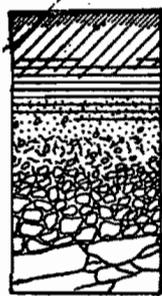


C. VALENTIN

RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION DE QUELQUES SOLS FERRALLITIQUES

NORD DE LA CÔTE D'IVOIRE

Pédologie Expérimentale



OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE - MER

CENTRE D'ADIOPODOUMÉ - CÔTE D'IVOIRE

B.P.V 51 - ABIDJAN



mars 1981

SOMMAIRE

	pages
<u>INTRODUCTION</u>	3
1. <u>MATERIEL ET METHODE</u>	4
1.1. <u>Définitions</u>	4
1.2. <u>Les tests pénétrométriques</u>	4
1.3. <u>Méthode utilisée</u>	6
1.3.1. <u>Appareil</u>	6
1.3.2. <u>Protocole</u>	6
1.4. <u>Sols étudiés</u>	7
2. <u>RESULTATS</u>	9
2.1. <u>Influence de l'humidité</u>	9
2.2. <u>Influence des autres facteurs</u>	10
3. <u>DISCUSSION ET APPLICATIONS</u>	16
3.1. <u>Croissance racinaire</u>	16
3.2. <u>Utilisation d'engins lourds</u>	18
<u>CONCLUSION</u>	21
<u>REMERCIEMENTS</u>	22
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	23

RÉSISTANCE MÉCANIQUE À LA PÉNÉTRATION DE QUELQUES SOLS FERRALLITIQUES

(Nord de la Côte d'Ivoire)

Résumé

L'emploi d'un pénétromètre simple (aiguille Proctor) sur le terrain a permis d'étudier l'influence de divers paramètres sur la résistance mécanique des sols de la pénétration. Lors des travaux de Cartographie menés dans le Nord de la Côte d'Ivoire, de nombreuses données ont ainsi été collectées (plus de 6.000). Une analyse de ces résultats en composantes principales a permis d'isoler quatre grands groupes d'horizons tandis qu'une relation entre la résistance à la pénétration et trois variables (humidité du sol, taux de matière organique et d'éléments grossiers) était obtenue à partir d'une analyse multivariable. Bien que l'existence de fortes corrélations entre les mesures pénétrométriques et les densités racinaires de la végétation de savanes ait été mise en évidence, il semble que ces résultats doivent être utilisés avec prudence pour les plantes cultivées. L'auteur propose également d'autres applications possibles de ces résultats comme la détermination d'humidités limites pour les travaux culturels. Il propose, en conclusion, une réflexion critique sur l'emploi, plus ou moins satisfaisant, des tests pénétrométriques.

Mots clés : sols ferrallitiques, pénétrométrie, analyse en composantes principales, analyse multivariable, densité racinaire, humidité du sol, travail du sol.

MECHANICAL RESISTANCE TO PENETRATION OF FEW FERRALLITIC SOILS
(Northern Ivory Coast)

Summary

A simple spring penetrometer (Proctor needle) was used under field conditions in order to show the effect of various parameters on soil strength. Numerous data (over than 6,000) were collected on ferrallitic soils of Northern Ivory Coast at the time of soil mapping works. Four main groups of soil layers could emerged through a principal components analysis and a predictive equation was derived from a multiple linear analysis conducted between soil strength values and three variables (soil moisture, organic matter and coarse constituents contents). Though strong correlations have been shown to exist between penetrometer measurements and root densities under natural savannah vegetation, caution is required in respect of the use of theses results for crops. Other applications for the Proctor needle are suggested such as the achievement of soil moisture criteria for tractability. The conclusion is devoted to a critical comment on the use and misuse of resistance to penetration tests.

Key words : ferrallitic soils, soil strength, principal components analysis, multiple linear analysis, root densities, soil moisture, tractability.

Introduction

Le pédologue décrivant un profil de sol se trouve souvent démuni pour décrire la consistance et la cohésion des horizons, et surtout pour en prévoir l'évolution au cours de ces saisons. Or, ces variables, souvent appréciées par évaluation de la résistance mécanique à la pénétration ont une influence non seulement pédogénétique (Humbel, 1974) mais également hydrologiques, le ruissellement augmentant avec la compaction des sols (Mohd et Kemper 1979), et agronomiques tant au niveau de la levée des semences (Stout, Buchele et Snyder 1961) et de l'enracinement (Taylor et Burnett 1964, Camp et Lund 1968) qu'à celui des coûts et temps de travaux (Hassan et Broughton 1974).

Aussi a-t-il paru utile de réaliser des mesures pénétrométriques en même temps que se déroulaient les travaux de cartographie des sols du Nord de la Côte d'Ivoire à 1/200.000, la plupart des études réalisées jusqu'ici ayant porté sur des échantillons remaniés de sols de pays tempérés ou même sur des terres synthétiques (Maertens 1964, Hutter 1966, Faure et Fiès 1972). Plus de 6 000 mesures ont ainsi été effectuées in situ au cours des différentes saisons ; leurs résultats ont donné lieu à un traitement statistique simple qui a permis d'évaluer l'influence relative des principaux facteurs intervenant sur la résistance mécanique à la pénétration. Ce travail apporte certains éléments de réflexion sur l'utilisation des données pénétrométriques.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Définitions

Certaines définitions de physique des sols sont souvent méconnues du pédologue et de l'agronome ; aussi paraît-il nécessaire d'en rappeler certaines :

Consistance : c'est "l'expression synthétique de l'ensemble des propriétés mécaniques du sol, qui dépendent : du degré d'humidité, du type d'essai qui est fait, du matériel sur lequel se fait cet essai : éclat, agrégat, assemblage d'agrégats" (ORSTOM, 1969).

Cette consistance passe par différents "états" (Hénin 1977) déterminés par des tests de terrain (ORSTOM 1969) ou de laboratoire (Atterberg 1912), chaque "état" correspondant à un comportement précis ("plastique", "collant", "friable", "fragile" etc...).

Compacité : porosité et compacité étant exprimées en pour cents la compacité est le complément à 100 de la porosité totale. "La compacité totale représente la fraction du volume total qui est occupée par la matière solide" (Humbel 1974).

Cohésion : "La cohésion d'un corps résulte de la résistance des liaisons qui unissent ses constituants ; on la mesure en déterminant la force nécessaire pour en provoquer la rupture" (Hénin, Gras et Monnier 1969).

1.2. Les tests pénétrométriques

Alors qu'il existe des protocoles bien définis pour les mesures de résistance de matériau, aucun type de mesures rigoureuses n'a pu être proposé pour l'étude de la cohésion des sols. Il n'est pas possible en effet de distinguer l'effort de pointe des faces de frottement latéral lors de la pénétration d'un objet dans le sol (Sanglerat 1965). Pour cette raison, les différentes mesures ne peuvent avoir que valeurs de tests (Freitag 1968) et la cohésion se voit ainsi remplacée comme objet d'étude par la résistance mécanique à la pénétration, résultante de phénomènes plus complexes mais paramètre plus simple à appréhender expérimentalement.

Un très grand nombre d'appareils permettent d'étudier les différentes résistances des sols à la traction, à la compression, à la flexion, au cisaillement etc... (Lambe, 1965, Kézdi 1974) mais la diversité des modèles semble encore plus marquée parmi les appareils vi-

sant à étudier la résistance mécanique à la pénétration. Les premiers engins, et également les plus lourds, ont été utilisés dans le domaine des Travaux Publics (Sanglerat 1965). Mais des pénétromètres de grande taille ont également été proposés pour l'étude des profils culturaux. Parmi ceux-ci, l'appareil de Smith et Dumas (1978) permet des mesures simultanées sur des profils de 3 m de large et 0,80 m de profondeur.

Comme pour les tests proctor, (Gballou 1976), les pédologues et les agronomes ont cherché à miniaturiser les engins utilisés en travaux publics. Ainsi, le type d'appareil le plus couramment utilisé au champ est le pénétromètre dynamique ; il s'agit d'une tige à extrémité, cônica ou non, pénétrant dans le sol sous l'effet d'un battage (généralement une masse métallique coulissant sur la tige joue le rôle de "mouton" (Hévin 1936, Malcolm 1964, Audry et *al.* 1973, Nicou 1975, Valentin et Mong-Gine 1979).

Dans un deuxième type d'appareils, l'énergie résultant de la chute du mouton est remplacée par une force exercée par un ressort (Gabrilides et Alexiadis, 1963, Taylor et Burnett 1964, Hendrick 1969). Certains de ces dynamomètres, alors peu précis, peuvent avoir des dimensions très réduites ("pénétromètre de poche").

Un troisième type d'appareils, utilisé plus particulièrement en laboratoire, permet de mesurer la force qu'une aiguille doit exercer (parfois de bas en haut pour simuler la levée de semence) pour provoquer la rupture d'un échantillon de sol (croûte de battance par exemple) (Hanks 1960 ; Morton et Buchele 1960 ; Stout, Buchele et Snyder 1961 ; Arndt 1964 ; Sharma et Agrawal 1978). La version perfectionnée de ce modèle maintient la vitesse de pénétration constante (Phillips et Don Kirkham 1962, Maertens 1964, Tackett et Pearson 1964, Khalid et Smith 1978, Welle et Treeswan 1978).

Cette diversité de types d'appareils destinés aux mesures de résistance mécanique est regrettable à plus d'un titre : il est difficile de comparer les résultats obtenus lors de travaux distincts non seulement parce que les tests ne sont pas normalisés, mais parce que l'objet mesuré lui-même diffère : il peut être en effet une énergie, une force, une pression, une profondeur d'enfoncement etc... En outre, le sol présente généralement une hétérogénéité telle qu'un très grand nombre de répétitions s'avère nécessaire pour la caractérisation d'un état de résistance donné, ce problème étant particulièrement sensible dans le cas de pénétration d'aiguilles de petit diamètre.

Cependant la plupart des auteurs (Freitag 1968, Hénin, Gras et Monnier 1969, Audry et *al.* 1973, Nicou 1975 etc...) soulignent l'intérêt de telles mesures tout en reconnaissant leurs limites. Elles permettent généralement des comparaisons intéressantes de résistances à la pénétration de différents matériaux et l'analyse des différents facteurs intervenant sur cette variable dans le cas où les travaux ont été conduits avec le même appareil.

1.3. Méthode utilisée

1.3.1. Appareil

L'appareil utilisé s'apparente à ceux du deuxième type (Gabrilides et Alexiadis 1963 ; Taylor et Burnett 1964 ; Hendrick 1969). Il s'agit d'une sonde dynamométrique, commercialisée par Labotest⁽¹⁾ sous le nom d'"aiguille proctor", constituée d'un ressort monté sur une tige de pénétration susceptible de recevoir deux embouts de longueurs et diamètres distincts (fig. 1). Cette tige graduée permet de fixer grâce à un onglet, la profondeur de pénétration. Un index signale la force maximale exercée, exprimée en deca Newtons (daN), qu'il est nécessaire d'exercer pour atteindre la profondeur choisie. L'échelle de force s'étend de 0 à 50 daN.

Il a été montré que le diamètre de l'embout choisi intervenait peu sur le résultat de la mesure (Valentin 1978) et qu'il était ainsi possible de le faire varier en fonction des gammes de résistances à la pénétration rencontrées. Les résultats ont été exprimés en bar/cm (= daN/cm³).

1.3.2. Protocole

Afin de réduire le facteur hétérogénéité du sol, 50 répétitions ont été réalisées pour l'obtention d'une valeur, celle-ci étant la moyenne des médianes obtenues pour 5 groupes de 10 mesures correspondant à 5 surfaces de 200 cm² environ. Il est à noter en effet, que si la variabilité est importante à l'intérieur de chaque site de 200 cm² (d'où le choix de la médiane) elle est réduite entre les sites (d'où le choix de la moyenne des 5 médianes).

