

REPUBLIQUE FEDERALE
DU CAMEROUN

**DENSITE
APPARENTE
DE QUELQUES SOLS
DU CAMEROUN**



F. X. HUMBEL

ETUDE DE LA DENSITE APPARENTE MESUREE IN SITU
DANS QUELQUES SOLS DU CAMEROUN

F.X. HUMBEL
Pédologue de l'O.R.S.T.O.M.

Les mesures de terrain et de laboratoire ont été réalisées pendant la saison des pluies 1969 et la saison sèche 1970 avec l'aide technique de YOUNOU Christophe.

JUIN 1970

P. 181

R E S U M E

La densité apparente de différents sols du Cameroun a été mesurée in situ à l'aide d'un densitomètre à membrane dont la précision a été déterminée.

Les "profils densimétriques" qui représentent les variations de la densité apparente en fonction du paramètre profondeur ont été tracés et leurs ondulations analysées par un raisonnement dichotomique. Celui-ci fait intervenir d'autres données mesurables notamment la densité réelle, la granulométrie et la porosité des mottes.

Cette "analyse densimétrique" s'appuie sur des réflexions concernant les "facteurs d'allègement" et les "facteurs d'alourdissement relatif" d'origine pédogénétique dont l'action différentielle fait onduler le profil densimétrique de la roche mère à la surface du sol. Les crochets "endo" ou "exo" des profils obtenus n'ont pas tous été correctement expliqués souvent par ce que les caractères morphologiques exprimant l'action de certains "facteurs densimétriques" n'étaient pas affinés par des tests chiffrés (développement de la structure, consistance, macro-porosité). Dans certains cas même les profils densimétriques ont fait supposer l'intervention de processus pédogénétiques qui avaient échappé au premier examen morphologique.

La densité apparente est en outre une donnée nécessaire à l'expression volumique d'autres caractéristiques physiques ou chimiques du sol (granulométrie, humidité, réserves minérales). Elle permet en particulier d'établir des "diagrammes de composition volumique" qui représentent les taux volumiques d'eau, gaz et matière à différentes saisons ou à différentes profondeurs.

Quelques diagrammes sont présentés, établis les uns au maximum d'humidité du sol les autres au minimum : ils montrent par exemple que les sols jaunes Ferrallitiques et les vertisols sont pratiquement asphyxiés en saison des pluies tandis que les sols rouges Ferrallitiques et les sols Rouges Tropicaux restent largement aérés.

T A B L E D E S M A T I E R E S

	Pages
CHAPITRE I - BUT DE L'ETUDE	
II - METHODOLOGIE	
21. Principe du densitomètre à membrane	2
22. Précision des mesures : Calcul d'incertitude	2
III - LES SOLS ETUDIES	
31. Sols Ferrallitiques	6
32. Sols Ferrugineux	10
33. Vertisols	11
34. Sols Rouges Tropicaux	12
35. Sol Brun mésotrophe	13
36. Sols Halomorphe et Lessivé	13
37. Sols Hydromorphes	14
IV - REFLEXIONS SUR LES FACTEURS DENSIMETRIQUES	
41. La démarche du raisonnement	16
42. Les Facteurs densimétriques	17
43. La porosité calculée	19
44. Porosité calculée et mesurée	19
45. Traitement des horizons caillouteux	21
46. Calcul de la composition volumique	23
V - LES RESULTATS OBTENUS	
51. Densité de 11 profils Ferrallitiques	25
52. Densité de 3 Profils Ferrugineux	31
53. Densité de 3 Vertisols	32
54. Densité de 2 sols Rouges Tropicaux	33
55. Densité d' 1 sol Brun	35
56. Densité d' 1 interfluve Halomorphe	35
57. Densité de 2 sols Hydromorphes	37
58. Tableaux récapitulatifs	39
VI - EXEMPLES DE COMPOSITION VOLUMIQUE	41
VII - CONCLUSION	46
VIII - BIBLIOGRAPHIE	49

T A B L E D E S F I G U R E S

	Page
Figure 1	2
2	3
3	6
4	18
5	25
6	26
7	28
8	31
9	32
10	35
11	41
12	42
13	46

CHAPITRE I

BUT DE L'ETUDE

La densité apparente est une caractéristique importante des sols et l'étude de ses variations en fonction du paramètre profondeur ou de la nature des horizons permet dans une certaine mesure de préciser l'influence relative des différents facteurs pédogénétiques qui la déterminent.

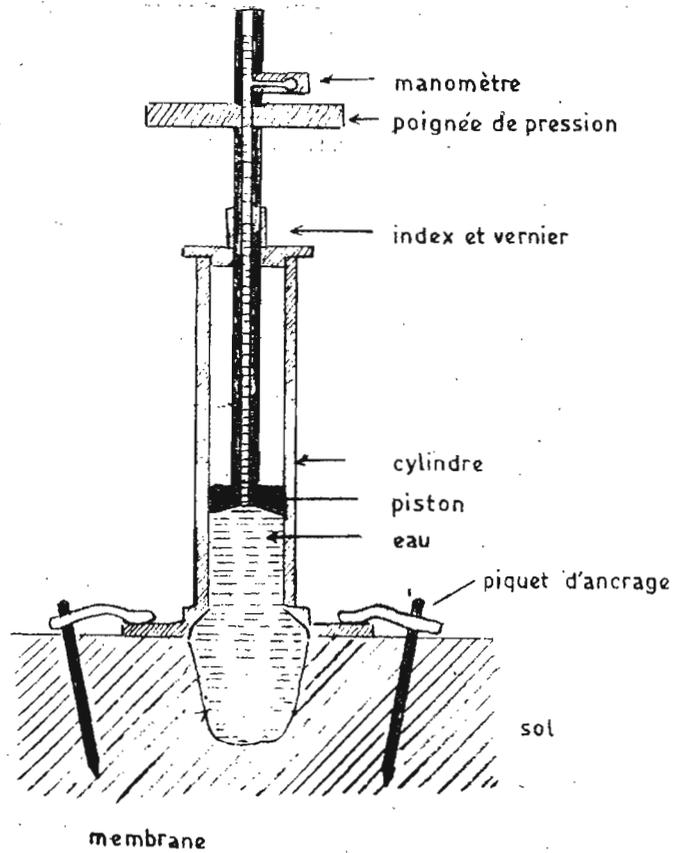
Etant une variable dérivée de nombreux facteurs qu'on peut exprimer par l'intermédiaire de la densité réelle et de la porosité globale l'interprétation de ses variations doit obligatoirement s'appuyer sur d'autres données mesurables d'ordre moins élevé comme la granulométrie, la minéralogie, la densité réelle, les différentes formes de porosité et d'humidité, la résistance à la pénétration etc... et elle doit être confrontée évidemment à une étude morphologique précise laquelle peut être affinée elle-même à la lumière des résultats obtenus. Dans ces conditions l'étude de la densité apparente peut éclairer certains faits pédologiques ou même parfois en révéler l'existence.

Le but de cette étude est de fournir les profils densimétriques de quelques sols-types du Cameroun et de les comparer entre eux après avoir précisé l'identité pédogénétique des horizons qu'ils contiennent. Quelques réflexions ont été ensuite ajoutées concernant les facteurs pédologiques qui font varier la densité apparente et qui se traduisent par des pics "endo" ou "exo" sur la courbe de décroissance de la densité depuis la roche saine jusqu'à la surface du sol.

