

Les méthodes de mesure de la densité apparente

Analyse de la dispersion des résultats dans un horizon donné

Gballou YORO ⁽¹⁾ et Gnahoua GODO ⁽²⁾

⁽¹⁾ Laboratoire de Pédologie - ⁽²⁾ Laboratoire d'Agronomie, IIRSDA, BP V51 Abidjan, Côte-d'Ivoire

RÉSUMÉ

Il existe plusieurs méthodes de mesure de la densité apparente : celles de laboratoire et celles de terrain.

Les méthodes de terrain qui comprennent essentiellement la méthode au sable, la méthode au cylindre, la méthode au densitomètre à membrane et la méthode par gammamétrie ont été utilisées selon un dispositif en carré latin, sur 4 types de sol. Une analyse de variance effectuée sur les résultats obtenus met en évidence que la valeur de la densité apparente dépend à la fois du type de sol et de la méthode utilisée. Elle révèle, en outre, une interaction entre le sol et la méthode de mesure.

MOTS-CLÉS : Sol ferrallitique - Densité apparente.

ABSTRACT

METHODS OF MEASURING BULK DENSITY

Analysis of results variability in a given soil horizon

There are many methods to measure bulk density : laboratory and field methods.

Field methods comprising sand and cylinder methods, ball and gamma densimetric methods were employed to measure bulk density in four types of soil according to a Latin Square scheme.

An analysis of variance performed on the results obtained, showed that the value of the bulk density depends on both the soil and the method employed. In addition, there was an interaction between the soil and the method of measurement.

KEY WORDS : Ferrallitic soil - Bulk density.

INTRODUCTION

La densité apparente est l'un des paramètres les plus importants dans les études portant sur la structure du sol. Elle est, en effet, liée à la nature et à l'organisation des constituants du sol (CHAUVEL, 1977). Elle permet, en outre, de calculer la porosité et d'apprécier ainsi indirectement la perméabilité, la résistance à la pénétration des racines (MAERTENS, 1964), la cohésion des

horizons (YORO, 1983 ; YORO et ASSA, 1986) et la réserve en eau du sol (HENIN, MONNIER et GRAS, 1969).

Son étroite relation avec le type de structure fait qu'elle est faible dans "les sols à structure grumeleuse stable" comme le chernozem dont les agrégats sont en grumeaux (DUCHAUFOR, 1970). Dans les sols tropicaux, les horizons humifères, relativement structurés (de BOISSEZON, 1965) se caractérisent par des densités

apparentes plus faibles que celles des horizons minéraux sous-jacents à structure massive (BLIC, 1975 ; KOUAKOU, 1981 ; YORO, 1983).

Sa connaissance peut permettre de déterminer ou d'orienter les travaux de préparation du sol tels que le labour, le sous-solage, le pulvérisage, le hersage...

Elle peut être évaluée au laboratoire sur des échantillons, ou sur le terrain dans des horizons en place selon que l'on veut déterminer la porosité texturale, la microporosité ou la macroporosité. Au laboratoire, sont essentiellement utilisées la méthode à la paraffine et à l'eau et la méthode au pétrole. Ces deux méthodes conviennent surtout pour la mesure de la densité apparente des mottes (VIZIER, 1971), des petits agglomérats (MONNIER, STENGEL et FIES, 1973) et des agrégats (YORO, 1983). Pour les mesures *in situ*, il existe quatre méthodes : la méthode au cylindre, la méthode au sable, la méthode au densitomètre à membrane et la méthode par gammamétrie.

Les descriptions, les avantages et les limites d'utilisation de ces méthodes, sont repris dans le Bulletin de Groupe de Travail édité par l'ORSTOM (AUDRY *et al.*, 1973). Ce bulletin n'aborde malheureusement pas le problème de l'uniformité ou de la dispersion des densités apparentes déterminées dans un même sol ou horizon à partir de plusieurs méthodes. En outre, divers travaux (BERGER, 1964 ; COLLINET, 1988) mentionnant la porosité calculée à partir de la densité apparente, ne précisent pas laquelle des quatre méthodes de terrain a été utilisée. Certains travaux comme ceux de BLIC (1987) s'appuient sur les densités apparentes obtenues en utilisant alternativement deux méthodes. Or, au cours de quelques-unes de nos études (YORO, 1983 ; GODO *et al.*, 1989) nous avons remarqué que pour un même horizon nous obtenons des densités apparentes sensiblement différentes lorsque nous utilisons simultanément la méthode au sable et la méthode au densitomètre à membrane. Nos constatations n'étant pas fondées sur une analyse statistique ne permettaient pas de dégager l'influence de la méthode sur la valeur de la densité apparente.