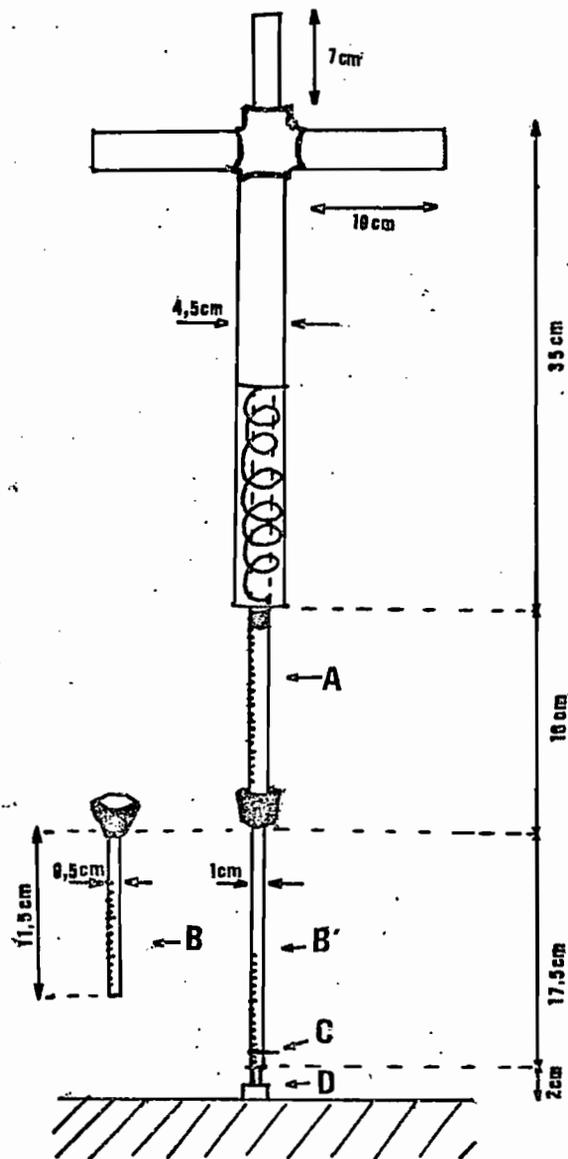
Sur chaque site de 10 mesures pénétrométriques, un échantillon de terre a été prélevé en vue de la détermination de son humidité pondérale (après séchage à l'étuve à 105°C pendant 24 heures). Afin de limiter les risques de dessiccation du fait de l'étanchéité relative des

(1) Notice AR 1031. Labotest : 41 Avenue Bathomé, Paris XV, France. Cette note ne représente en aucune manière une forme de publicité de la part de l'O.R.S.T.O.M.

FIG. N° 1 : SCHEMA DE L'AIGUILLE PROCTOR

(CONSTRUCTEUR : LABOTEST)

- A** : tige dynamométrique graduée en daN
- B et B'** : tiges pénétrométriques
- C** : onglet de limite d'enfoncement
- D** : embout de surface variable



surface des embouts (cm²)

0.30	1.25
0.50	2.50
1.00	3.75
1.50	5.00
2.00	6.25

boîtes de prélèvements et de la durée des transports, les mesures ont été réalisées à l'aide d'une étuve à gaz et d'une balance de précision fonctionnant sur batterie, établies sur les différents camps de terrain.

Ces mesures pénétrométriques ont été menées *in situ* aux différents états hydriques des sols (saison sèche, saison des pluies, humidités à la capacité au champ, à saturation etc....).

Les analyses chimiques (matière organique Walkley et Black) et physiques (granulométries, pourcentage pondéral d'éléments grossiers, humidités aux différents pF, limites d'Atterberg) ont portés sur les différents horizons étudiés et ont été effectuées au Laboratoire d'Analyse des Sols de l'ORSTOM à Abidjan.

1.4. Sols étudiés

11 profils de sols ont été étudiés dans le Nord de la Côte d'Ivoire ; ils appartiennent à des zones récemment cartographiées à 1/200.000 (Lévêque 1980, Poss 1980, Viennot 1980) et ont été jugés représentatifs d'un nombre important de versants. Les trois premiers ont été ouverts sur la toposéquence de Kobo (fig. 2) située à une trentaine de kilomètres au Nord de Katiola et constitué d' :

- un sommet occupé par une butte témoin tabulaire
- une pente forte de raccord (22 %)
- un versant rectiligne, de pente faible (1 - 3.5 %)
- un versant convexo-concave (7%) servant de raccord à : ...
- un bas-fond à section horizontale.

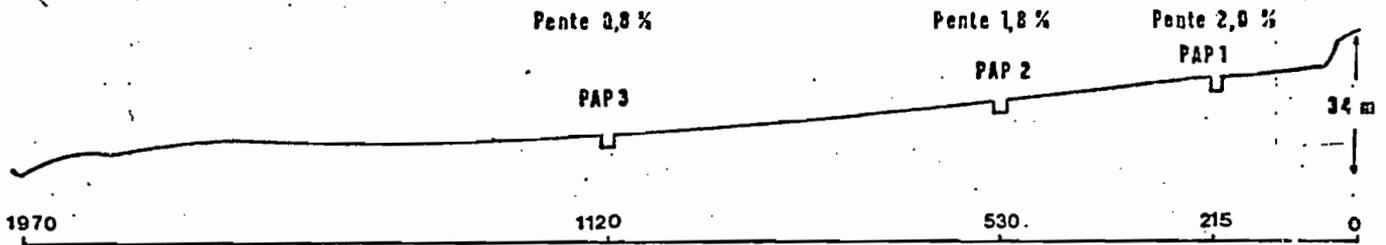
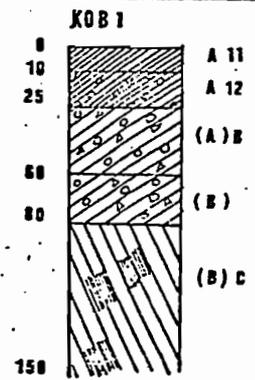
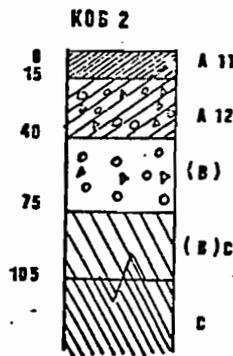
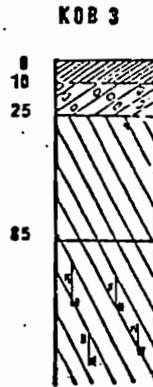
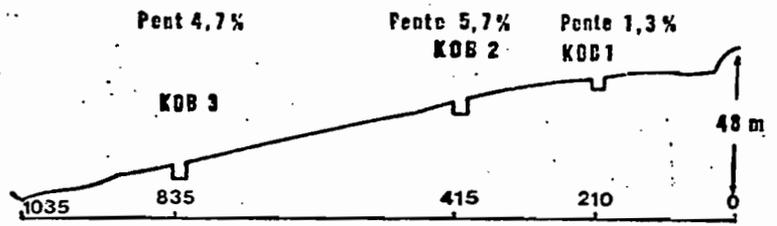
Les 5 profils suivants appartiennent à une toposéquence située nettement plus au Nord, à la frontière avec le Mali, à une vingtaine de kilomètres de Tingréla. Le modelé y est nettement moins marqué, la longueur des interfluves augmentant dans les zones les plus sèches (fig.2). Se succèdent du sommet au marigot :

- un plateau témoin cuirassé à limite nette dominant d'une dizaine de mètres :
- un versant rectiligne de faible pente (0,2-5 %)
- un versant cuirassé convexe de pente également très faible (0-2,5%).

Ces deux toposéquences se sont formées sur des schistes du birrimien.

Les trois derniers sols appartiennent à la région de Touba (Bambadougou au Nord, Guinteguella à l'Est et Soula à l'Ouest) (fig. 3).

KOBO (8° 23' N)



PAPARA (10° 36' N)

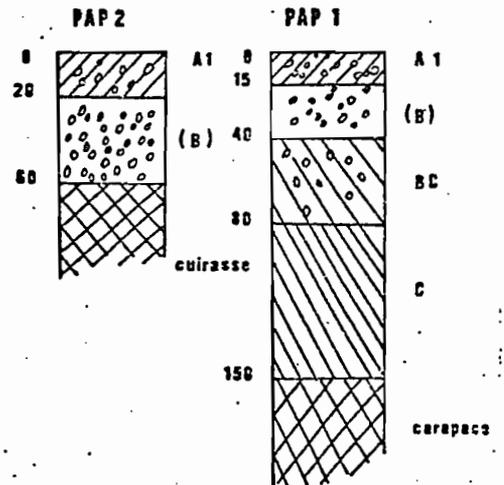
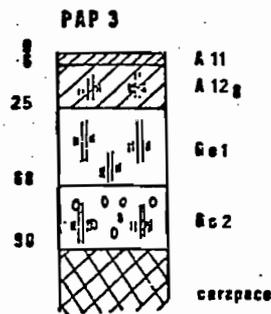


FIGURE N° 2 :

TOPOSEQUENCES ET
SITES EXPERIMENTAUX
DE KATIOLA ET
DE TINGRELA

FIGURE N° 3 : TOPOSEQUENCES ET SITES EXPERIMENTAUX DE TOUBA

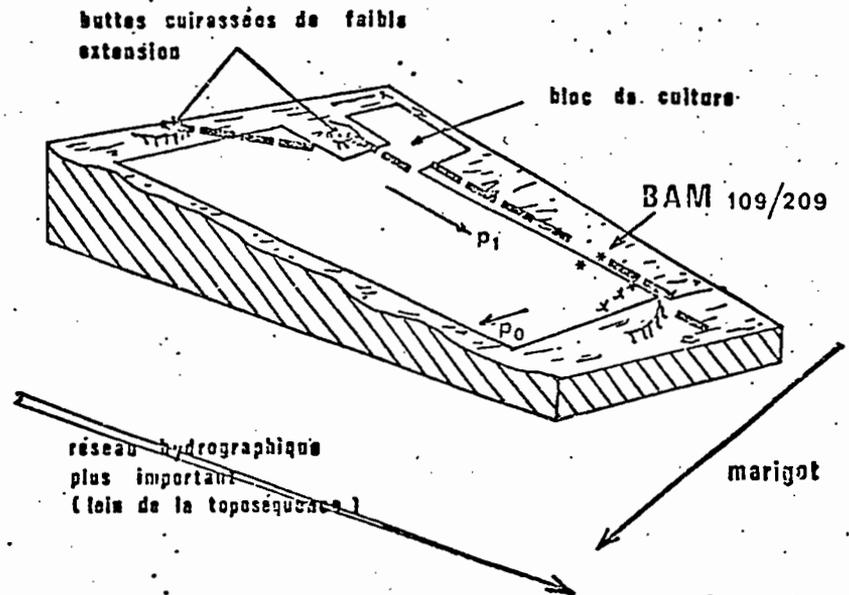
(d'après MONG - GINE 1979)

BAMBADOUGOU

(granite indifférencié)