Même si l'étude des profils densimétriques ne permet pas d'éclairer tous les événements pédologiques qu'ils enregistrent il n'en reste pas moins que les mesures de densité apparente sont nécessaires à l'expression volumique de données pédologiques fondamentales comme l'humidité, la granulométrie, les réserves chimiques etc. et qu'elles permettent d'établir la composition volumique globale du sol en eau, gaz et matière à différentes saisons. Pour cela une connaissance préalable des profils densimétriques-types permet, en choisissant à bon escient les points de mesure, d'en limiter le nombre.

Figure 1 DENSITOMÈTRE A MEMBRANE

1/ PRÉSENTATION



2/ EXEMPLE DE MESURE

Date	DENSITÉ APPARENTE IN SITU									Profil: NGD 207
Opérateur	0-5 cm			5-10 cm			10-15 cm			
Profondeur	Racine			2 quartz = 10 g			1 petite cavité			
Remarque	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	
pression	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,4	
V _i	770	779	783	1497	1508	1512	796	803	809	
V _o	138	155	165	770	779	783	134	154	164	
V _i -V _o	632	624	618	727	729	729	662	649	645	
V	624			728			648			
Ph	866			1005			1005			
dh = Ph / V	1,387			1,490			1,550			
n° boîte	GB 64			GB 65			GB 66			
p ²	18 400			17 744			17 858			
p ¹	20 003			19 999			20 024			
Ps = Ph x p ² / p ¹	797			963			896			
d = P / V	1,277			1,322			1,382			
d = dh / (1+H)	1,276			1,321			1,383			
H	8,7%			12,7%			12,4%			
Hv	11,0%			16,2%			16,7%			

CHAPITRE II

METHODOLOGIE

II 1/ PRINCIPE DU DENSITOMETRE A MEMBRANE

La densité apparente in situ a été mesurée à l'aide d'un densitomètre à membrane. L'appareil utilisé a été fourni par la Société d'applications Mécaniques et Optiques 47 rue de Bagneux à MONTROUGE (France).

Un piston dont les déplacements sont repérés pousse l'eau d'un cylindre vertical vers une membrane élastique qui épouse la forme d'une cavité creusée dans le sol. Les matériaux extraits sont pesés immédiatement (Ph). Leur volume est donné, en cm^3 , par différence entre le repère initial (V_0) et le repère final (V_1) du piston. Enfin le dosage de l'humidité contenue dans un échantillon de terre placé en boîte étanche permet ensuite d'exprimer la densité par rapport au sol séché à 105° (p_1 poids de terre humide, p_2 poids de terre sèche).

Un manomètre indique la pression exercée par la membrane. La pression optimum est celle pour laquelle on obtient une résistance élastique des parois de terre. L'opérateur la perçoit aisément mais on peut aussi la déterminer à l'aide d'une courbe pression-volume (voir figure 2). Cette pression doit être suffisamment élevée pour que la membrane épouse intimement les parois de la cavité. La pression optimum diffère selon les types de sols ou d'horizons. Elle est souvent de 0,3 bar. Le temps d'application de celle-ci doit être en outre court et régulier (2 secondes par exemple). Un opérateur bien organisé peut effectuer 30 mesures par jour : La fixation de la plaque de base est le facteur limitant. On améliore donc le rendement en utilisant 2 plaques qu'un aide fixe tour à tour et en effectuant deux mesures successives à partir d'une même position de la plaque. Dans ce cas le V_1 de la première couche étudiée sert de V_0 à la seconde. Trois répétitions ont généralement été effectuées à la même profondeur (10 pour l'étude de l'hétérogénéité densimétrique de certains types d'horizons). Une fois sur 10 environ on obtient une valeur aberrante due à un accident pédologique, caillou isolé, cavité biologique, racine ou bulbe.

II 2/ PRECISION DES MESURES

Le poids spécifique en sec est obtenu par la formule :

$$d = \frac{Ph \times p2}{p1 \cdot (V_1 - V_0)}$$

ou Ph représente le poids de terre humide extraite.

p¹ le poids d'une fraction de cette terre mise en boîte étanche.

p2 le poids de cette fraction après séchage à 105°.

V1 le repère volumétrique final du densitomètre.

V0 le repère volumétrique initial.

L'incertitude relative sur d est :

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta Ph}{Ph} + \frac{\Delta p2}{p2} + \frac{\Delta p1}{p1} + \frac{\Delta (V_1 - V_0)}{(V_1 - V_0)}$$

- Ph est mesuré au gramme près sur une balance de Roberval protégée du vent. Il varie de 500 à 2000 g. Une étude des facteurs de l'incertitude a donné :

pesée	1,0 g
courant d'air	0,5 g
projections lors du creusement	<u>0,5 g</u>
	2,0 g

$$\Delta Ph = 2 \quad Ph = 500 \text{ à } 2000 \text{ donc } \frac{\Delta Ph}{Ph} = 1 \text{ à } 4 \text{ ‰}$$

- p1 est mesuré au mg près sur une balance de précision. Mais il s'écoule 0,5 minute entre la mesure de Ph et la fermeture de la boîte étanche, d'où une perte par évaporation. Or au maximum de la saison sèche 1000 g de terre fraîche peuvent perdre jusqu'à 10 g en 10 minutes, soit 0,5 ‰, erreur qui se répercute sur p1. D'autre part la répartition de l'humidité dans la terre extraite et rapidement homogénéisée, marque une hétérogénéité de 0,5 ‰ (par exemple 5 prélèvements sur le même échantillon donnent : 23,0 ‰ - 23,1 ‰ - 23,4 ‰ - 23,4 ‰ - 23,7 ‰).

D'où une incertitude absolue sur p1 de :