Cette étude est une contribution à la connaissance de la variation des valeurs mesurées de la densité apparente d'un sol ou d'un horizon donné en fonction des méthodes de mesure.

1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

1.1. Rappel des principes des méthodes de terrain

Les principes de la méthode au cylindre (C), de la méthode au sable (S) et de la méthode au densitomètre à membrane (M) sont fondés sur la détermination du poids spécifique apparent d'un volume de sol prélevé. Le volume est estimé immédiatement sur le terrain

alors que le poids est évalué au laboratoire après séchage et pesée. La connaissance de ces deux variables permet de calculer la densité apparente selon la relation :

$$d_a = P/V$$

où P est le poids sec de l'échantillon,

V le volume de l'échantillon prélevé et séché.

Des deux variables, le volume apparaît le plus important car sa détermination nécessite beaucoup d'attention et de doigté (AUDRY *et al.*, 1973). Un geste en plus ou en moins et le volume est surestimé ou sous-estimé. Le souci de la précision est d'ailleurs l'une des raisons des multiples recherches qui ont conduit à la mise au point des méthodes que nous connaissons. La précision du volume dépend cependant de la particularité de chaque méthode.

En ce qui concerne la méthode par gammamétrie (G), le principe se fonde sur la mesure de l'intensité atténuée N qui s'exprime selon la formule :

$$N = N^0 e^{-uP}$$

où :

N = intensité atténuée (nombre de photons gamma émis dans le sol) ;

N⁰ = intensité initiale (nombre de photons initiaux) ;

u = coefficient massique d'atténuation du matériau (coefficient d'absorption massique du sol) ;

P = masse volumique du matériau ;

l = longueur du parcours (épaisseur du sol traversée par les photons) ;

e = base des logarithmes népériens.

La connaissance de u, l et N⁰ permet de calculer P, la densité apparente.

1.2. Application des quatre méthodes sur différents types de sol

Au cours de certaines de nos études (YORO, 1983 ; GODO *et al.*, 1989), nous avons constaté que pour un même sol ou un même horizon, la densité apparente variait plus ou moins selon la méthode utilisée. Ces observations portant sur les résultats de deux méthodes (méthode au sable et méthode au densitomètre à membrane) s'avèrent insuffisantes pour conduire à une conclusion crédible. Nous avons donc entrepris d'appliquer, sur les mêmes sols, les quatre méthodes permettant de mesurer, *in situ*, la densité apparente. Cette démarche devra nous amener à déterminer l'influence de la méthode de mesure sur la valeur de la densité apparente.

Pour atteindre cet objectif, les conditions suivantes ont été nécessaires :

– choix de quatre types de sol dont les caractères morphologiques essentiels sont consignés dans le Tableau I :

TABLEAU I
Caractères morphologiques essentiels des sols (horizon 0-15 cm)
Essential morphological properties of the soils (0-15 cm horizon)

Type de sol	Couleur	Texture	Éléments grossiers %	Structure	Occupation
A	Brun grisâtre très foncé (10YR 3/2)	Limono-sableuse	0	Fragmentaire grumeleuse	Jachère 15 ans
B	Brun foncé (10YR 3/3)	Limono-argileuse	65	Fragmentaire grumeleuse	Jachère 15 ans
C	Brun foncé (10YR 3/3)	Sableuse	0	Grumeleuse fine à tendance particulière	Forêt secondaire
D	Brun jaunâtre foncé (10YR 4/4)	Sableuse	0	Grumeleuse fine à tendance particulière	Jardin arboré

* le sol A est un sol ferrallitique fortement désaturé, appauvri, modal, sur sables tertiaires,

* le sol B est ferrallitique, moyennement désaturé, remanié, modal, sur schistes,

* les sols C et D sont ferrallitiques fortement désaturés, appauvris, modaux, sur sables tertiaires ; ils ne diffèrent que par leur état d'occupation ;

– mesures effectuées dans les 15 premiers centimètres généralement concernés par des modifications ;

– utilisation simultanée de quatre méthodes sur un type de sol afin d'éviter la variation d'humidité ;

– un même manipulateur pour les quatre répétitions de chaque méthode ;

– volume de terre prélevé supérieur à 1 litre (volume du cylindre 1 139,82 cm³ ;

– sur un type de sol, les mesures s'effectuent sur une surface de 16 m², soit 1 m² pour une répétition et 4 m² pour une méthode ; le dispositif de collecte des données est un carré latin (4 x 4).