- Sommet plan (buttes cuirassées partiellement démantelées)
- Haut de versant rectiligne (induré à l'aval)
- Bas de versant concave rectiligne
 - p_1 pente principale
 - p_0 pente très faible

longueur : 1750 m
dénivelée : 45 m

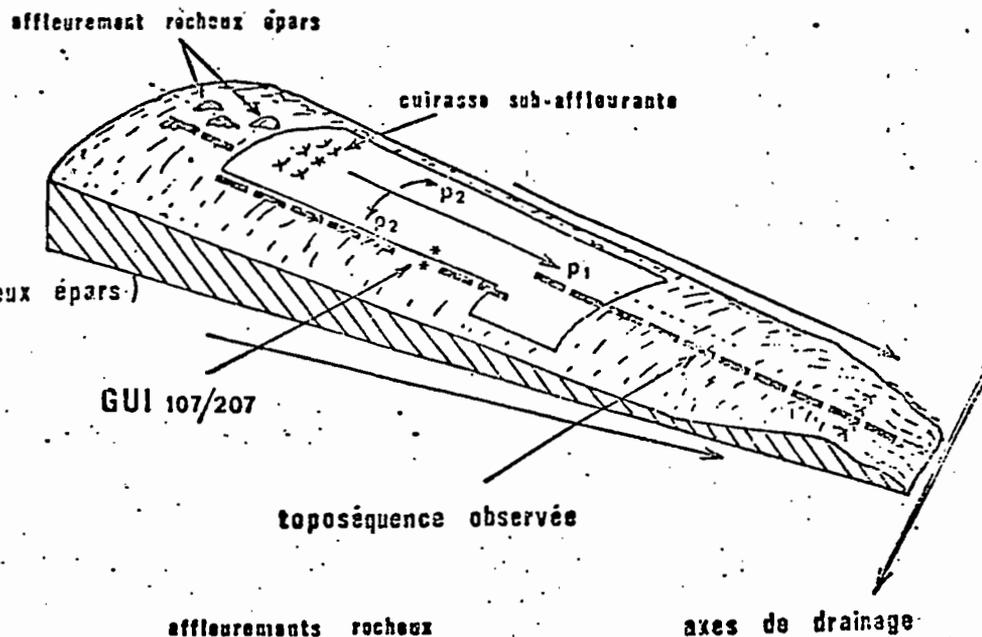


GUINTEGUELA

(granito-gneiss à hypersthène)

- Sommet plan convexe (affleurement rocheux épars)
- Haut de versant convexe
- Bas de versant convexo-concave
 - pentas $p_1 < p_2$

longueur : 2800 m
dénivelée : 60 m

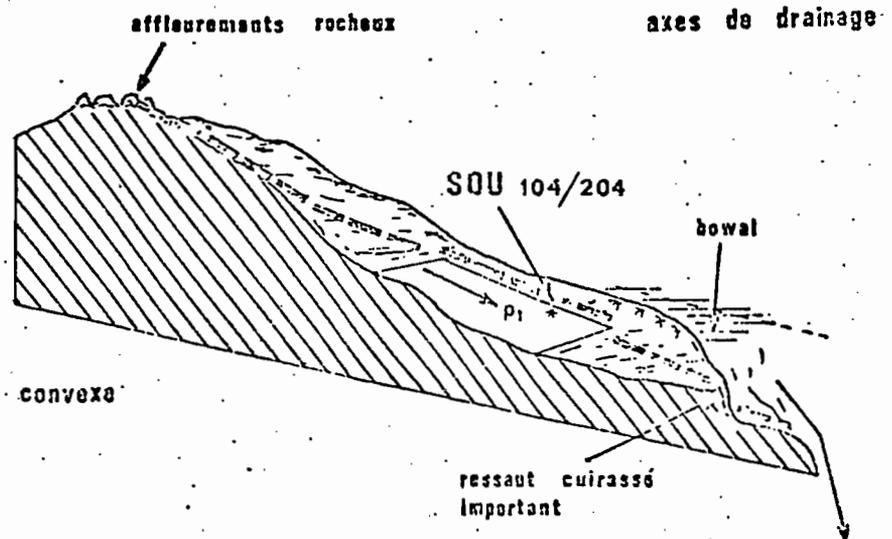


SOULA

(dolérite)

- Sommet convexe rocheux
- Haut de versant convexe puis concave rectiligne
- Bas de versant concave puis rectiligne convexe

longueur : 900 m
dénivelée : 60 m



Le sol étudié à Bambadougou s'est développé sur un granite indifférencié ; il est très peu profond (horizon gravillonnaire apparaissant à 15/20 cm, et suivie d'une cuirasse à 50 cm). Celui de Guintéguéla, sur granito-gneiss à hypersthène, est plus développé : l'horizon gravillonnaire n'apparaît qu'à 30 cm et recouvre un horizon d'altération.

Enfin, le sol de Soula se distingue très nettement des autres et n'est représentatif que d'une très faible fraction des sols du Nord de la Côte d'Ivoire. Il s'agit d'un sol argileux profond (2 mètres) sans éléments grossiers développé sur une roche verte (dolérite). Son étude offre cependant l'intérêt d'élargir la gamme des sols observés ; il est de plus très bien représenté dans d'autres pays de la zone ferrallitique (Madagascar, Bénin etc....).

A ces sols correspondent 37 horizons étudiés qui peuvent se regrouper (après une analyse excessivement sommaire) en 4 grandes classes :

1. Les horizons superficiels plus ou moins gravillonnaires (11)
2. Les horizons sous-jacents non gravillonnaires (2) ("structichron" Chatelin et Martin, 1972)
3. Les horizons gravillonnaires plus ou moins indurés (18)
4. Les horizons contenant une phase importante d'altération (6).

Les résultats d'analyses de ces horizons ayant donné lieu à une étude statistique, il est utile d'indiquer les gammes de variations des caractères étudiés en vue d'éviter tout risque d'extrapolation ultérieure abusive.

Tableau 1 : Gamme de variations des caractères étudiés.

	G	A	M	H	P
Classe 1	0-55.2	6.3-38.0	1.5- 5.8	1.1-38.5	0.3-226.0
Classe 2	0.5- 1.8	40.8-65.0	1.2- 2.9	16.4-49.1	1.7- 33.7
Classe 3	29.1-90.6	14.7-53.5	0.0- 2.2	0.6-27.9	4.3-1484.8
Classe 4	0.0- 6.4	22.6-38.4	0.0- 0.6	5.2-30.2	3.1-506.2

G : teneur pondérale en éléments grossiers (> 2 mm) (%)

A : teneur en argile granulométrique (< 2 μ) (%)

M : teneur en matière organique (%)

H : humidité pondérale lors des tests (%)

P : résistance mécanique à la pénétration (bar/cm)

2. RESULTATS

2.1. Influence de l'humidité

L'influence de l'humidité sur les propriétés mécaniques des sols est un sujet souvent abordé. L'eau joue notamment le rôle de lubrifiant (Faure 1971) lors des essais de compactage (Gballou 1976, de Blic 1978). Les variations de résistances à la pénétration peuvent être considérables lors de la dessiccation des sols sableux et sablo-argileux (Nicou 1975) ; plusieurs auteurs (Gérard 1965, Nicou 1975, Sharma et Agrawal 1978) ont signalé que la prise en masse était d'autant plus accentuée que la dessiccation était lente.

Comme nous venons de le voir, la gamme de résistance à la pénétration est effectivement considérable (0.3-1485 bar/cm). Non seulement les écarts sont importants d'un horizon à un autre, mais ils le sont également pour un même horizon suivant la date des mesures. La force qu'il est nécessaire d'exercer sur une surface d'1 cm² pour obtenir une pénétration de 1 cm peut ainsi être multipliée par 100 lors du passage de l'humidité à la capacité au champ à celle de la saison sèche (13 bar/cm à 1484.8 bar/cm).

Pour chaque horizon, nous avons reporté les variations de la résistance à la pénétration en fonction de l'humidité pondérale ; les courbes obtenues s'ajustent de façon hautement significative (n compris entre 19 et 30, $r > 0.9$) sur des fonctions exponentielles décroissantes $P = a e^{-bH}$ (cf. exemple, fig. n^{os} 4 et 5).

P : résistance mécanique à la pénétration (bar/cm)

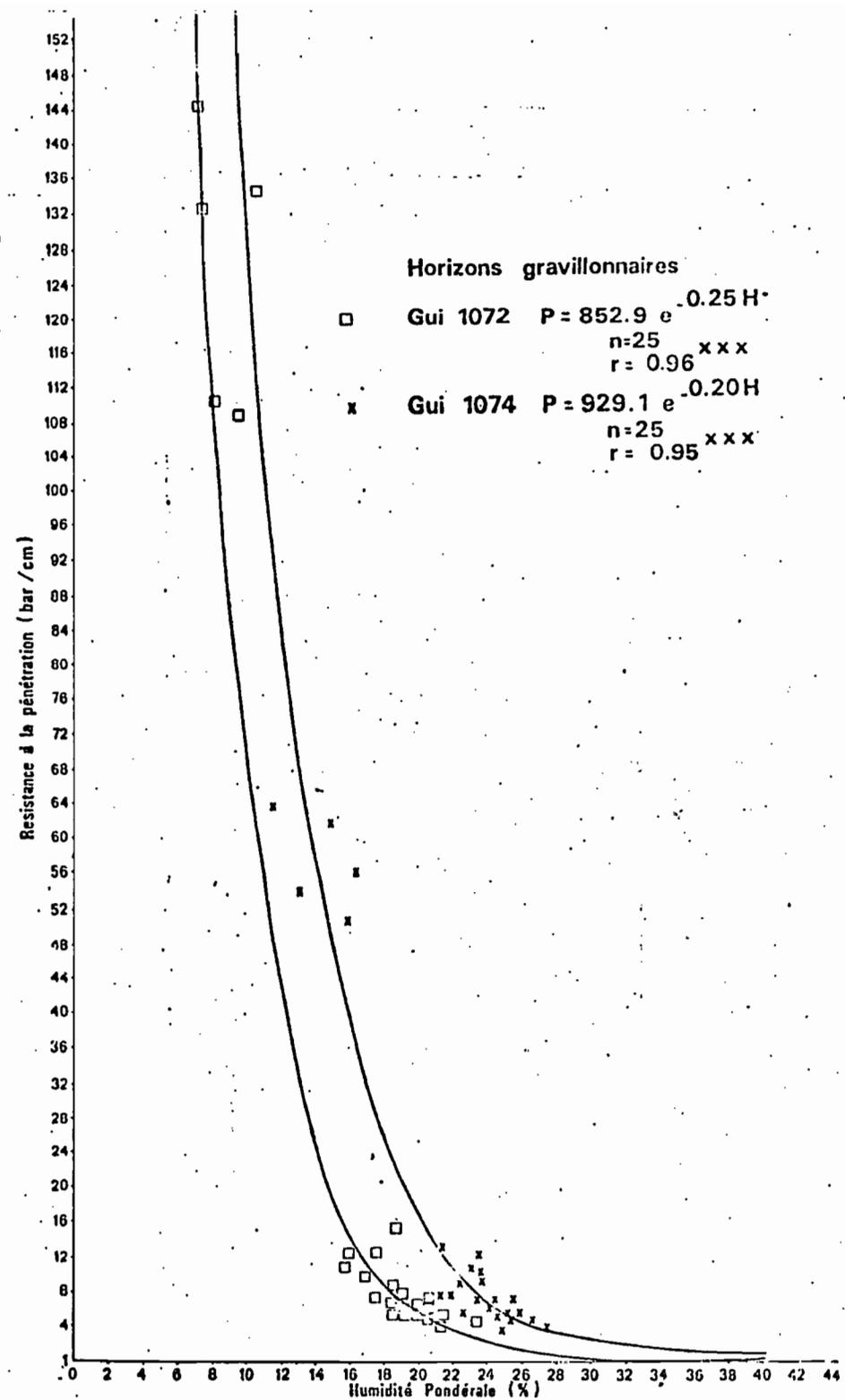
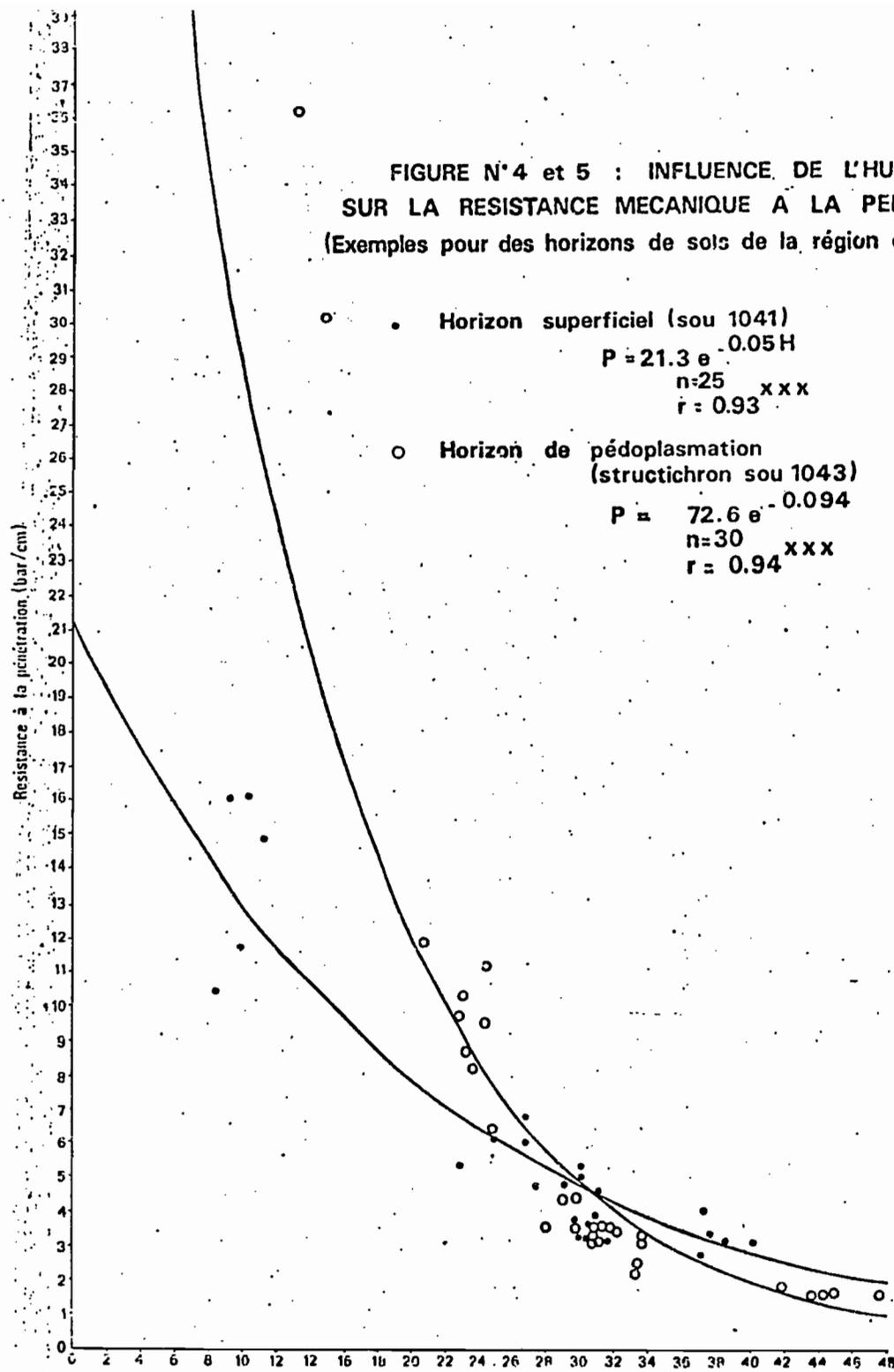
H : humidité pondérale (%)