pesée	1 mg
évaporation	10 mg
hétérogénéité	<u>100 mg</u>
	111 mg

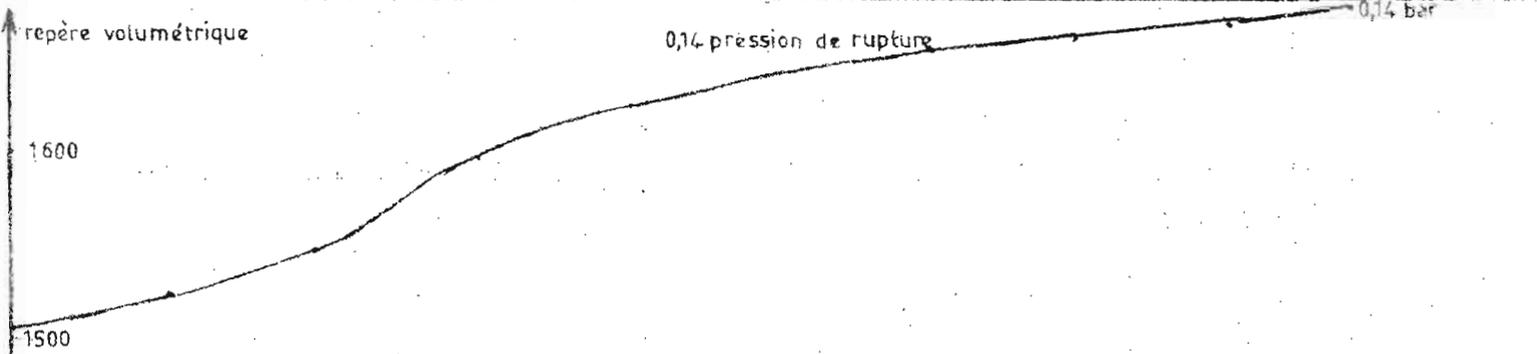
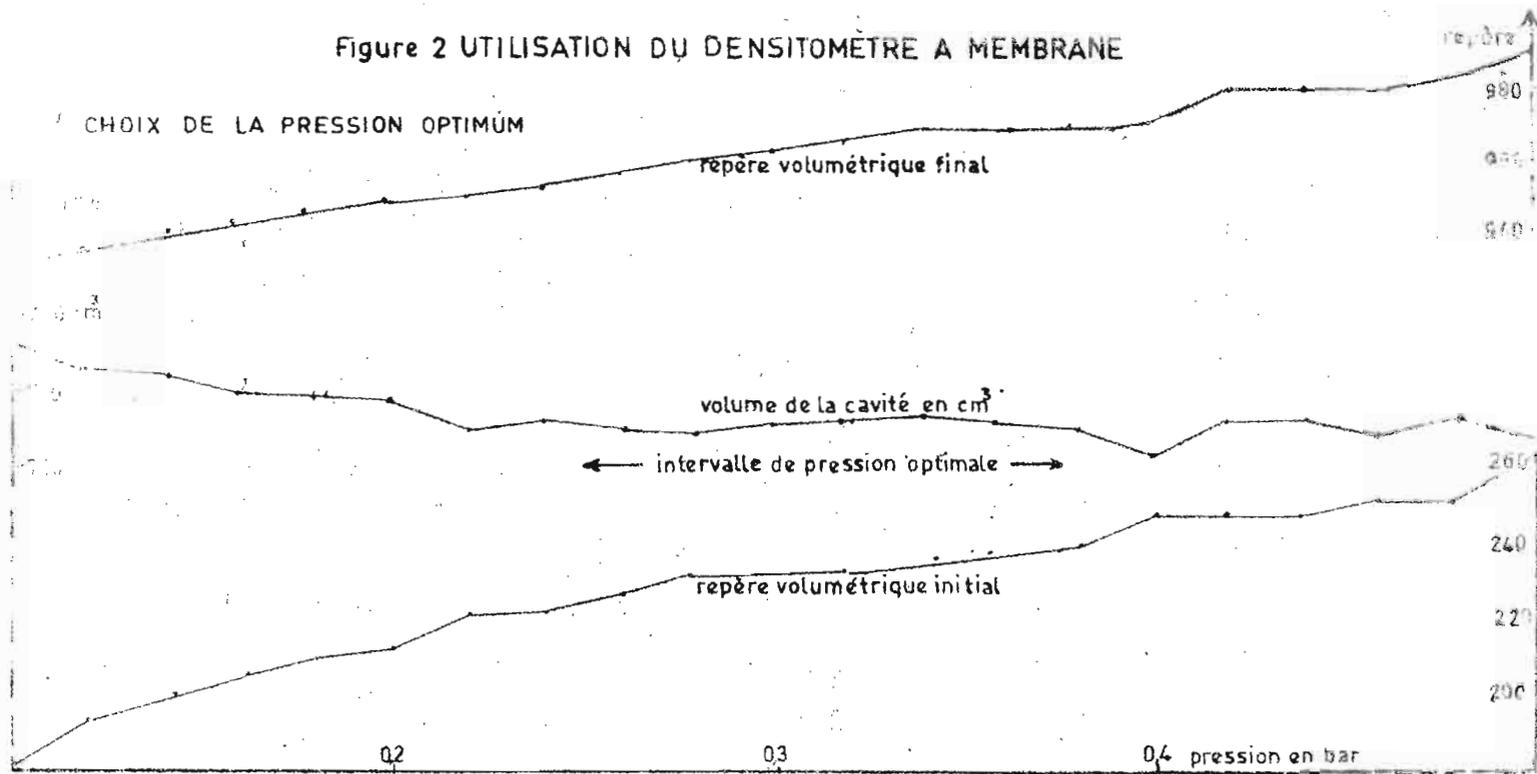
$$p1 = 20.000 \text{ mg d'où } \frac{\Delta p1}{p1} = 0,5 \text{ ‰}$$

- p2 est mesuré au mg près et p2 = 17.000 mg environ

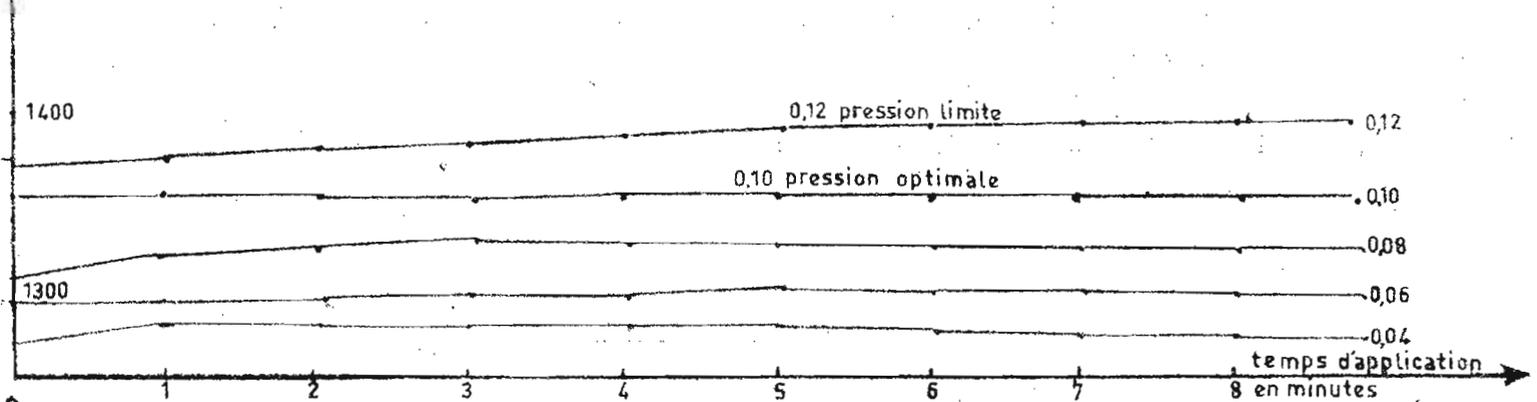
donc $\frac{\Delta p2}{p2} = 0,1 \text{ ‰}$ est négligeable.

- V₁ - V₀ : l'erreur introduite par le volume propre de la membrane se compense par différence.

