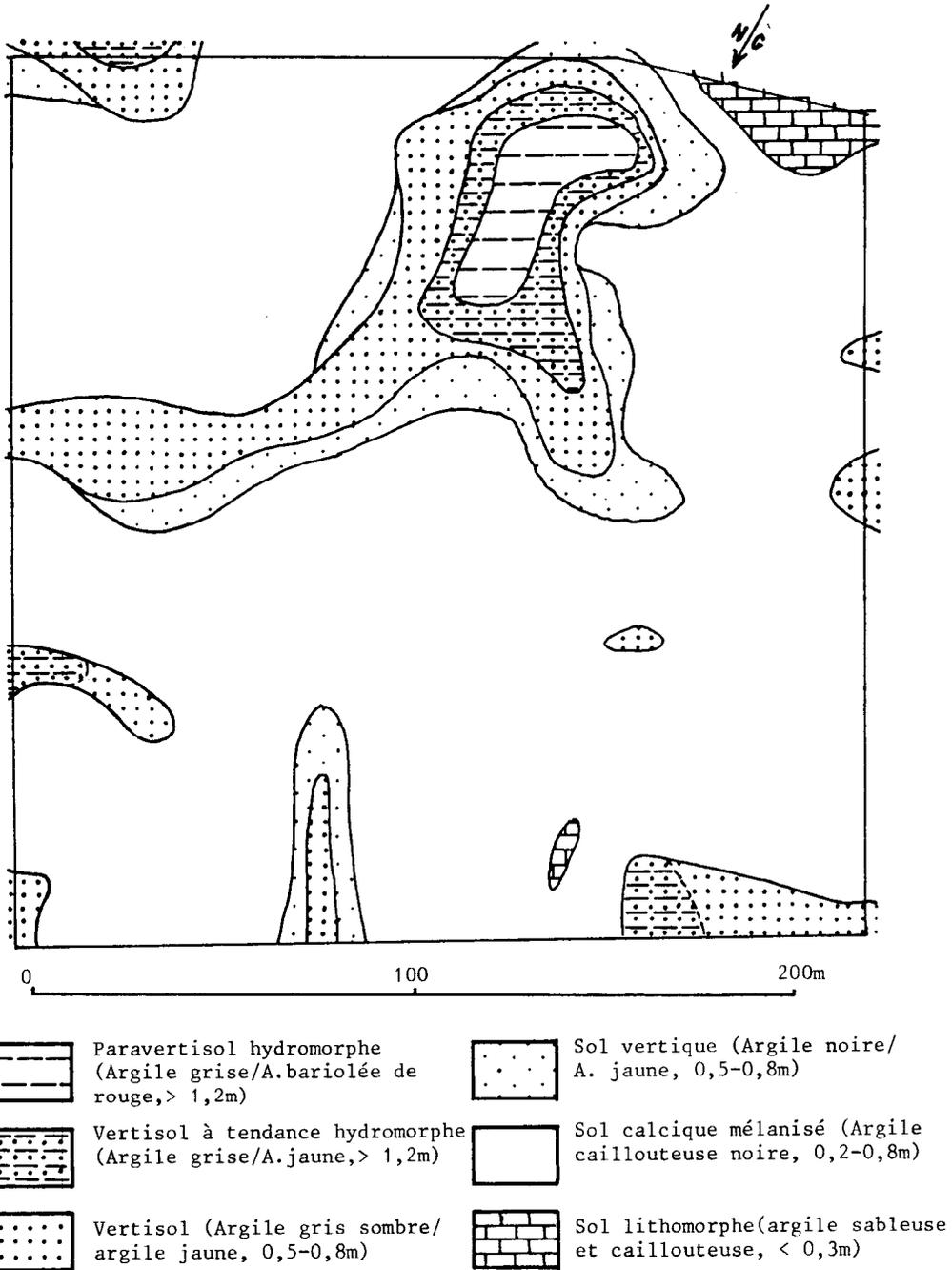


Fig. 8 : Carte des sols d'une parcelle expérimentale, obtenue à partir de sondages à la tarière en grille carrée de 20 m