a : indice de résistance intrinsèque (bar/cm)

b : indice de prise en masse (sans unité) (pente de la droite
Log P = a - bH)

Il est à noter que b reste assez constant (0.10-0.20) quelque soit l'horizon. Ce résultat implique que le classement des horizons en fonction de leur résistance à la pénétration varie peu en fonction du degré d'humidité (les droites Log P = a - bH sont presque parallèles). Ainsi, le paramètre "a" permet à lui seul une comparaison satisfaisante des horizons, indépendante de l'humidité ; pour cette raison nous l'appelons "indice de résistance intrinsèque".

FIGURE N°4 et 5 : INFLUENCE DE L'HUMIDITE
SUR LA RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION
(Exemples pour des horizons de sols de la région de TOUBA)



En conséquence, par un profil donné, le classement des horizons successifs selon leur pénétrabilité que le pédologue établit sur le terrain, reste quasi-constant quelle que soit la saison (fig. N° 5). Quand il s'agit de comparer plusieurs profils entre eux, il est clair que les observations doivent être menées à des états hydriques semblables.

En conséquence, l'estimation que donne le pédologue de la résistance à la pénétration d'un horizon lors de la description d'un profil permet d'établir un classement qui reste correct quelle que soit la saison.

Une condition cependant s'impose : les profils doivent être observés à des degrés hydriques semblables ; cette condition est généralement remplie puisque les travaux de cartographie sont le plus souvent menés au cours de la saison sèche.

2.2. Influence des autres facteurs

2.2.1. Méthode et résultats

Pour un horizon donné, plus de 80% de la variance de la résistance à la pénétration peut être attribuée à son humidité ($\pi^2 > 0.8$). Mais les différences entre horizons ne peuvent pas être imputées uniquement aux écarts d'humidités ; l'importante variabilité des indices de pénétrométrie intrinsèques ($a =$ de 17 à 6032) incite à penser que d'autres caractéristiques de l'horizon interviennent.

Une première approche nous a permis de déceler les facteurs les plus importants à l'aide d'une étude des coefficients de corrélations portant sur un échantillon de 76 individus et 5 variables (logarithme népérien de la résistance mécanique à la pénétration, humidité, taux d'argile, de matière organique et d'éléments grossiers).

La gamme des humidités prises en compte est très large puisque les 76 individus (parmi une population totale de 161 individus) correspondent aux variations intersaisonnières (les 85 autres se situent à l'intérieur de cette gamme, avec des humidités souvent proches de la capacité au champ).

Tableau 2 : Matrice des coefficients de corrélation

	G	A	M	H	P
P	0.4 ***	0.01 NS	- 0.37 ***	- 0.79 ***	1.00
H	- 0.32 **	0.33 **	0.11 NS	1.00	
M	- 0.22 NS	- 0.20 NS	1.00		
A	0.16 NS	1.00			
G	1.00				

G : taux pondéral d'éléments grossiers (%)

A : taux d'argile granulométrique (%)

M : taux de matière organique (%)

H : humidité pondérale (%)

P : logarithme népérien de la résistance à la pénétration

NS : non significatif à 5%

** : significatif à 1%

*** : significatif à 0,1%

La résistance à la pénétration est hautement corrélée avec l'humidité, le taux d'éléments grossiers et celui de la matière organique (tableau 1). Aucune relation ne semble par contre se manifester entre la résistance à la pénétration et le taux d'argile. Ce résultat peut surprendre tous ceux qui connaissent les variations de consistance d'un échantillon d'argile humide mis à sécher à l'air. Mais comme l'a fait remarquer Maertens (1964), l'humidité des horizons dépend de leur teneur en argile, en saison sèche, les horizons les plus argileux sont ceux qui restent les plus humides et, par conséquent, les plus meubles. Pour les sols ferrallitiques étudiés, les deux propriétés de l'argile (tendance à la prise en masse, maintien de l'humidité) se neutraliseraient et masqueraient ainsi l'influence du taux de cette fraction granulométrique sur la résistance à la pénétration. Nous verrons par la suite que la teneur en argile est un facteur important de prise en masse pour des humidités données (saison sèche, capacité au champ).

L'ensemble des valeurs de ces coefficients de corrélation a été soumis à l'analyse en composantes principales, les deux premières de celles-ci expliquant 71% de la variance totale (tableau n° 3).

Tableau 3 : Valeurs propres : contributions et coordonnées dans l'ancien système d'axes.

	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5	
Pourcentage de la variance totale	0.44	0.27	0.15	0.12	0.02	
Pourcentage cumulé de la variance totale	0.44	0.71	0.86	0.98	1.00	
Coordonnées suivant les anciens axes	G	0.42	0.27	0.66	- 0.56	0.19
	A	- 0.05	0.75	0.22	0.58	- 0.23
	M	- 0.32	- 0.47	0.72	- 0.37	0.15
	H	- 0.57	0.38	- 0.02	- 0.25	0.68
	P	0.63	- 0.02	- 0.08	0.38	0.67

Tableau 4 : Vecteurs propres : corrélations entre les nouvelles composantes et les anciennes variables.

		COMPOSANTES PRINCIPALES :				
		Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4	Axe 5
Anciennes variables	G	0.62 NS	0.33 NS	0.58 NS	- 0.43 NS	0.01 NS
	A	- 0.07 NS	0.87 NS	0.19 NS	0.44 NS	- 0.08 NS
	M	- 0.47 NS	- 0.54 NS	0.63 NS	0.28 NS	0.05 NS
	H	- 0.85 NS	0.44 NS	- 0.02 NS	- 0.19 NS	0.24 NS
	P	0.92 NS	0.03 NS	- 0.07 NS	0.29 NS	0.24 NS

La première composante explique 44% de la variance totale. Deux variables y participent avec des contributions très fortes : P (85%) et H (72%), les parts de G (38%) et M (22%) étant plus faibles bien que très hautement significatives. Le premier axe représente donc la résistance à la pénétration liée à une humidité et un taux de matière organique faibles et à une teneur en éléments grossiers élevée. Il est indépendant du taux d'argile.

La deuxième composante ajoute encore 27% d'explication à la variance ; l'argile est prépondérante (76%) trois autres variables y participent à un degré moindre : M (29%), H (19%) et G (11%). Le deuxième