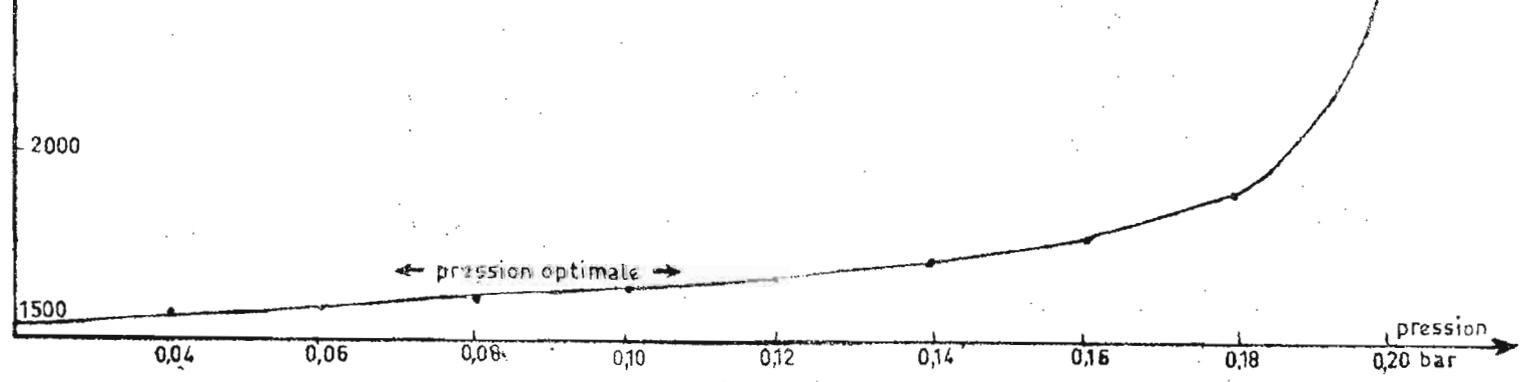
Figure 2 UTILISATION DU DENSITOMETRE A MEMBRANE



2 / NECESSITE D'UN TEMPS D'APPLICATION COURT ET REGULIER DANS LE CAS DE SOLS FRAGILES



3 VARIATION DU REPÈRE VOLUMÉTRIQUE EN FONCTION DE LA PRESSION DANS UN SOL FRAGILE



→ La courbe pression - volume (voir figure 2) indique une incertitude maximum de 10 cm³ environ due soit à une application imparfaite de la membrane, soit à un comportement élastique différent de V₀ à V₁. Enfin dans certains horizons plastiques l'instrument de creusement peut repousser les parois de quelques cm³ (horizons grossiers à matrice plastique en particulier).

Par ailleurs on opère à une température comprise entre 15 et 35° et qui peut augmenter de 5° au cours de la journée même si le corps du cylindre est abrité par une étoffe. Or le poids spécifique de l'eau varie avec la température et l'appareil a été gradué en cm³ à une température plus basse. Un kg d'eau occupe un volume de :

1000	cm ³ à 4°
999,7	cm ³ à 10°
998,2	cm ³ à 20°
995,7	cm ³ à 30°
992,2	cm ³ à 40°

Si l'appareil a été taré à 20°, 1000 divisions cm³ de la graduation représentent 1000 + 2,5 cm³ à 30°
+ 6,0 cm³ à 40°

Cette erreur de 6 % qui diminue le volume peut être aisément corrigée si la précision recherchée l'exige. Il en est de même pour l'augmentation de température journalière qui introduit une erreur de 1,2 à 1,7 cm³ selon la température initiale.

Incertitude absolue sur V₁ - V₀ :

pression	10 cm ³
tassement	3 cm ³
température	<u>2 cm³</u>
	15 cm ³

Or V₁ - V₀ varie de 750 à 2000 cm³

$$\text{donc } \frac{\Delta (V_1 - V_0)}{V_1 - V_0} \text{ varie de } 0,7 \text{ à } 2 \%$$

Au total on obtient : 0,1 + 0,5 + 0,7 < $\frac{\Delta d}{d}$ < 0,4 + 0,5 + 2,0

$$\text{donc } 1,3 \% < \frac{\Delta d}{d} < 2,9 \%$$

et comme d varie entre 0,5 et 2,5 on a 0,03 < Δd < 0,07.

Pour les densités moyennes (1,5) et dans les conditions normales (erreur relative 2 %) l'incertitude absolue est de 0,03. Cette précision est confirmée par les résultats obtenus lors de répétitions sur certains horizons particulièrement homogènes par exemple :

$$1,38 - 1,42 - 1,42 - 1,43 - 1,44 \text{ moyenne } 1,41 \pm 0,03$$

On retiendra que la précision est moindre dans les horizons humifères légers et peu épais. Mais même dans ce cas l'hétérogénéité densimétrique propre aux horizons est nettement supérieure à l'incertitude de mesures.

Remarque : La précision sur la mesure de densité apparente humide est

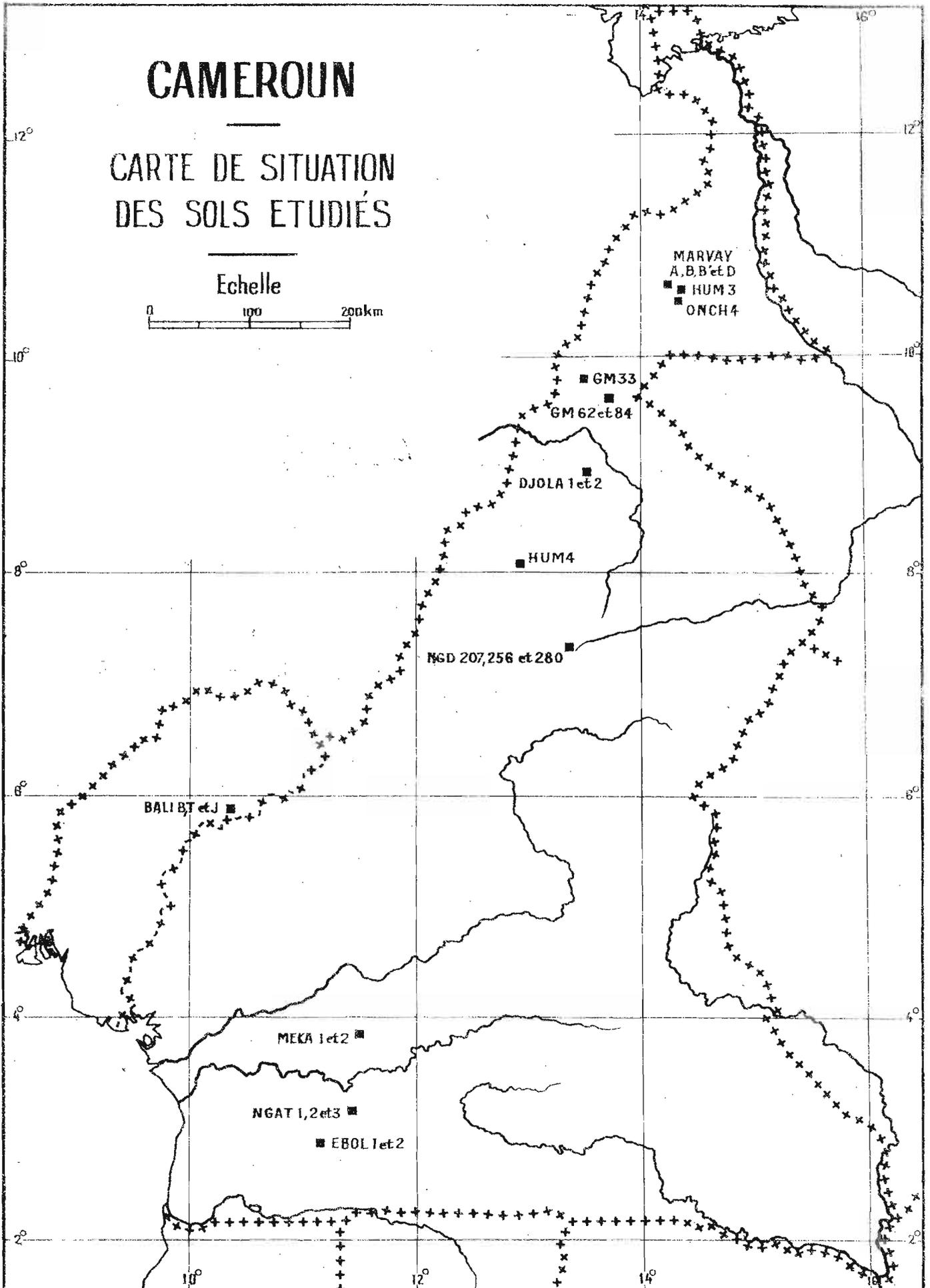
meilleure :
$$\frac{\Delta dh}{dh} = \frac{\Delta Ph}{Ph} + \frac{\Delta (V_1 - V_0)}{(V_1 - V_0)} = 0,8 \text{ à } 2,4 \%$$