Il a été adopté pour essayer de réduire au niveau d'une même méthode "la variabilité des mesures liées à l'hétérogénéité dans l'espace" (AUDRY *et al.*, 1973) ;

– traitement à l'ordinateur des données brutes selon deux logiciels STAT VIEW 512 + et NDMS pour tester les facteurs liés au sol et ceux dus à la méthode d'une part, et les interactions sol-méthode d'autre part.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1. Valeurs de la densité apparente en fonction des méthodes de mesure

L'analyse de la variance effectuée sur l'ensemble des données obtenues sur les quatre types de sol par les quatre méthodes de mesure (tabl. II) montre une différence hautement significative ($\alpha = 1\%$) entre les sols étudiés. Elle confirme ainsi leur distinction fon-

TABLEAU II
Analyse de variance
Variance analysis

Source de variation	Degré de liberté	Somme des carrés des écarts	Carré moyen	F calculé	S $\alpha = 1\%$
Facteur sol	3	0,88709	0,2957	1037,9	HS
Facteur méthode	3	0,53044	0,17681	620,6	HS
Interaction sol-méthode	9	0,21834	0,02426	85,1	HS
Variance résiduelle	48	0,01368	0,00028		

HS = hautement significatif
S = signification

TABLEAU III
Densité apparente de 4 types de sol en fonction
des méthodes de mesure
*Bulk density of 4 soil types in relation
with measurement methods*

TYPES DE SOL	A	B	C	D	\bar{x}
Méthodes de mesure					
Au sable (S)	1,248	1,291	1,159	1,515	1,303
Au densitomètre à membrane (M)	1,063	1,143	1,151	1,502	1,214
Au cylindre (C)	1,394	1,517	1,343	1,524	1,444
Par gammamétrie (G)	1,281	1,517	1,295	1,579	1,417

dée essentiellement sur la texture, la structure et le passé cultural (cf. tabl. I).

Cette analyse de variance souligne le rôle de la densité apparente comme un paramètre d'identification ou de caractérisation des sols. La densité apparente permet, en effet, non seulement de distinguer les types de sol entre eux, mais de suivre l'évolution physique d'un sol soumis à diverses techniques culturales (DE BLIC, 1987).

L'examen du tableau II révèle également que les moyennes des densités apparentes (tabl. III) qui sont respectivement de 1,303 pour la méthode au sable (S), 1,214 pour la méthode au densitomètre à membrane (M), 1,444 pour la méthode au cylindre (C) et 1,417 pour la méthode par gammamétrie (G), diffèrent entre elles de manière significative pour $\alpha = 1\%$. La valeur de la densité apparente est donc liée, non seulement au type de sol, mais aussi à la méthode de mesure. Il existe d'ailleurs une forte interaction entre les deux paramètres (tabl. II).

La méthode au densitomètre à membrane (M) donne les plus faibles valeurs. En revanche, la méthode au cylindre (C) donne des densités apparentes élevées. Celles déterminées par les méthodes au sable (S) et par gammamétrie (G) sont intermédiaires. Il se dégage cependant des affinités entre M et S de même qu'entre C et G.

L'influence de la méthode de mesure sur la valeur de la densité apparente a été mieux appréciée au niveau de chaque type de sol (tabl. IV). Dans le sol A, les moyennes de 1,248, 1,063, 1,394 et 1,280 obtenues respectivement par les 4 méthodes (cf. tabl. III) diffèrent entre elles de manière significative ($\alpha = 5\%$). Dans les sols B et C, seules les différences BC-BG et CS-CM ne sont pas significatives. Dans le sol D, sur les six différences calculées, trois sont significatives (tabl. IV).

Il se révèle que d'un sol à un autre, les différences

observées entre les densités apparentes déterminées par les quatre méthodes ne sont pas toutes significatives. Et ceci semble être en relation avec l'interaction très marquée qui existe entre les méthodes et les sols. D'une manière générale, il ressort que la valeur de la densité apparente est liée à la fois au type de sol et à la méthode de mesure utilisée.