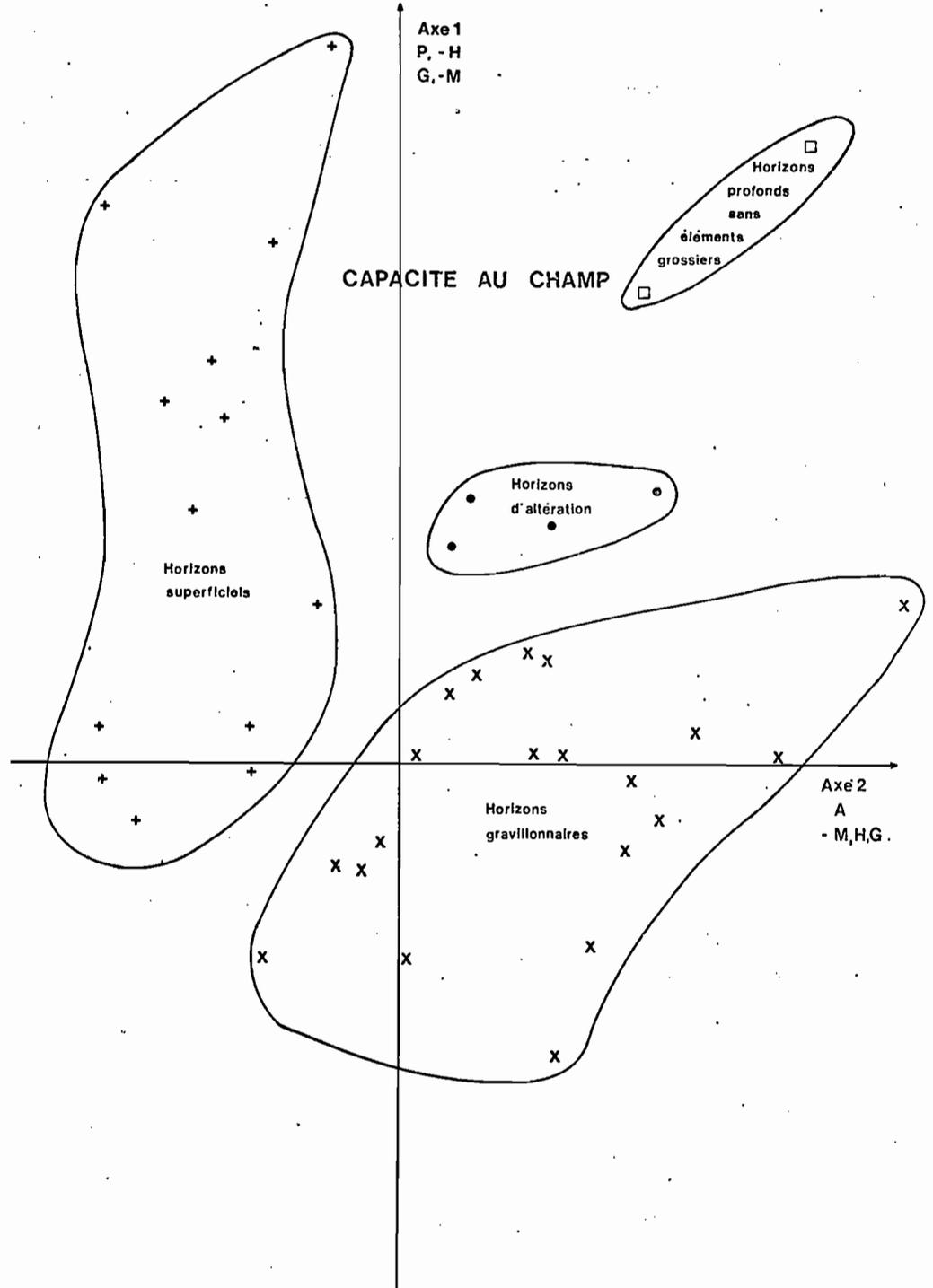
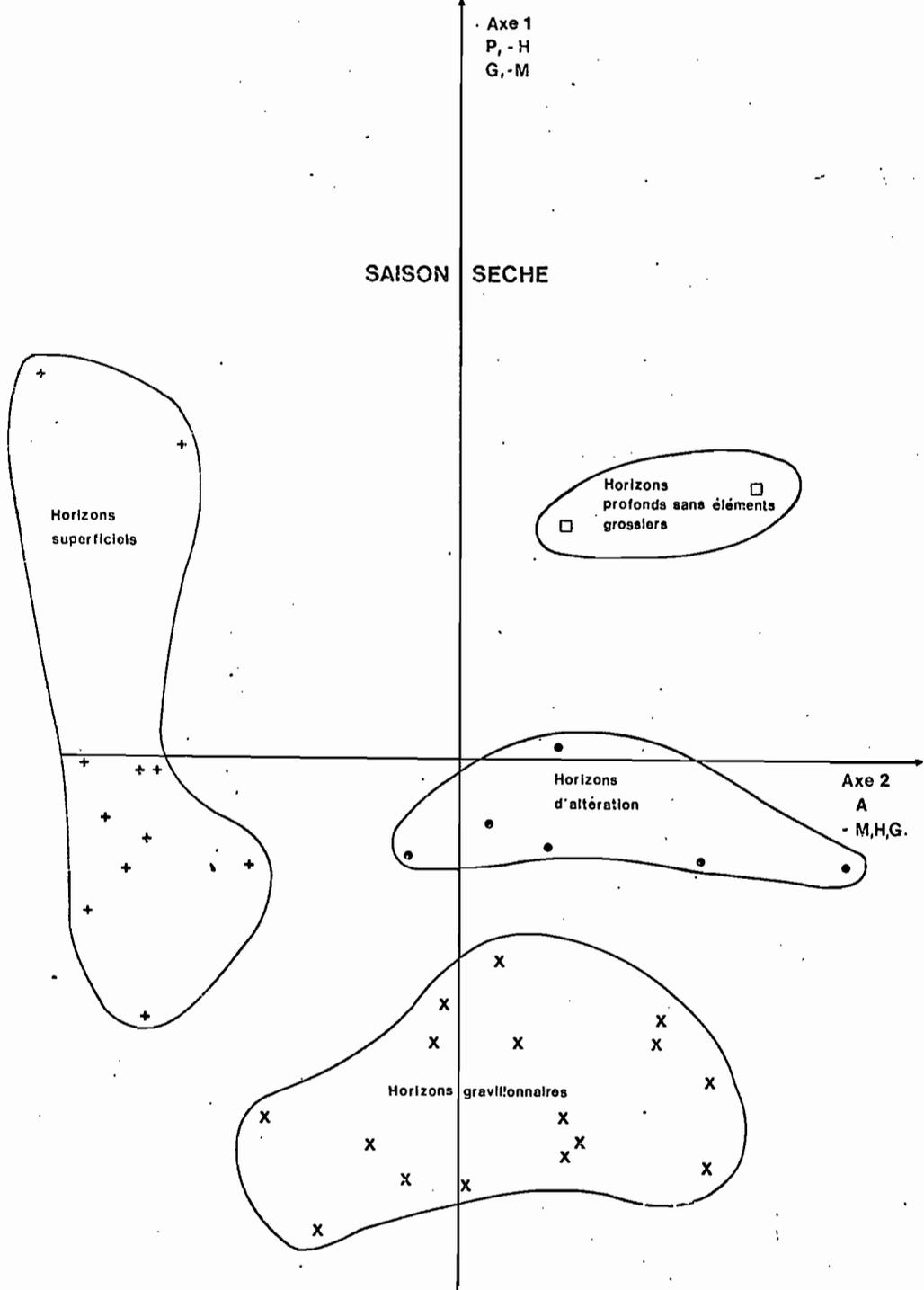


FIG n° 6 et 7 : RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION ET NATURE DES HORIZONS

axe est donc très lié à la teneur en argile et par conséquent indépendant de la résistance à la pénétration.

La troisième composante (15% d'explication en plus) est constituée de G (34%) et de M (40%).

Si l'ensemble des individus (n= 161) sont reportés dans le nouveau système constitué par les deux premiers axes, les quatre grands groupes d'horizons présentés précédemment (tableau n° 1) se distinguent assez bien (fig. N°s 6 et 7). La résistance à la pénétrométrie assure un classement des trois types d'horizons "gravillonnaires" "d'altération" et de "pédoplasation" "(= structichron" - Chatelin et Martin 1972). Par contre le comportement des horizons superficiels est moins typé puisque le nuage de points occupe un intervalle d'ordonnées presque aussi large que celui des trois autres classes d'horizons réunies.

La désignation synthétique des horizons permet par conséquent de prévoir leur comportement vis-à-vis de la pénétration mais une analyse plus fine s'avère cependant nécessaire, surtout pour les horizons superficiels.

L'examen des résultats de l'analyse en composantes principales nous enseigne qu'il n'est pas utile de prendre en compte la teneur en argile dans l'évaluation de la résistance mécanique à la pénétration. Nous nous sommes donc contentés de l'exprimer en fonction de trois variables et avons obtenu :

$$(1) \quad P = 357.9 e - 13.9 H - 38.3 M + 0.7 G$$

avec :

$$n = 76$$

$r = 0.85$, très hautement significatif à 0.1% de probabilité

P : résistance mécanique à la pénétration (bar/cm)

H : humidité pondérale (%)

M : taux de matière organique (%)

G : taux d'éléments grossiers (%)

La relation garde un degré de signification aussi élevée ($r = 0.80$) lorsqu'elle est appliquée à l'ensemble de la population (n = 161).

La relation empirique (1) paraît susceptible d'être utilisée pour prévoir la résistance mécanique des horizons dont les caractéristiques appartiennent aux intervalles de variation de la population étudiée.

2.2.2. Influence de la matière organique

De nombreux auteurs ont attiré l'attention de l'action de la matière organique sur l'ameublissement des sols (Free et al. 1947, Howard et al. 1959, Soane et al. 1972, Manière 1973, cités par Guérif et Faure 1979). Cette action intervient également sur les modules de rupture des pellicules de battance qui peuvent augmenter de 2 à 20 fois après destruction de la matière organique (Hanks 1960). Ce même auteur signale que l'action de l'argile sur la résistance des pellicules est masquée par celle de la matière organique (l'humidité ne serait donc pas la seule variable à contrarier la mise en évidence du rôle de l'argile).

L'enfouissement de matières organiques permet de combattre le phénomène de prise en masse par deux actions successives (Nicou 1975) :

- à court terme, la matière organique libre accroît la porosité à plus long terme, la matière organique liée augmente la mouillabilité des parois porales (Monnier 1954).

Ces différents processus ont été analysés plus en détails par Guérif (1979) qui a mis en évidence, à l'aide du test Proctor, les modifications des propriétés mécaniques de l'argile apportées par les différentes phases de la matière organique.

Les résultats présentés précédemment paraissent donc confirmer ceux d'autres auteurs. Il faut cependant rester prudent : nous n'avons pas mené d'expérimentation mais seulement une étude statistique. Il ne nous est pas permis, par conséquent, de tirer des conclusions concernant l'intérêt de l'enfouissement de matières organiques en vue de l'ameublissement du profil. En outre une corrélation n'est pas explicative : la résistance mécanique à la pénétration est liée au taux de matière organique, mais nous ne pouvons pas affirmer que cette dernière intervient directement. Il est possible de supposer en effet que le taux de matière organique est lié à la pédofaune et que c'est elle qui agit directement sur l'ameublissement des horizons, etc...

Par contre, nous sommes en droit d'utiliser la formule empirique obtenue pour la prévision de la résistance à la pénétration d'horizons dont les caractéristiques appartiendraient aux intervalles correspondant à la population étudiée.

Nous pouvons appliquer, à titre d'exemple, cette formule à quelques cas particulier en vue d'en faciliter l'utilisation. Il semble que si des variables comme les taux de matière organique, d'argile et d'éléments grossiers peuvent être assez bien estimées sur le terrain par le

pédologue sans risque d'erreur trop important, l'évaluation de l'humidité pose davantage de problème et nécessite généralement le recours à des mesures. Ainsi a-t-il paru utile d'établir des relations empiriques à partir de nos données, relations permettant une estimation de deux valeurs caractéristiques d'humidités à partir de variables simples (A, et G). Nous avons choisi l'humidité pondérale à la capacité au champ, (H_{CC}) qui est très critiquable mais encore souvent utilisée par les praticiens, et l'humidité pondérale au point de flétrissement permanent ($H_{4,2}$).

$$(2) \quad H_{CC} = 17.7 - 17 G + 22 A \quad n = 31 \quad r = 0.75 \quad \text{***}$$

100x (%) (%) (%)

$$(3) \quad H_{4,2} = 5.3 - 1.0 G + 35.0 A \quad n = 39 \quad r = 0.85 \quad \text{***}$$

100x (%) (%) (%)

Les deux équations empiriques appellent certaines remarques :

- le taux d'argile intervient sur les teneurs en eau, particulièrement en conditions sèches, d'où son action complexe déjà mentionnée sur la résistance à la pénétration. Le taux d'éléments grossiers intervient peu sur l'humidité pondérale au point de flétrissement permanent.
- malgré le nombre plus important d'individus, le coefficient de corrélation est plus élevé pour (3) que pour (2). Ceci est probablement à mettre au compte de la précision des mesures, meilleure dans le cas de la détermination de l'humidité à pF 4,2 que dans celui de la mesure de la capacité au champ.

L'utilisation des relations (1) (2) et (3) permet ainsi d'opérer une estimation des résistances à la pénétration aux deux état hydriques indiqués.

L'humidité mesurée lors de la saison sèche dépend davantage des caractéristiques granulométriques de la terre fine que de la teneur en gravillons (relation 3) ; celle-ci intervient par contre considérablement sur les valeurs de résistance à la pénétration.