donc Δdh peut descendre à 0,01 dans les meilleures conditions.

L'incertitude sur d est augmentée encore par l'intermédiaire de p_1 si l'on effectue, pour doser l'humidité, un seul prélèvement commun à plusieurs mesures. Par exemple 10 prélèvements en différents points d'un même horizon ont donné les humidités suivantes : 13,3 - 13,6 - 13,6 - 13,8 - 14,2 - 14,2 - 14,3 - 14,4 - 14,5 - 14,8 (moyenne 14,1 % avec écart maximum 1,5 %).

Il est donc recommandé de tracer la courbe moyenne des densités humides et la courbe moyenne du profil hydrique précis pour calculer la densité en sec à partir de ces données afin d'éliminer ces facteurs d'hétérogénéité liés à l'échantillonnage.

Figure 3



CHAPITRE III

LES SOLS ETUDIÉS

Les mesures de densité apparente in situ à l'aide du densitomètre à membrane ont porté sur 24 profils du Cameroun représentant :

- 4 Sols Ferrallitiques jaunes.
- 5 Sols Ferrallitiques rouges.
- 2 Sols Ferrugineux Tropicaux.
- 2 Sols Rouges Tropicaux.
- 3 Vertisols.
- 1 Interfluve halomorphe et lessivé.
- 2 Sols hydromorphes.
- 1 Sol brun.

La situation géographique de ces profils est indiquée sur la figure 3.

31/ LES SOLS FERRALLITIQUES

Les sols Ferrallitiques de cinq régions différentes du Cameroun ont été étudiés. Ce sont du Sud au Nord, en climat sub-équatorial d'abord, les séquences d'EBOL-EBOLOWA (2 profils jaunes), de NGAT-MBALMAYO (2 jaunes), MEKA-YAOUNDE (1 rouge et 1 jaune) puis en climat tropical humide d'altitude les sols de BALI-NDOP (2 rouges et 1 jaune) et de NGD-NGAOUNDERE (2 rouges).

Les coordonnées géographiques et climatiques de ces cinq emplacements sont :

EBOL-EBOLOWA	: Lat. 2°40'	pluviométrie	: 1900 mm
	long. 11°08'	température	: 23°3
	Alt. 630 m		
NGAT-MBALMAYO	: Lat. 3°25'	pluviométrie	: 1540 mm
	Long. 11°33'	température	: 23°4
	Alt. 680 m		
MEKA-YAOUNDE	: Lat. 3°47'	pluviométrie	: 1600 mm
	Long. 11°31'	température	: 23°5
	Alt. 700 m		
BALI - NDOP	: Lat. 5°51'	pluviométrie	: 1700 mm
	Long. 10°23'	température	: 20°2
	Alt. 1210 m		

NGD - NGAOUNDERE	: Lat.	7°25'	pluviométrie	: 1600 mm
	Long.	13°26'	température	: 22°2
	Alt.	1100 m		

L'étude porte donc sur 11 profils dont 6 jaunes et 5 rouges. Les mesures de terrain ont été effectuées au cours de la première saison des pluies à EBOL, NG AT et MEKA, en fin de saison des pluies à BALI et en début de saison des pluies à NGD. Toutes les densités apparentes mesurées caractérisent donc un sol fortement humidifié sauf en NGD peut-être.

La séquence jaune d'EBOL est placée sur un granite calco-alcalin à biotite et pyroxène, la séquence jaune de NGAT sur les schistes de Mbalmayo à chlorite, muscovite et quartz d'exsudation, la séquence rouge et jaune de MEKA sur l'embréchite grenatifère à deux micas de Yaoundé.

Les trois profils BALI dérivent de trois matériaux différents garnissant le même interfluve : BALI-B est un sol rouge sur basalte à olivine, BALI-T est un sol rouge sur granite et BALI-J un sol jaune sur des colluvions de bas de pente.

Les deux profils rouges NGD 256 et 207 dérivent, le premier d'un basalte à olivine, le second de projections granitiques et argileuses sur le pourtour d'un cratère d'explosion phréatique.

Ces onze profils présentent les caractéristiques morphologiques suivantes :

1/ Séquence EBOL :

EBOL 1 désigne un profil épais, jaune (10 YR 7/6) situé au sommet d'un petit interfluve représentatif de la plantation de l'I.F.C.C. à Nkoemvon. La végétation est une forêt ancienne. Des blocs de latérite résistante apparaissent à 4,8 m de profondeur. Cette cuirasse est annoncée par un horizon bariolé rouge et jaune qui débute à 3,2 m et qui est lui-même précédé depuis 2,0 m d'une zone à taches ocres.

EBOL 2 désigne un profil jaune (10 YR 7/6) situé sur une pente de 20 % à 100 m à l'Ouest d'EBOL 1 et toujours sous forêt. La latérite débute à 2 m de profondeur et se termine à 4,4 m où elle fait place à un horizon d'altération rougeâtre non étudié. Elle est formée d'abord de concrétions ferrugineuses emballées dans une matrice jaune puis d'une parapaoc à matrice plus rouge.

La séquence ferrallitique EBOL entre dans la sous classe des sols fortement désaturés d'après les travaux de CURIS et CLAISSE. Elle présente cependant des caractères morphologiques propres qui la distinguent des autres sols Ferrallitiques jaunes rencontrés et étudiés : Scs deux profils présentent en effet dans les premiers décimètres sous l'horizon humifère une structure fortement développée en petits polyèdres plus ou moins fragiles qui n'adhèrent pas entre eux de sorte que cette partie du sol s'écroule au premier contact (horizon 7 - 16 cm en EBOL 1 et 7 - 30 cm en EBOL 2). En dessous la fragilité de l'assemblage est encore notable (16 - 50 cm en EBOL 1 et 30 - 100 cm en

EBOL 2) puis on observe une brusque augmentation de la cohésion bien que la structure reste bien développée. A signaler enfin des luisances blanchâtres dans les premiers décimètres du profil.