Les différences de résultats observées entre les mesures effectuées sur un même sol peuvent être dues à des erreurs de manipulations. Mais nous pensons

TABLEAU IV
Comparaison des moyennes au niveau de chaque type de sol
(logiciel STAT VIEW 512*)
*Means comparison for each soil type
(STAT VIEW 512*)*

Comparaison	Différence x	PPDS de Fisher
AS-AM	.185	.027*
AS-AC	-.145	.027*
AS-AG	-.032	.027*
AM-AC	-.331	.027*
AM-AG	-.217	.027*
AC-AG	.113	.027
BS-BM	.147	.03*
BS-BC	-.226	.03*
BS-BG	-.226	.03*
BM-BC	-.374	.03*
BM-BG	-.374	.03*
BC-BG	2.5 E-4	.03
CS-CM	.009	.009
CS-CC	-.184	.009*
CS-CG	-.136	.009*
CM-CC	-.193	.009*
CM-CG	-.145	.009*
CC-CG	.048	.009*
DS-DM	-.009	.036
DS-DC	-.009	.036
DS-DG	-.064	.036*
DM-DC	.022	.036
DM-DG	-.077	.036*
DC-DG	-.055	.036*

* Significatif pour $\alpha = 5\%$

PPDS plus petite différence significative

qu'elles proviennent essentiellement des difficultés et limites d'utilisation liées à chaque méthode (AUDRY *et al.*, 1973). Il existe, en réalité, des risques de sous-estimation ou de surestimation du volume dans le cas des méthodes au sable, au cylindre et au densitomètre à membrane. Pour la méthode par gammamétrie, les éléments grossiers, par exemple, ne permettent pas une diffusion correcte des photons gamma émis dans le sol.

Eu égard à ces dispersions des résultats, l'on pourrait penser à d'autres approches, notamment la rétractométrie (BRAUDEAU, 1987). Celle-ci ne résoudrait cependant pas le problème de la particularité de chaque méthode qui constitue probablement une des sources de variation des résultats dans un sol donné.

Il importe donc, de préciser désormais, dans toute étude de densité apparente, la méthode ayant permis de collecter les données. En outre, dans une étude d'évolution des caractères densitométriques, il faut utiliser la même méthode au cours des différentes périodes de mesure. A ce propos, il convient de souligner que la méthode au sable bien que "longue et minutieuse" (AUDRY *et al.*, 1973) nous apparaît mieux adaptée que les autres pour le suivi de la densité apparente des sols sous culture. Elle est en effet applicable sur les sols labourés, les sols gravillonnaires et sur des buttes (BOKA, 1986 ; GNAMBA, 1986 ; YORO, 1989).

2.2. Précision et justesse des méthodes

Les coefficients de variation (tabl. V) nous ont permis de cerner la précision d'une part et la sélectivité d'autre part de chacune des méthodes, d'abord au niveau de chaque sol ensuite sur l'ensemble des quatre sols.

Pour chacun des sols étudiés, les coefficients de variation diffèrent d'une méthode à l'autre. La méthode au sable (S) dans le sol A donne la plus faible valeur (0,786). Dans le sol B, c'est plutôt la méthode au densitomètre à membrane (M) qui permet d'obtenir

le plus faible coefficient de variation (0,684). Un classement par ordre croissant des valeurs de ce paramètre donne sable-membrane-cylindre-gammamétrie dans A ; membrane-gammamétrie-sable-cylindre dans B et C, et membrane-gammamétrie-cylindre-sable dans D. Ainsi la méthode au densitomètre à membrane (M), avec des coefficients de variation très souvent faibles, se révèle plus précise que les autres. La précision de la méthode au sable (S) est variable selon les sols. D'une façon générale, la précision ou la dispersion des résultats est liée à la fois à la méthode et au sol comme la valeur de la densité apparente.