Fig. 8 : Mapa de los suelos en una parcela experimental, obtenida a partir de prospecciones con taladro en una rejilla cuadrada de 20 m

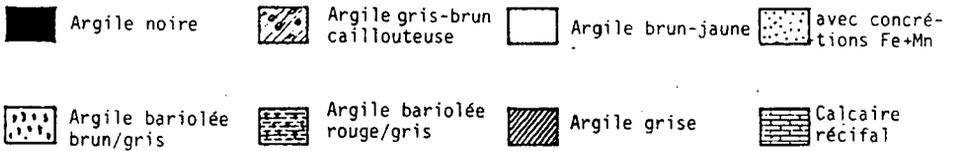
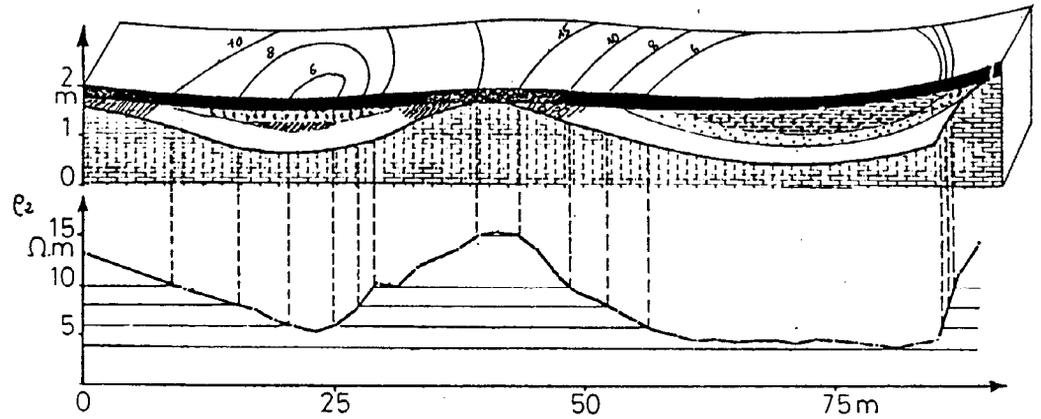


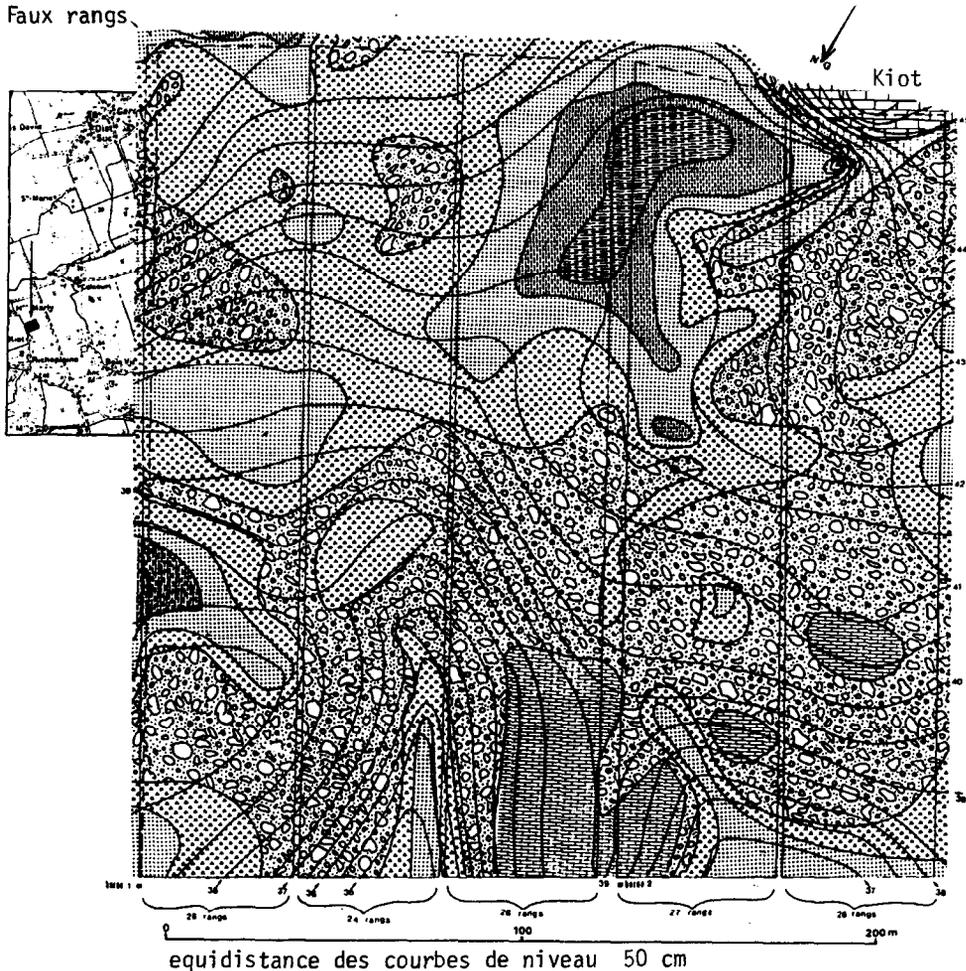
Fig. 9 : Correspondance entre un transect résistif à l'écartement discriminant ($a=2m$) et une coupe de sols à argiles gonflantes de Grande-Terre