La pente générale de l'interfluve est convexe jusqu'au bas de pente qui présente une inflexion sur laquelle le sol porte la marque de cisaillements obliques qui livrent la matière du solum au fond plat du talweg.

2/ Séquence NGAT :

NGAT 1 désigne un profil épais de haut d'interfluve, d'abord jaune (10 YR 6/6 puis 7,5 YR 5/6) puis bariolé en rouge et jaune dès 70 cm de profondeur. Ce bariolage s'estompe ensuite, puis s'affirme de nouveau entre 2,0 et 4,0 m où débute une carapace gravillonnaire non perforée.

NGAT 2 désigne, sur une pente de 10 %, à 150 m de NGAT 1, un profil d'abord jaune (7,5 YR 5/6) puis taché de rouge et jaune entre 45 et 80 cm de profondeur, puis bariolé jusqu'à 1 m. Un horizon grossier épais de 90 cm, bouillant sur les premiers décimètres et formé de quartz et de concrétions à matrice rouge (5 YR 5/6) s'observe alors jusqu'au schiste ferruginisé qui a été creusé jusqu'à 3,5 m.

La séquence NGAT entre dans la sous-classe Fortement Désaturée (appauvris). Ses profils 1 et 2 trouvent leur place respectivement dans les sous-groupes hydromorphe et remanié. Ces deux profils présentent comme à EBOL des luisances blanchâtres à la partie supérieure.

La végétation est une jachère ancienne en NGAT 1 et une forêt secondaire en NGAT 2. Une brusque inflexion de pente termine vers le bas la portion ferrallitique de l'interfluve au contact avec un bas-fond hydromorphe dont un profil, NGAT 3 qui a pu être étudié en saison sèche, sera présenté ci-dessous (chapitre V 7).

3/ Séquence MEKA

Cette séquence a été étudiée en collaboration avec J.L. PELLIER en 1969. De nouvelles mesures y ont été effectuées à la saison sèche 1970 pour chiffrer l'amplitude des variations saisonnières et préciser l'hétérogénéité densimétrique de ses horizons.

MEKA 1 est un épais sol rouge (2,5 YR puis 10 R 4/6) peu différencié de haut de pente qui présente à 4,2 m un horizon gravillonnaire non traversé. La végétation est une forêt très secondarisée.

MEKA 2 est un sol jaune (10 YR 5/6 puis 7,5 YR 5/8) présentant de 1 m à 1,3 m de profondeur un horizon gravillonnaire bouillant puis une carapace baignant dans la nappe à 2,8 m.

La séquence ferrallitique MEKA est fortement désaturée en cations et ses profils 1 et 2 sont respectivement typique-modal et appauvri-jaune-induré.

INTERFLUVE BALI

Cet interfluve a été soumis peu d'années avant l'étude à une culture en billons qui laisse subsister de légères ondulations. La végétation est une savane arbustive.

Le sol BALI-B sur basalte est placé sur la pente Est et présente une épaisse masse argileuse meuble de couleur rouge (10 R 3/6) qui repose à 6,0 m de profondeur sur un horizon gravillonnaire non traversé.

Le sol BALI-T sur granite est placé sur la pente Nord et présente aussi une épaisse couche argileuse meuble d'abord rouge (2,5 YR 4/7) puis bariolée à partir de 1,6 m. Quelques cailloux à 2,5 m.

Le sol BALI-J est un sol développé sur les colluvions fines de bas de pente, sur le versant Sud. Sa couleur est brun-jaune (7,5 YR 5/4) jusqu'à 1,2 m où débute un horizon bariolé rouge et blanc.

Les sols BALI B et T participent à la sous-classe Ferrallitique Fortement Désaturée, groupe typique modal. Le caractère ferrallitique du sol BALI-J qui est moyennement désaturé, rajeuni et hydromorphe est moins développé (BARBERY 1970).

INTERFLUVE NGD

Le sol sur basalte NGD 256 est situé sous une forêt relique préservée du surpâturage. Il est en haut d'interfluve, à proximité d'affleurements de cuirasse latéritique. Sa partie friable et argileuse de couleur rouge (10 R 3/6) est très riche en pseudo-sables (60 %) et soumise à un fort retrait par dessiccation. Elle est épaisse de 2 m puis sert de matrice à un horizon de basalte ferruginisé. Au contact on observe une couche violacée extrêmement friable épaisse d'un ou deux décimètres. Vers 5,5 m le basalte toujours emballé dans une matrice argileuse rouge devient bleuté et cassable à la main.

Le sol NGD 207 est situé sur le talus de projections du cratère d'explosion de DIDANGO vaste, ancien et étalé. Son matériau qui débute à 5,5 m est formé d'un mélange de fragments de granite et d'argiles lacustres. Le sol est meuble et argileux, de couleur rouge 5 YR 5/8 puis 2,5 YR 4/6. Un niveau plus riche en sables quartzeux s'y observe vers 2,5 m. La surface du sol, sous savane arbustive, est tassée par le passage des bovins.

Les sols rouges NGD 256 et 207 sont fortement désaturés, typiques modal et appauvri. Ils peuvent être comparés respectivement à BALI-B et BALI-T. Tous les quatre mais surtout les sols sur basalte, sont riches en pseudo-particules ou en petits agrégats sphéroïdaux résistants (HUMBEL 1967).

3 - 2 LES SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX

Les deux sols Ferrugineux Tropicaux étudiés sont situés l'un GM 33, à DJORNOMO à 65 km au Nord de GAROUA, l'autre à DJOLA (2 profils) à 17 km au Sud de la Benoué. Le climat est tropical soudanais. Le premier a été étudié en pleine saison sèche, le second en saison des pluies.

Leurs coordonnées sont :

GM 33	Lat.	9°41'	pluviométrie	927 mm
	Long.	13°26'	température	28°
	Alt.	360 m	roche-mère :	granite.
DJOLA	Lat.	9°13'	roche-mère : grès de Garoua du	
	Long.	13°30'	crétacé Supérieur (quartzeux à	
	Alt.	300 m	ciment argileux et ferrugineux)	

Le profil GM 33 est situé sur le sommet d'un vaste interfluve soumis à l'érosion en nappe (savane arborée). Il comporte les horizons suivants :

- 0 - 4 cm . A1 : gris sableux lamellaire poreux .
- 4 - 15 cm . A21 : gris rosé, sableux, continu, poreux.
- 15 - 25 cm . A22 : brun avec taches rouille, sableux, poreux.
- 25 - 80 cm . Bt : rouge jaune 5 YR 5/8 progressivement argilo-sableux (maximum : 35 - 3 - 12 - 10 - 40 % à 80 cm).
- 80 - 115 cm . B1 de fer:bariolé jaune 10 YR 7/6 et rouge, polyédrique, sablo-argileux avec quelques concrétions.
- 115 - 140 cm . B2 de fer : bariolé en plages de plusieurs centimètres, concrétions noires, sablo-argileux, polyédrique.
- 140 - 155 cm . G : Même horizon mais cailloux de granite et de quartz.
- 155 - 250 cm . BC : polychrome beige, blanc, rouille et noirâtre, sablo-argileux, avec quelques concrétions autour de minéraux ferro-magnésiens, continu, dur.