Les coefficients de variation calculés sur l'ensemble des données (cf. tabl. V) sont supérieurs à 5. Ils induisent ainsi une dispersion des moyennes par rapport à ce que nous avons observé au niveau d'un type de sol où ils oscillent entre 0,2 et 1,7. Cette dispersion traduit, quant à elle, les différences entre les sols étudiés et concorde avec les valeurs de la densité apparente liées non seulement à la méthode mais aussi au sol. La méthode au densitomètre à membrane (M), dont les résultats conduisent à un coefficient de variation relativement élevé (13,870), permet de mieux caractériser un sol et de l'identifier par rapport aux autres milieux édaphiques. Elle est suivie, par ordre décroissant, des méthodes au sable (S) ($v = 10,105$), par gammamétrie (G) ($v = 9,364$) et au cylindre (C) ($v = 5,542$). Ainsi la méthode au cylindre (C), qui donne des moyennes permettant de calculer un faible coefficient de variation, rend moins compte de la différence entre les propriétés densitométriques des sols.

La méthode au sable apparaît la plus juste car elle permet d'obtenir des résultats en conformité avec la morphologie des sols. En effet, la densité apparente (1,291) mesurée dans les horizons gravillonnaires, grâce à cette méthode, se révèle beaucoup plus proche de la réalité que les autres valeurs, 1,143 et 1,517, déterminées respectivement au densitomètre à membrane, au cylindre et par gammamétrie. La valeur

TABLEAU V
Coefficient de variation (%)
Variation coefficient (%)

TYPES DE SOL	A	B	C	D	Les sols groupés
Méthodes de mesure					
Au sable (S)	0,786	0,829	0,358	1,526	10,105
Au densitomètre à membrane (M)	0,943	0,684	0,167	0,777	13,871
Au cylindre (C)	1,026	1,666	0,584	1,166	5,542
Par gammamétrie (G)	1,535	0,765	0,352	0,876	9,364

1,143 a été probablement sous-évaluée grâce à une surestimation du volume de la membrane pressée certainement par excès pour qu'elle adhère à toutes les parois. En revanche, la valeur 1,517 semble surévaluée à cause du poids des échantillons, faussé à l'excès par le léger débordement des éléments grossiers après arasage du cylindre, ou à cause d'une forte émission des photons gamma.

CONCLUSION

L'étude sur les méthodes de mesure de la densité apparente a permis de mettre en évidence les points suivants :

- pour un sol donné, les quatre méthodes de mesure de terrain donnent des résultats statistiquement différents. La valeur de la densité apparente est donc liée non seulement au type de sol mais aussi à la méthode de détermination ;

- il existe une forte interaction entre le sol et la méthode ;

- les méthodes au densitomètre à membrane (M) et au sable (S) permettent d'obtenir des valeurs des densités apparentes relativement faibles plus ou moins en relation avec la morphologie des sols alors que les méthodes au cylindre (C) et par gammamétrie (G) donnent des valeurs élevées dues probablement à une surestimation ;

- la méthode au densitomètre à membrane (M) se révèle plus précise que les autres et permet, en outre, de mieux traduire les différences entre les propriétés densitométriques des sols. Elle présente cependant des limites et ne peut pas être conseillée dans le cadre d'un suivi de l'évolution de la densité apparente d'un sol sous culture motorisée. Elle est, en effet, difficilement

utilisable dans les horizons trop meubles ou bouillants et sur des billons enclins à se déformer sous l'effet de la pression exercée (AUDRY *et al.*, 1973).

Notre intention n'est pas de remettre en cause les méthodes de terrain existantes. Chacune d'elles a ses avantages et ses limites selon le type de sol. Une nouvelle approche aura sa particularité et ne résoudra pas le problème de la variation des résultats dans un même sol en fonction des modes de mesure. Nous voulons attirer l'attention des uns et des autres sur l'erreur commise en utilisant, soit au même moment soit à des moments différents, deux ou plusieurs méthodes pour déterminer la densité apparente d'un sol donné.

Eu égard à ce qui précède, il ressort qu'il faut :

- utiliser la même méthode au cours des diverses périodes de mesure ;

- préciser la méthode de mesure et ne plus se contenter seulement de donner la valeur de la densité apparente ;

- comparer uniquement les densités apparentes obtenues par la même méthode ;

- pour le suivi de l'évolution de la densité apparente d'un sol sous culture motorisée, préférer la méthode au sable. Elle est la mieux adaptée et la plus juste. En outre, elle est proche de la méthode au densitomètre à membrane (M) et a l'avantage d'être la moins coûteuse et donc à la portée de tout le monde.