Fig. 9 : Correspondancia entre un transecto resistivo con una distancia discriminante ($a=2m$) y una sección de suelos con arcillas dilatantes en Grande-Terre

Exemple d'expression des lignes d'isoépaisseur de sol par des courbes isorésistives

Mesures effectuées en période humide

Faux rangs



Surface totale : 5,10 ha
 Surface en cannes : 4,86 ha

Carte des sols de la parcelle Gardel-Desrochers (lieu-dit Kiot)
 Grande-Terre, Guadeloupe par Y.M. Cabidoche, J. André, N. Jean-Bart,
 Station d'Agronomie I.N.R.A.A.G.

Fig. 10 : Carte obtenue par interpolation des mesures de resistivité
 (Wenner, $a=2m$, grille carrée à maille de 10 m)

Fig. 10 : Mapa obtenido por la interpolación de las medidas de resistividad (Wenner, $a=2m$, rejilla cuadrada con malla de 10 m)

	TYPE DE SOL	RESISTIVITE ($\Omega \cdot m$, Wenner 2m)	PROFONDEUR APPARENTE (m)	PIERROSITE	
Halloysite + Smectite ↑ Argile dominante = smectite calcique	Sol lithomorphe, "Rendzine" (argile sableuse calcaire)	> 30	< 0,2	+++	
	Sol lithomorphe (argile sableuse calcaire)	15-30	0,2-0,3	+++	
	Sol calcique mélanisé (argile caillouteuse sombre)	10-15	0,3-0,5	++	
	Sol calcique mélanisé (argile caillouteuse sombre) ou Sol vertique (argile grise / argile jaune)	8-10	0,5-0,75	++ à 0	
	Vertisol (argile grise / argile jaune)	6-8	0,75-1,2	0	
	Vertisol à tendance hydromorphe (argile grise / argile gris- clair / argile jaune)	4-6	1,2-2,0	0	
	Paravertisol hydromorphe (à 20cm, apparition d'un horizon bariolé rouge et gris, plus sodico-magnésien)	< 4	> 2,0	0	
		Sol perturbé, rendu caillouteux par brassage à l'occasion d'un remodelage.			

Prospection à la sonde complétée par des mesures de résistivité en transects à pas de 2m (étalonnage) et en grille à maille de 10m.

Légende de la figure 10

Leyenda de la figura 10