A la capacité au champ, les gravillons confèrent à l'horizon, une certaine armature qui accroît non seulement sa résistance à la pénétration, mais également sa résistance au tassement. Ainsi un horizon dépourvu d'éléments grossiers subira plus facilement certains effets néfastes de la mise en culture mécanisée (semelle de labour, compactage) qu'un horizon gravillonnaire (Valentin et Mong-Gine, 1979).

3. DISCUSSION ET APPLICATION

3.1. Croissance racinaire

Il est tentant d'appliquer les résultats de mesures pénétrométriques aux problèmes de croissance racinaire. De nombreux auteurs ont en effet tenté de relier les valeurs de résistance à la pénétration aux longueurs ou aux poids racinaires voire aux rendements de différentes cultures. La plupart ont travaillé dans des conditions de laboratoire ; aucun à notre connaissance, n'a fait porter les essais sur des échantillons contenant des éléments grossiers. Dans ce cas précis, il semblerait qu'à priori la comparaison du comportement mécanique d'une racine en croissance avec celui d'une tige rigide soit périlleuse....

Ceci étant, des relations ont été établies entre la densité racinaire (estimée en g. de matière sèche par litre) et la résistance à la pénétration mesurée à la capacité au champ. Cette densité racinaire décroît exponentiellement en fonction de la profondeur pour les profils étudiés, nous avons donc cherché à établir des comparaisons pour des horizons pédologiques de profondeurs semblables. Ainsi, pour les horizons supérieurs, nous avons obtenus :

$$R = 7.00 - 2.05 \text{ Log } P_{cc} \quad n = 11 \quad r = 0.70 \quad \text{***}$$

R : densité racinaire (g de matière sèche/litre de sol)

Log P_{cc} : logarithme népérien de la résistance à la pénétration mesurée à la capacité au champ.

et pour les horizons sous-jacents (le plus souvent 20-45 cm) :

$$R = 4.12 - 1.16 \text{ Log } P_{cc} \quad n = 10 \quad r = 0.91 \quad \text{***}$$

Ces relations sont intéressantes dans la mesure où elles permettent d'évaluer, à la capacité au champ, les limites de résistance à la pénétration pour lesquelles le système racinaire de la végétation herbacée de savane ne se développe pas à 30.7 bar/cm pour les horizons superficiels, 35 bar/cm pour les horizons sous-jacents. Ces valeurs limites sont donc très voisines pour les deux types d'horizons et proches de celles présentées par d'autres auteurs : ainsi Taylor et Burnett (1964) travaillant sur diverses plantes cultivées (coton, sésame, sorgho, ...) proposent une limite à 25-30 bars, mesurés également à la capacité au champ ; les plantes étudiées ne manifesteraient pas de différence à cet égard. Mais comme nous le signalions précédemment, ces valeurs ne sont guère en fait comparables avec les nôtres en raison de la différence d'appareil utilisé (les résultats sont exprimés ici en

pression et non en pression/profondeur d'enfoncement). Cette remarque s'applique également aux travaux de Camp et Lund (1968) sur le coton (P limite = 27 bars), et à ceux de Carter et Tavernetti (1968) mené également sur le coton (rendement nul pour $P = 44$ bar).

Une confusion supplémentaire doit être évitée lors de la comparaison de ces travaux qui portent tantôt sur l'élongation racinaire de plantes âgées tantôt sur la levée des semences (Stout, Buchele et Snyder 1961, Smittle et Williamson 1977). Russell (1973) considère par exemple qu'il est nécessaire de distinguer les plantes à grosses graines susceptibles de supporter des pressions élevées (5-10 bars) des céréales qui seraient beaucoup plus sensibles. (Barley (1963) propose une limite de 0.6 bar pour le maïs). En reportant nos valeurs limites (30-35 bars/cm) valeurs dans les relations (1) et (2), il apparaît que pour les horizons non gravillonnaires du Nord de la Côte d'Ivoire, il n'existerait, en conditions naturelles, aucune contrainte pénétrométrique, les résistances se maintenant pour les humidités de capacités au champ à des niveaux inférieurs à ces limites. Pour les horizons gravillonnaires, la tolérance du taux de gravillons dépendrait des teneurs en argile : ainsi les racines supporteraient des pourcentages de gravillons élevés, plus facilement dans le cas d'horizons argileux que dans celui d'horizons plus sableux. Un tel résultat rejoindrait assez bien celui obtenu par Gras (1972) concernant les possibilités d'alimentation en eau (mais cet auteur a travaillé sur des échantillons très différents). A titre d'exemple, les valeurs pénétrométriques limites à l'enracinement correspondraient, pour le milieu étudié, à des teneurs pondérales en éléments grossiers de 40% pour un taux d'argile de 20%, et de 84% d'éléments grossiers pour des teneurs en argile de 60%.

De tels résultats doivent être utilisés cependant avec précautions : si les données pénétrométriques peuvent être extrapolées assez aisément, il n'en est pas de même pour les densités racinaires qui résultent d'un nombre très élevé de facteurs (climat et type de végétation dont la variabilité est bien plus grande, dans le Nord de la Côte d'Ivoire, que celle des sols, etc.... La corrélation de plus n'est pas explicative : est-ce réellement la résistance à la pénétration qui intervient sur le développement racinaire à d'autres facteurs qui y sont liés (teneur en oxygène - Maertens 1964 ; en nitrates Vomocil et Flocker 1961 ; Whisler et al. 1965, Valentin 1978). Il paraîtrait donc hasardeux d'étendre les résultats obtenus à partir d'une dizaine de profils à l'ensemble de la zone ; les risques d'erreur seraient encore plus graves si ces résultats étaient appliqués à l'étude de l'enracinement des cultures.

Il semble exister une relation satisfaisante entre la résistance à la pénétration, la densité racinaire et le rendement du coton (Philipps et Don Kirkham 1962, Carter et Tavernetti 1968). Pour le maïs et les plantes de prairies temporaires, le problème est plus complexe : l'enracinement superficiel pourra être très important si l'horizon sous-jacent est compact. Si les propriétés physiques du profil permettent une exploitation plus profonde, la densité racinaire sera éventuellement plus faible que dans le cas précédent (effet de compensation - Maertens et Studer 1963).

3.2. Utilisation d'engins lourds

Les agronomes connaissent bien le problème posé par la gamme d'humidité souvent réduite pour laquelle la qualité du travail du sol sera optimale (Héning, Gras et Monnier 1969). De nombreuses composantes interviennent pour réduire cet intervalle de temps pendant lequel il est souhaitable d'intervenir sur les parcelles. L'une d'entre elles est constituée par les risques d'enfoncement en conditions trop humides. Ainsi en conditions ivoiriennes, Gremillet (1976) a relevé des empreintes prononcées des zones de tracteur (7-15 cm suivant la charge).

Nos résultats devraient permettre d'estimer ces profondeurs d'enfoncement d'engins lourds en fonction des variables retenues : type de sol, humidité, taux de matière organique et de gravillons. Nous illustrerons cette possibilité d'application par un exemple précis, celui d'un tracteur de 2490 kg dont les roues antérieures ont un rayon r de 35 cm et une largeur l de pneus de 20 cm. A la différence de la tige métallique, la surface d'enfoncement cette fois-ci varie avec la profondeur maximale atteinte par la roue. Le volume théorique enfoncé par une roue non sujette à l'aplatissement est :

$$V = \left[\text{Arcsin} \left(\frac{\sqrt{h(2r-h)}}{r} \right) \cdot r^2 - \sqrt{h(2r-h)} (r-h) \right] \cdot \lambda$$

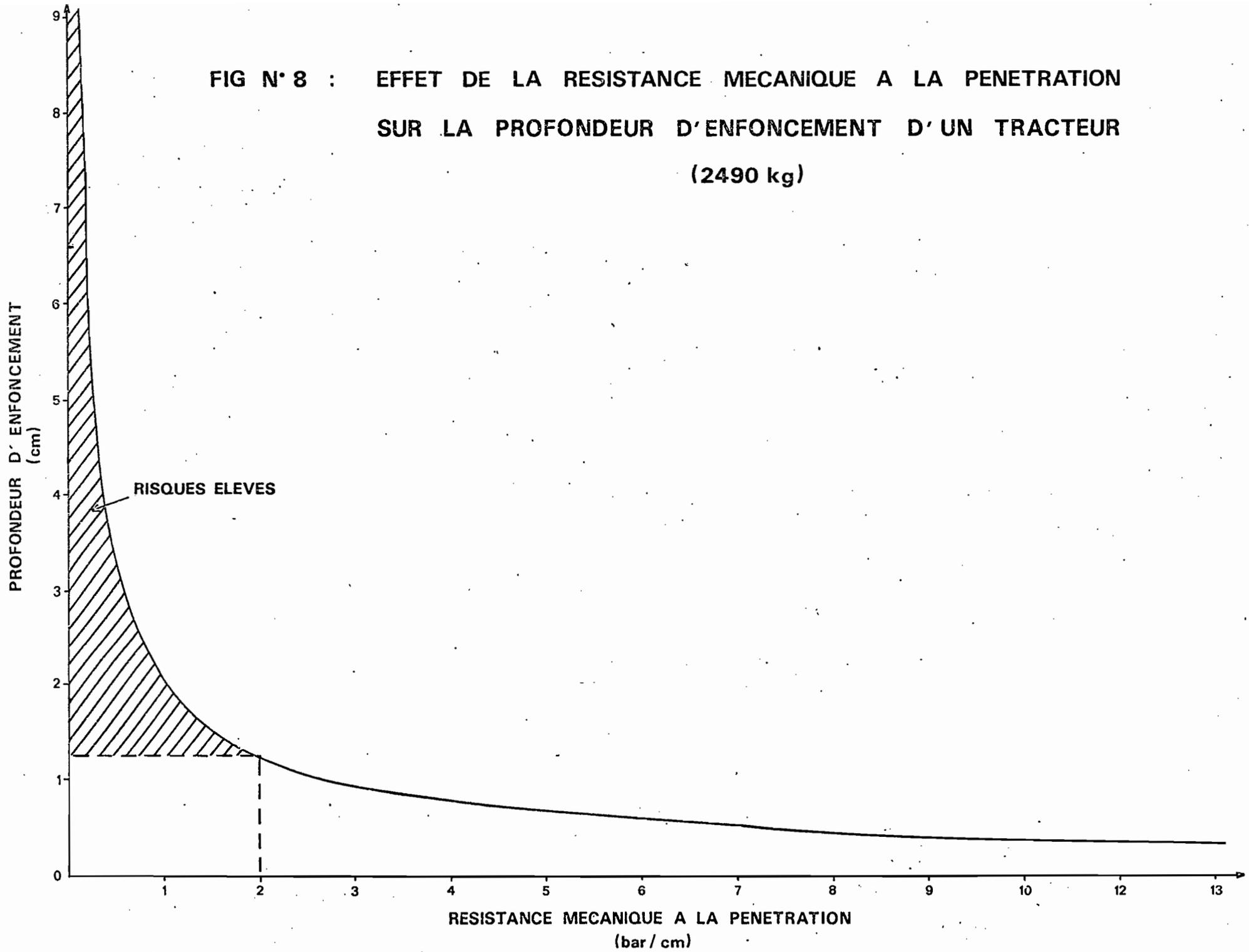
(cm³)

r étant le rayon de la roue (cm), h la profondeur maximale atteinte (cm), λ la largeur du pneu (cm), et l'angle étant exprimé en radian.

Or, $P = \frac{F}{V}$, F étant la charge supportée par une roue.

Il est donc possible d'évaluer h en fonction de la résistance pénétrométrique du sol, pour un engin donné (fig. n° 8).