REMERCIEMENTS

Nous remercions nos collègues de l'Institut, G. GNOUN-HOURI et B. ASSIENAN pour leur collaboration, surtout pour le traitement des données.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 12 octobre 1990

BIBLIOGRAPHIE

AUDRY (P.), COMBEAU (A.), HUMBEL (F.X.), ROOSE (E.), VIZIER (J.F.), 1973. - Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. Bulletin de Groupe de Travail. ORSTOM, Bondy, *multigr.*

BERGER (J.M.), 1964. - Profils culturaux dans le Centre de Côte-d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. II, 1 : 41-68.

BLIC (Ph. de), 1975. - Comportement des sols après mise en culture mécanisée, Région Centre Côte-d'Ivoire. ORSTOM, Adiopodoumé, 27 p., *multigr.*

BLIC (Ph. de), 1987. - Analysis of a cultivation profile under sugarcane : methodology and results. *In* : Land Development and management of Acid Soils in Africa II - IBSRAM Proceedings n° 7.

BOISSEZON (P. de), 1965. - Les sols de savane des plateaux Batéké. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. III, n° 4 : 291-304.

BOKA (M.Th.), 1986. - Modifications physiques d'un sol ferrallitique sous l'effet du défrichement lourd motorisé. Mémoire pour l'obtention du DIAT (ESAT-Montpellier). ORSTOM, Adiopodoumé, 50 pp.

- BRAUDEAU (E.), 1987. – Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés. *Sci. du Sol*, 25/2 : 85-93.
- CHAUVEL (A.), 1977. – Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Évolution et réorganisation des sols rouges de moyenne Casamance. Thèse, université de Strasbourg. ORSTOM, Paris. *Coll. Trav. et Doc.*, n° 62, 532 pp.
- COLLINET (J.), 1988. – Comportements hydrodynamiques et érosifs de sols de l'Afrique de l'Ouest. Évolution des matériaux et des organisations sous simulation de pluies. Thèse, université de Strasbourg, 513 pp., *multigr.*
- DUCHAUFOR (P.), 1970. – Précis de Pédologie. Masson, 3^e édition, Paris.
- GNAMBA (A.S.), 1986. – Quelques effets du défrichement motorisé sur certains types de sols de Côte-d'Ivoire. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie (DAA), Option Pédologie (ENSA d'Abidjan). ORSTOM, Adiopodoumé, *multigr.*
- GODO (G.), YORO (G.), GOUE (B.), AFFOU (Y.), 1989. – Caractérisation physique et socio-économique du site expérimental IBSRAM de Bécédi, Sous-Préfecture de Sikensi. ORSTOM-IBSRAM, 33 pp., *multigr.*
- HENIN (S.), MONNIER (G.), GRAS (R.), 1969. – Le profil cultural. Masson, Paris, 2^e édition, 332 pp.
- KOUAKOU (K.), 1981. – Étude de la dynamique actuelle d'un sol ferrallitique sous jachère de 3 ans, sous jachère de 20 ans et sous forêt en basse Côte-d'Ivoire. Rapport de stage (ENSA d'Abidjan). ORSTOM, Adiopodoumé, 16 pp., *multigr.*
- MAERTENS (C.), 1964. – La résistance mécanique des sols à la pénétration : ses facteurs et son influence sur l'enracinement. *Ann. Agron.*, 15, 5 : 539-554.
- MONNIER (G.), STENGEL (P.), FIES (J.C.), 1973. – Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann. Agron.*, 24, 5 : 533-545.
- VIZIER (J.F.), 1971. – Étude des variations du volume spécifique apparent dans les sols hydromorphes au Tchad. Allure des phénomènes. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IX, n° 2 : 133-145.
- YORO (G.), 1983. – Contribution à l'étude de caractérisation de la structure. Identification et évolution des paramètres structuraux de deux types de sols du nord-ouest de la Côte-d'Ivoire. Incidences agronomiques. Thèse, doct. Ingénieur, université d'Abidjan, 279 pp., *multigr.*
- YORO (G.), ASSA (A.), 1986. – Modifications structurales de deux sols ferrallitiques du nord-ouest de la Côte-d'Ivoire sous l'effet du piétinement par l'homme. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. XXII, n° 1 : 31-41.
- YORO (G.), 1989. – Identification de la microvariabilité après défrichement motorisé d'un sol ferrallitique issu de sables tertiaires. IIRSDA, Adiopodoumé, 15 pp., *multigr.*