Son pH est voisin de 6 et son taux de saturation varie de 50 % (horizon lessivé) à 70 % (horizons humifère et B). Ce profil caractérise un sol Ferrugineux Tropical Lessivé à concrétions sur granite.

Le sol DJOLA comprend deux profils l'un, DJOLA 1, en haut d'un glacis commandé par un relief gréseux, l'autre, DJOLA 2, vers le bas de pente avant le passage aux sols Hydromorphes.

Le profil DJOLA 1 présente les horizons suivants :

- 0 - 10 cm. A11 : 5 YR 5/2 sableux, massif, tassé avec radicules, bulbes et graviers.
- 10 - 20 cm. A12 : 5 YR 3/4, sablo-graveleux, massif ou polyédrique, enclaves rougeâtres.
- 20 - 27 cm. : Transition.
- 27 - 60 cm. AB : Argilo-sableux avec graviers quartzeux.
- 60 - 150 cm. B2t : 2,5 YR 4/6, argilo-sableux, polyédrique, caviteux, (13 % de graviers).

- 150 - 200cm. : M^eme horizon mais plus caviteux, logements lissés des sables.
- 200 - 230cm. G : Horizon grossier (grès et quartz) avec 55% de matrice sablo-argileuse;
- 230 - 320cm. Bfe: Taches jaunes et blanches, sablo-argileux, polyédrique, cavités, luisances.

Le profil DJOLA 2 présente les horizons suivants :

- 0 - 18cm. A1 : 5 YR 3/3 et 3/1, totalement sableux et particulaire, aspect hydromorphe,
- 18 - 40 cm. A21: 5 YR 4/3, sableux, boulang, plages noirâtres.
- 40 - 70cm. A22: 5 YR 4/6 sableux, boulang, poreux, radicelles.
- 70 - 90cm. : Transition.
- 90 - 136cm. B1 : 2,5 YR 4/6, sablo-argileux, peu polyédrique.
- 136 - 158cm. B2 : 2,5 YR 4/8, sablo-argileux, polyédrique, poreux (racines, cavités)
- 158 - 210cm. Bg : Pseudogley bariolé, sablo-argileux, fondu.
- 210cm. : Nappe phréatique.

3 - 3 LES VERTISOLS

Deux vertisols ont été étudiés en fin de saison des pluies, ce sont ONCH 4 et MARVAY B', situés dans la région de Maroua, le premier, développé sur les alluvions de la cuvette tchadienne, est épais et à mauvais drainage externe, le second associé à des sols halomorphes sur granite est lithomorphe et peu épais. Le troisième GM 84, vertisol lithomorphe de la région de Garoua a été étudié en pleine saison sèche. Il est associé à des sols rouges tropicaux (GM 62) et à des sols peu évolués.

Leurs coordonnées sont :

ONCH 4	MARVAY B'	
Lat. 10°30'	10°43'	Climat : Soudano-Sahélien
Long. 14°14'	14°09'	Pluviométrie : 804 mm
Alt. 410 m	525 m	Température : 28°5
	GM 84	
	Lat. 9°31'	Climat : Tropical-Soudanais
	Long. 13°41'	Pluviométrie : 927 mm
	Alt. 280 m	Température : 28°

ONCH 4 présente un horizon A₁ de 20 cm environ à structure prismatique fine puis un horizon B vertique de structure fondue (saison des pluies) peu carbonaté, étudié jusqu'à 1,80 m.

En MARVAY B' la roche-mère apparait sous forme de boules dès 90 cm de profondeur. Le profil est carbonaté presque jusqu'en surface mais une accumulation de nodules jaunâtres s'observe entre 70 à 90 cm de profondeur. Ce profil humide présente les horizons suivants :

- 0 - 12cm. A1 : sableux, lamellaire puis prismatique - ligne de cailloux à la base.
- 12 - 70cm. B : verticale polyédrique argilo-sableux.
- 70 - 90cm. B2o : enrichi en nodules carbonatés.
- 90 - 110cm. BC : mélange des horizons encaissants.
- 110 - 170cm. : Roche résistante.

GM 84 présente les horizons suivants :

- 0 - 4cm. A1 : gris, sablo-argileux avec quelques graviers finement cubique.
- 4 - 40cm. B : verticale sablo-argileux avec quelques graviers, prismatique puis en plaquettes obliques, nodules, quelques petites concrétions noires.
- 40 - 80cm. B2C : Accumulation de petits nodules carbonatés, matrice polyédrique.
- 80 - 90cm. G : grossier, quartz, feldspaths, fragments de roche.
- 90 - 180cm. C : roche altérée.

3 - 4 LES SOLS ROUGES TROPICAUX

Deux sols ont été étudiés, l'un HUM 3 à MAROUA en fin de saison humide, l'autre GM 62 près de GAROUA en saison sèche.

Leurs coordonnées sont :

HUM 3 : Lat. 10°39' Long. 14°17' Alt. 500 m Climat de ONCH 4.

GM 62 : Les mêmes que le vertisol GM 84.

HUM 3 dérive d'une roche basique verte à grain fin, d'origine vulcano-métamorphique. Il est situé sur la forte pente (50 %) d'un massif, sous savane arbustive. 70 % de la surface du terrain est couverte de débris de roche et d'affleurements rocheux.

On note les horizons suivants :

- 0 - 15cm. A1 : 5 YR 4/2 graveleux à matrice sablo-argileuse, quelques polyèdres, radicelles.
- 15 - 25cm. AB : 3,75 YR 4/3 gravele-sablo-argileux fortement polyédrique.
- 25 - 55cm. B2 : 2,5 YR 3/6 argilo-sableux (30 % de pseudo-sables), encore des cailloux, fortement polyédrique.
- 55 - 90cm. BC : Roche altérée dont les joints sont colmatés par l'argile rouge.
- 90 - 170cm. C : Roche altérée friable.

GM 62 dérive comme GM 84 d'un gneiss embrèchite ; il est placé au sommet d'un petit interfluve, sous savane arbustive, avec affleurements rocheux et cultivé. Il présente les horizons suivants :

- 0 - 5cm. A p : 5 YR 3/3 sablo-argileux (peu de graviers) lamellaire puis polyédrique.
- 5 - 40cm. B2 : 2,5 YR 3/5, argilo-sableux, quartz et feldspaths, fortement polyédrique à surstructure prismatique.
- 40 - 50cm. B3 : encore rouge et polyédrique, grands feldspaths.
- 50 - 70cm. BC : de roche altérée à joints remplis d'argile rouge.
- 70 - 150cm. C : roche altérée friable, litée verticalement.

3 - 5 LE SOL BRUN MESOTROPHE

Le profil NGD 280, situé sur le plateau de l'Adamaoua dérive d'un basalte à olivine qui a subi antérieurement la ferrallitisation puis a été rajèuni par une explosion phréatique. L'horizon C mis à l'affleurement a évolué en un sol Brun qui n'est pas saturé en cations et où les morceaux de roche sont friables. L'étude a été faite au début de la saison des pluies. Ses coordonnées sont :

Lat.	7°23'	Climat :	Tropical humide d'altitude
Long.	13°27'	Pluviométrie :	1575 mm
Alt.	1110 m	Température :	22°2

On y distingue les horizons suivants :

- 0 - 10cm. A1 : 5 YR 4/3, argileux à pseudo-sables, petits cailloux, fortement polyédrique.
- 10 - 25cm. BB : 5 YR 4/4, fortement polyédrique, quelques concrétions.
- 25 - 70cm. (B) : Argileux à pseudo-sables, polyédrique puis nuciforme, fissuré.
- 70 - 240cm. BC : basalte gris bleuté, friable à la main (40 %) réparti en parallélépipèdes dans une matrice grumeluse brune argileuse.