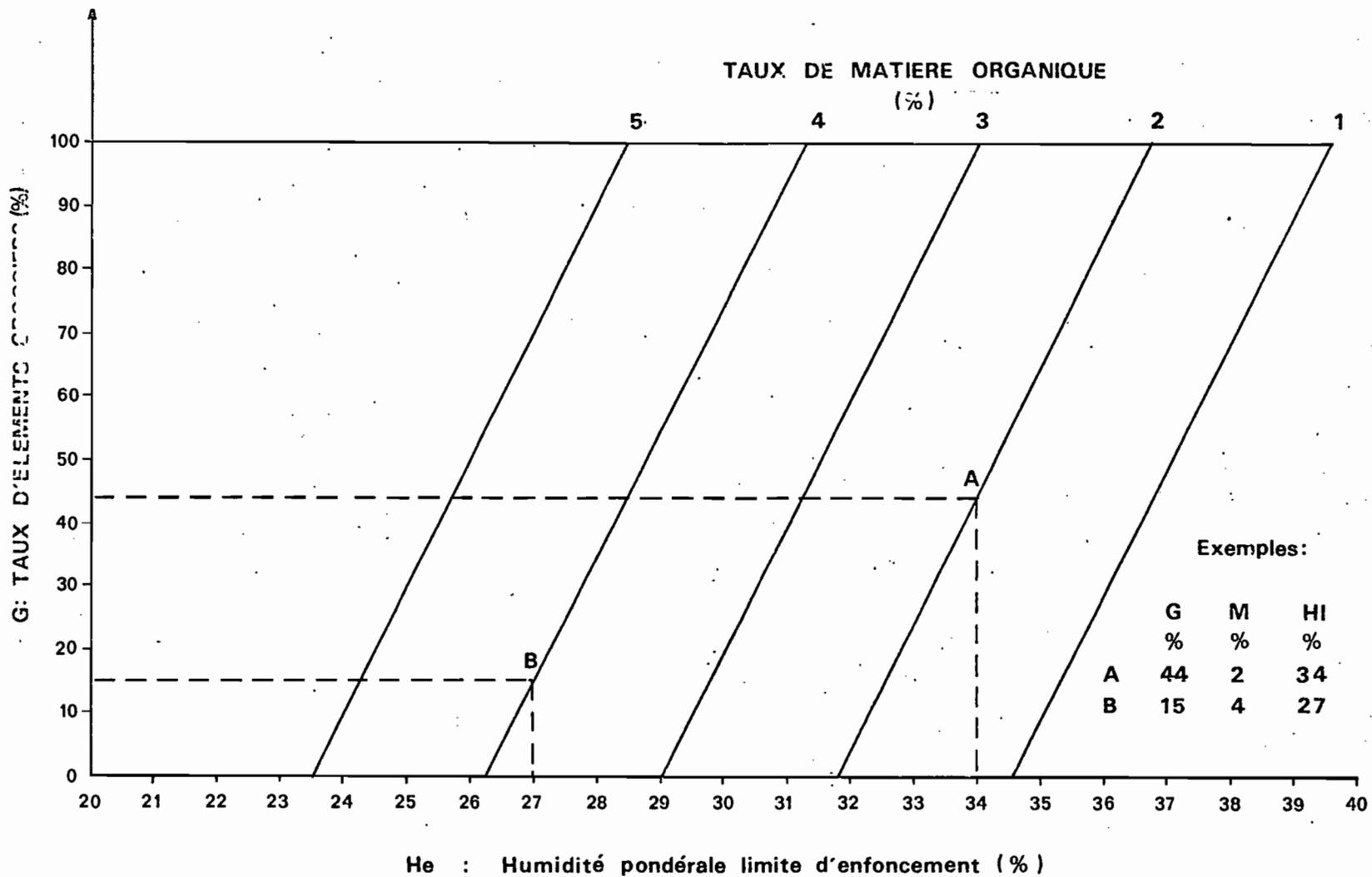
**FIG N° 8 : EFFET DE LA RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION
SUR LA PROFONDEUR D'ENFONCEMENT D'UN TRACTEUR
(2490 kg)**



La profondeur ainsi déterminée est bien sûr sous-évaluée du fait de l'affouillement des roues provoqué par leur rotation. Nous remarquerons cependant que les risques d'enfoncement augmentent considérablement pour les valeurs de P inférieures à 2 (la fonction $h = f(P)$ s'ajuste sur $h = \frac{1.96}{p^{0.66}}$). Il apparaît que les risques augmentent avec l'élévation du taux d'humidité (et donc avec les taux d'argile) et les teneurs en matière organique (fig. N° 9). Ces résultats s'appliquent aux sols non travaillés ("zéro-tillage") ; il semblerait néanmoins que pour les humidités élevées (voisines de l'humidité à la capacité au champ) les résistances à la pénétration soient comparable pour les sols "naturels" et pour les sols non travaillés depuis un an (ces résultats obtenus sur trois couples de sols de la région de Touba ne doivent pas être extrapolés abusivement). Nous émettrons cependant certaines remarques :

- pour les sols les plus sableux et les plus gravillonnaires, les risques d'enfoncement sont les moins importants ;
- pour la plupart des sols étudiés, il semble préférable d'attendre que l'humidité ait atteint un niveau plus bas que la capacité au champ (Mohd et Kemper 1979). Au lieu d'intervenir 48 heures après une grosse pluie, il serait plus souhaitable d'attendre 4 ou 5 jours supplémentaires suivant les sols, pour atteindre une humidité égale aux 9 dixièmes de la capacité au champ (Hassan et Broughton 1974). Des conditions d'humidités défavorables (correspondant à notre avis à $P = 2$ bar/cm) entraînent des risques élevés (Hutter 1966) non seulement pour les façons superficielles, surtout lorsque les passages sont répétés mais encore pour le labour : les roues du tracteur peuvent alors affecter de la moitié à la totalité de la surface travaillée (Manichon et Sebillotte 1975). En outre, dans ces conditions, les temps de travaux et les efforts de tractions se trouvent augmentés, (Manichon et Sebillotte 1969, Gremillet 1976) ;
- il existe en science du sol toute une série de tests permettant de préciser les humidités à partir desquelles un sol adhère aux pièces travaillantes, devient plastique ou liquide (limites d'Atterberg). Plus la gamme de ces humidités est étendue, plus le sol est facile à travailler. Une étude détaillée de ces caractéristiques a été menée récemment (de Blic 1978) dans le Centre de la Côte d'Ivoire et a montré que pour les sols sablo-argileux développés sur granite, c'est l'état sec qui offre les meilleures possibilités d'intervention ; les différentes limites d'Atterberg très groupées près de la capacité au champ indiquent en effet des risques importants de gâchage en conditions plus humides. Ces conclusions devraient être nuancées par nos résultats sur la

FIG N° 9 : INFLUENCE DES TAUX D'ELEMENTS GROSSIERS ET DE MATIERE ORGANIQUE SUR L'HUMIDITE LIMITE D'ENFONCEMENT D'ENGINS LOURDS (P=2 bar/cm)



résistance à la pénétration en conditions sèches. Si l'on considère en effet que la résistance au cisaillement est étroitement corrélée avec la résistance à la pénétration (Taylor et Burnett 1964, Yokoi 1968), l'énergie et le temps nécessaire aux travaux devraient être supérieurs en conditions sèches à ceux menés en conditions de sol ressuyé (humidité comprise entre la capacité au champ et la limite de plasticité). (Boteman et *al.* 1976).

Les sols issus de schistes pourront par contre être travaillés plus facilement en conditions humides (mais en-dessous cependant de la capacité au champ).

- Cette étude peut prêter à confusion : il ne faut pas confondre en effet résistance mécanique à la pénétration et sensibilité au tassement. Pour des humidités croissantes, il existe un seuil (optimum proctor) au-dessus duquel le matériau étudié en laboratoire n'est plus compactable, alors que sa résistance à la pénétration continue à baisser. Ainsi, une même profondeur d'enfoncement de roues de tracteurs peut avoir des conséquences différentes suivant la composition granulométrique de la terre travaillée : elle peut indiquer un tassement grave pour un sol sablo-argileux, bénin pour un sol argileux (Faure et Fiès 1972).

- Le praticien est rarement à même de déterminer l'humidité de ses parcelles, il dispose encore plus rarement de données de laboratoire : (limites d'Atterberg, essais proctor), ou même de terrain (mesures pénétrométriques). Or comme nous venons de le voir, les résultats de ces différents tests peuvent être contradictoires suivant le paramètre particulier étudié (sensibilité au compactage, résistance à la pénétration, limites de plasticités, de liquidités etc...). Il lui appartient donc le plus souvent de prendre ses décisions en fonction de son expérience et doit pour cela être en mesure d'émettre un jugement sur la qualité du travail du sol réalisé en fonction de la hauteur de pluie précédente, du temps de ressuyage ; l'examen du profil cultural (Hénin, Gras et Monnier 1969) reste probablement la technique la plus fiable pour l'établissement d'une politique satisfaisante en matière de travail du sol.

CONCLUSION

La méthodologie suivie au cours de cette étude présente un certain nombre d'intérêts. Elle nous a permis tout d'abord de montrer que le classement établi par le pédologue sur le terrain entre les différents horizons selon leur aptitude à la pénétration reste valable quelle que soit la saison : un horizon de pédoplasation ("structichron" Chatelin et Martin 1972). C'est à dire le B ferrallitique restera par exemple toujours plus "pénétrable" que l'horizon d'altération sous-jacent. A la suite de nombreux auteurs (Freitag 1968, Hénin et *al.* 1969, Audry et *al.* 1973, Nicou 1975, Wells et Treeswan 1978,...) nous constatons en outre que ces tests pénétrométriques sont d'un emploi aisé et permettent des comparaisons d'autant plus faciles que l'on s'attache à l'étude de variables bien déterminées (élongation racinaire mesurée en pots, levée de semences etc...).

Nous avons pu ensuite établir une relation empirique qui permet d'évaluer l'importance relative du rôle joué par certaines caractéristiques du sol (humidité, matière organique, éléments grossiers) et d'ouvrir ainsi la voie d'analyses plus fines.

Mais, comme le remarquent Kheyrabi et Monnier (1968), de telles études statistiques ne permettent pas d'approfondir directement l'étude des mécanismes intervenant sur l'objet étudié. Citons l'exemple de la matière organique qui n'est caractérisée que d'une manière "aveugle" comme le souligne Guerif (1979) par son taux de carbone. Or il serait probablement plus fructueux d'analyser les différents mécanismes de son intervention sur la résistance mécanique à la pénétration en s'attachant à l'examen détaillé de ses relations avec le squelette, son degré d'évolution, ses propriétés physico-chimiques etc...

Une telle approche nous prive également de la possibilité d'extension des résultats aux propriétés voisines (sensibilité au compactage, résistance à l'élongation racinaire etc...) non seulement du fait de son caractère statistique (et peu naturaliste) mais en raison également des problèmes posés par la diversité des techniques utilisées, des paramètres pris en compte et des échelles de mesures (la pointe d'un pénétromètre n'a que très rarement les dimensions d'une radicelle ou d'un soc de charrue...).

Il semblerait par conséquent que les recherches dans ce domaine devraient s'orienter, ou bien vers une analyse fine des multiples paramètres intervenant sur la cohésion des sols comme les relations matière organique-fer-plasma-squelette, les vitesses de dessiccation etc... ou bien vers des enquêtes nombreuses sur le terrain visant à mieux relier les caractères morphologiques (profils cultural ou/et pédologique) à un comportement donné (compactage, enracinement etc...).

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à exprimer sa gratitude envers M. Noirot pour l'aide considérable accordée lors du traitement statistique des données ainsi que MM. Lévêque et Collinet pour les corrections apportées au manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

ARNDT, W. 1965 - The nature of the mechanical impedance to seedlings by soil surface seals.

Aust. J. Soil Res. 3 : 44-54, 4 fig., 6 phot., 33 réf.

ATTERBERG, S. 1912 - Die Konsistenz und die Bündigkeit der Boden.

Intern. Mitt. Bodenkunde, 2 : 149-189.

AUDRY, P., COMBEAU A., HUMBEL, F.X., ROOSE, E. et VIZIER, J.F. 1973 - Essai sur les études et dynamique actuelle des sols.

ORSTOM, Paris, 126p., + annexes.

BARLEY, K.P. 1963 - Influence of soil strength on growth of roots.

Soil Sc. 96 : 175-180.

BATEMAN, H.P., NAIS, M.P. and YOERGER, R.R. 1965 - Energy required to pulverize soil at difference degrees of compaction.

Journ. Agric. Engr. Res. 10 : 132-144.

BLIC (de) P., 1978 - Morphologie et comportement mécanique des sols de la région Centre en culture mécanisée.

ORSTOM/AVB, Abidjan, multigr., 63p., 9 réf.

CAMP, C.R. and LUND, Z.F. 1968 - Effect of mechanical impedance on cotton root growth.

Tr. of The A.S.A.E. 11 (2) : 188-190.

CARTER, L.M. and TAVERNETTI, J.R. 1968 - Influence of precision tillage and soil compaction on cotton yields.

Tr. of the A.S.A.E. 11 (1) : 65-67, 73.

CHATELIN, Y. et MARTIN, D. 1972 - Recherche d'une terminologie typologique applicable aux sols ferrallitiques.

Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 10 (1) : 25-43.

FAURE, A. 1971 - Contribution à l'étude du mécanisme du compactage des sols. Notion de potentiel de lubrification.

Ann. Agron. 1971, 22 (5) : 487-513, 7 fig., 5 tabl., 2 réf.

- FAURE, A. et FIES, J.C. 1972 - Etude expérimentale de la sensibilité au compactage de matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique.
Ann. Agron. 23 (3) : 317-332, 7 fig., 3 tabl., 7 réf.
- FREITAG, 1968 - Penetration test for soil measurements.
Tr. of the A.S.A.E. 11 (6) : 751-753.
- GABRILIDES, S.T. and ALEXIADIS, C.A. 1963 - Some measurements with a simple soil penetrometer.
J. Agric. Eng. Res. 8 : 262-266.
- GBALLOU, Y. 1976 - Mesure de la sensibilité des sols au tassement en fonction de leur humidité. Recherche d'une méthode permettant d'opérer sur de petits échantillons de terre tamisée. Application à la comparaison de quelques matériaux différents.
(D.E.A. de Pédologie et Aménagement des Sols) - PARIS VII, 28p.
- GERARD, C.J. 1965 - The influence of soil moisture soil texture, drying conditions and exchangeable cations on soil strength.
Soil Sc. Soc. Am. Proc. 29 (6) : 641-644.
- GRAS, R. 1972 - Effets des éléments grossiers sur la dynamique de l'eau dans un sol sableux. III. Dynamique de l'eau dans le système terre fine/éléments, variations négatives d'humidités.
Ann. Agron. Vol. 23 (4).
- GREMILLET, B. 1976 - Défrichage et mise en culture des sols en milieu tropical de Côte d'Ivoire.
IRAT/SODERIZ, Bouaké, multigr., 67p.
- GUERIF, J. 1979 - Rôle de la matière organique sur le comportement d'un sol au compactage. II. Matières organiques libres et liées.
Ann. Agron. 30 (6) : 469-480, 3 fig., 5 tabl., 10 réf.
- HANKS, R.J. 1960 - Soil crusting and seedling emergence.
7th Int. Cong. Soil. Sci., Madison, Wisc., USA : 340-346.
- HASSAN, A.E. and BROUGHTON, R.S. 1975 - Soil moisture criteria for tractability.
Canadian Agric. Eng. 17 (2) : 124-129.
- HENDRICK, J.G. 1969 - Recording soil penetrometer.
J. Agric. Eng. Res. 14 (2) : 183-186.

- HENIN, S. 1936 - Quelques résultats obtenus dans l'étude des sols à l'aide de la sonde dynamométrique de Demolon-Hénin.
Recherches sur le sol 5 (1).
- HENIN, S., GRAS, R. et MONNIER, G. 1969 - Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques.
Masson ed., Paris, 332p.
- HENIN, S. 1976 - Cours de physique du sol. Tome I,
ORSTOM, Paris et Editest, Bruxelles, 159p.
- HUMBEL, F.X. 1974 - La compacité des sols ferrallitiques du Cameroun : une zonalité dans le milieu en relation avec la dessiccation saisonnière.
Cah. ORSTOM, sér. Pédol., 12 (1) : 73-101, 12 fig., 3 tabl., 17 réf.
- HUTTER, W. 1966 - Action des compressions sur la structure d'un sol.
Ann. Agron. 17 (1) : 37-52, 6 fig., 2 tabl., 4 réf.
- KEZDI, A. 1974 - Handbook of soil mechanics. Vol. I.
Elsevier edit., Amsterdam, 294p.
- KHALID, M. and SMITH, J.L. 1978 - Control of furrow infiltration by compaction.
Tr. of the A.S.A.E. 21 (4) : 654-657.
- KHEYRABI, D. et G. MONNIER 1968 - Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale.
Ann. Agron. 19 (2) : 129-152.
- LAMBE, T.W. 1965 - Soil testing for Engineers.
The MIT edit., New York, 165p.
- LEVEQUE, A. 1980 - Etude pédologique et des ressources en sols de l'horizon du Nord du 10e parallèle en Côte d'Ivoire. Carte des unités et des paysages morpho-pédologiques. Partie ivoirienne des feuilles de Niellé, Tingrela et de Tienko à 1/200.000.
ORSTOM/BNEDT, Abidjan, 118p.
- MAERTENS, C. et STUDER, 1963 - Influence des propriétés physiques des sols sur le développement des systèmes racinaires de différentes cultures ; répercussions sur le rendement.
C.R. Acad. Sci. 256 : 2016-2018.

- MAERTENS, C. 1964 - La résistance des sols à la pénétration ; ses facteurs et son influence sur l'enracinement.
Ann. Agron. 15 (5) : 539-554, 9 fig., 5 tabl., 7 réf.
- MALCOLM, C.V. 1964 - A penetrometer for detecting soil compaction problems.
Aust. J. of Experim. Agric. and Animal Husbandry, 4 : 189-190.
- MANICHON, H. et SEBILLOTTE, 1969 - Un exemple de détermination de références techniques : les temps de travaux. Contribution à un meilleur choix de l'assolement. Le labour d'automne.
Ann. Agron. 1969, 20 (3) : 305-315.
- MANICHON, H. et SEBILLOTTE, M. 1975 - Analyse et prévision des conséquences des passages successifs d'outils sur le profil cultural.
B.T.I. N° 301 : 569-577, 5 réf.
- MOHD, Akram and W.D. KEMPER, 1979 - Infiltration of soils as affected by the pressure and water content at the time of compaction.
Soil Sc. Soc. of Amer. Journal 43 (6) : 1080-1086, 6 fig. 7 réf.
- MONG-GINE, T. 1979 - Mise en culture et interactions eau-sol-plante : étude de trois sites en région ferrallitique de savane (Touba, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire).
ORSTOM, Abidjan, multigr., 84p., 13 tabl., 36 fig., 47 réf. + annexes.
- MONNIER, G. 1965 - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols.
Ann. Agron. 16 : 327-400 et 471-534.
- MORTON, C.T. and BUCHELE, W.F. 1960 - Emergence Energy of plant seedlings. Seed environment essential for maximum emergence of seedlings.
Agric. Engin. 1960 : 428-455, 5 tabl., 13 fig., 8 ref.
- NICOU, R. 1975 - Le problème de la prise en masse à la dessiccation des sols sableux et sablo-argileux de la zone tropicale sèche.
Agron. Trop. 30 (4) : 325-343, 5 tabl., 6 fig., 12 réf.
- O.R.S.T.O.M., 1969 - Glossaire de pédologie. Description des horizons en vue du traitement informatique.
DGRST/ORSTOM - Mit et Doc. Techn. N° 13, 82p.

- PHILIPPS, R.E. and KIRKHAM, Don 1962 - Soil compaction in the field and corn growth.
Agron. Journ. 54 : 29-34.
- POSS, R. 1980 - Etudes morpho-pédologiques de la région de Katiola. Cartes des paysages et des unités morpho-pédologiques (Feuille Katiola à 1/200.000e).
ORSTOM, Abidjan, multigr., 158p.
- RUSSELL, E.W. 1973 - Soil conditions and plant growth.
10th Ed. Longman édit., London, 849p.
- SANGLERAT, G. 1965 - Le pénétromètre et la reconnaissance des sols.
Dunod édit., Paris, 230p.
- SHARMA, D.P. and AGRAWAL, R.P. 1978 - Effect of initial moisture content and conditions of during on crust strength.
J. Indian Soc. Soil Sci. 26 (3) : 254-256, 1 tabl., 1 fig., 7 ref.
- SMITH, L.A. and DUMAS, W.T. 1978 - A recording soil penetrometer.
Tr. of the A.S.A.E. 21 (1) : 12-14, 19.
- SMITTLE, D.A. and WILLIAMSON, 1977 - Effect of soil compaction on nitrogen and water use efficiency, root growth, yield and fruit shape of pickling cucumbers.
J. Amer. Soc. Hort. Sci. 102 (6) : 822-825, 3 tabl., 16 ref.
- STOUT, B.A., BUCHELE, W.F. and SNYDER, F.W. 1961 - Effective soil compaction on seedling emergence under simulated field conditions.
Agric. Eng. 42 (2) : 68-71.
- TACKETT, J.L. and PEARSON, R.W. 1965 - Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall.
Soil Sci. 99 (6) : 407-413.
- TAYLOR, H.M. and BURNETT, E. 1964 - Influence of soil strength on root-growth habits of plants.
Soil Sci. 98 : 174-180.
- VALENTIN, C. 1978 - Divers aspects des dynamiques actuelles de quelques sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire. Recherches méthodologiques. Résultats et interprétations agronomiques.
ORSTOM, Abidjan, multigr., 141p., 39 tabl., 85 fig., 111 réf. + annexes.

VALENTIN, C. et MONG-GINE, T. 1979 - Effets de la mise en culture de quelques sols représentatifs de la région de Touba (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Présentation sommaire de l'étude et résumé des premiers résultats.

ORSTOM, Abidjan, multigr., 19p., 3 tabl., 8 fig.

VIENNOT, M. 1980 - Etude pédologique de la région de Touba. Cartes des unités et des paysages morpho-pédologiques. (Feuille de Touba à 1/200.000e).

ORSTOM, Abidjan, multigr., 76p.

VOMOCIL, J.A. and FLOCKER, W.J. 1961 - Effect of soil compaction on storage and movement of soil, air, and water.

Tr. of the A.S.A.E. 4 (2) : 242-245, 29 ref.

WELLS, L.G. and TREESWAN O. 1978 - The response of various soil strength indices to changing water content and bulk density.

Tr. of the A.S.A.E. 21 (5) : 854-861.

WHISLER, F.D., ENGLE, G.F. and BAUHMANN, N.M. 1965 - The effect of soil compaction on nitrogen transformations in the soil.

West Virginia University. Agric. Exp. Station Bull. 516 T, 12p., 5 tabl., 1 fig., 19 ref.

YOKOI, H. 1968 - Relationship between soil cohesion and shear strength.

Soil Sci. and Plant Nutrition 14 (3) : 89-93, 7 tabl., 4 fig., 12 ref.