3 - 6 LES SOLS HALOMORPHE ET LESSIVE

Les profils MARVAY A et B respectivement halomorphe lessivé et lessivé halomorphe caractérisent avec le vertisol MARVAY B' et le sol Peu évolué lessivé MARVAY D un interfluve classé en Sol gris tendant vers les sols Halomorphes (SEGALEN 1962) au Nord-Ouest de Maroua (voir coordonnées en MARVAY B').

MARBAY A est en sommet d'interfluve. Ses horizons sont :

- 0 - 8cm. A1 : gris sableux, acide, lamello-vésiculaire puis massif.
- 8 - 12cm. A2 : blanchi sableux, acide, polyédrique corrodé, s'excavant.
- 12 - 20cm. B1 : 10 YR 5/3, sablo-argileux, finement cubique encore acide bien que contenant 2 méq. % de sodium échangeable. Revêtements sombres d'argile.
- 20 - 45cm. B2 : 10 YR 5/2 argilo-sableux, feldspaths, massif à polyédrique, de pH 8,4 (sodium) - Revêtements d'argile.
- 45 - 90cm. B2c : carbonaté et nettement sodique (Na/T = 18 %) argilo-sableux.
- 90 - 130cm. BC : mélangeant les horizons qui l'encadrent.
- 130 - 210cm. C : roche altérée feldspathique avec poches sablo-argileuses, fortement sodique (27 %).
- 210 - 300cm. : Roché dure.

MARVAY B caractérise une inflexion de pente à quelques mètres du talweg. Latéralement il est remplacé par un vertisol (MARVAY B'). Ses horizons sont :

- 0 - 2cm. A11 : 10 YR 6/1,5 avec filets rouille; sableux, lamellaire.
- 2 - 8cm. A12 : 10 YR 6/3 taches grises et rouille, sableux, polyédrique, radicelles.
- 8 - 22cm. A21 : 10 YR 6/4 sableux, quelques quartz, gros polyèdres, poudrage des sables.

- 22 - 28cm. A22 : 10 YR 7/2 sableux, polyèdres et prismes à surface poudreuse.
- 28 - 30cm. A'2 : 10 YR 8/1 sables et graviers libres et poudreux=ligne blanche bouillante.
- 30 - 38cm. AB : 10 YR 6,5/1 argilo-sableux, colonettes à calotte vésiculaire blanchie.
- 38 - 58cm. (B) : 10 YR 5/2 presque argilo-sableux massif à polyédrique, revêtements, Na/T = 11 %.
- 58 - 84cm. B2 : 2,5 YR 6/2, nodules carbonatés feldspaths fortement polyédrique, pH basique.
- 84 - 100cm. BC : Bariolé, sableux, nombreux feldspaths, taches rouille, polyédrique.
- 100 - 130 cm. C : Grosses boules de roche emballées dans une matrice grise.
- 130 - 180cm. : Roche dure.

MARVAY D est un sol peu épais de bas de pente avec affleurements rochers.

Ses horizons sont :

- 0 - 8cm. A1 : Gris, sableux, 1 % de matière organique.
- 8 - 20cm. A21 : Gris blanc sableux avec quelques quartz, polyédrique, bouillant.
- 20 - 22cm. A22 : Ligne blanche s'excavant au doigt, sableuse et poudreuse.
- 22 - 27cm. B2 : Colonettes grises à calotte blanche et poudreuse, argilo-sableux.
- 27 - 45cm. (B) : Petits prismes feldspathiques tachés de rouille, argilo-sableux.
- 45 - 55cm. BC : Roche altérée peu argilisée
- 55 - 70cm. (C) : Boules de roche résistantes à cortex rouille.

Tout le sol est acide, le lessivage y est bien marqué (ligne blanche poudreuse et colonettes).

3 - 7 LES SOLS HYDROMORPHES

Le sol NGAT 3 caractérise le bas fond, saisonnièrement engorgé, commandé par la séquence Ferrallitique NGAT 1-2 (voir chap. III 1). Etude en saison sèche.

Le sol HUM 4 est un sol Hydromorphe Minéral Lithomorphe Lessivé (MARTIN 1969) situé au Sud de la chaîne de POLI, comportant de haut en bas un horizon travaillé par les vers, un horizon taché par hydromorphie, un horizon concrétionné, un horizon carbonaté, un horizon vertique, un horizon friable d'altération. Ses coordonnées sont :

Lat. 8°08'	Climat : Tropical humide
Long. 13°13'	Pluviométrie : 1477 mm
Alt. 430 m	Température : 25°5

- Etude en fin de saison sèche.

NGAT 3 présente les horizons suivants :

- 0 - 7cm. A1 : Noirâtre, humifère (4,7 %) sableux, particulière, litière épaisse.
- 7 - 15cm. AB : Gris sableux, fondu, un peu taché.
- 15 - 50cm. Bg : Pseudo-gley brun à taches rouille, sableux fondu.
- 50 - 150 cm. BG : Gley gris clair, engorgé, pâteux, sablo-argileux.

Ce sol est acide pH < 5, pauvre en fer total (0,7 %) désaturé en cations échangeables (20 %). C'est un sol hydromorphe minéral à gley sur colluvions sablo-argileuses.

HUM 4 est situé près du sommet d'un vaste interfluve parcouru par des collecteurs faiblement imprimés, sous savane arborée. La roche-mère est un gneiss à biotite et amphibole. Les turricules construits par les vers hérissent toute la surface du sol qui en plus est ondulée. Ses horizons sont :

- 0 - 15 cm. A1 : 10 YR 5/2 sableux, très caviteux, sphéroïdes mamelonnés et zones massives, graminées.
- 15 - 45 cm. ABg : 10 YR 5,5/2 + taches rouille, sableux, massif, radicelles verticales.
- 45 - 60 cm. B2Fe : Pétri de petites concrétions ferrugineuses, matrice 10 YR 6/3 sablo-argileuse.
- 60 - 65 cm. (B) : Argileux avec quelques concrétions.
- 65 - 90 cm. B2c : Gros nodules carbonatés presque jointifs dans une matrice argileuse.
- 90 - 180 cm. (B) : Tendence verticale (45 % d'argile puis décroissance) prismes et nodules.
- 180 - 260 cm. BC : Roche friable, en place, avec plans d'argilisation, quelques carbonates.
- 260 - 320 cm. C : Roche altérée friable, architecture conservée.

Le pH devient nettement basique vers 90 cm - sodium échangeable dans l'altération.

C H A P I T R E IV

REFLEXIONS SUR LES FACTEURS DENSIMETRIQUES

41/ DEMARCHE DU RAISONNEMENT

Devant une variation de densité apparente il faut d'abord déterminer si elle est due à une variation de densité réelle ou à une variation de porosité globale. Pour cela on calcule la porosité (P') à partir des densités réelle (D) et apparente (d) : $P' = (D - d)/D$.

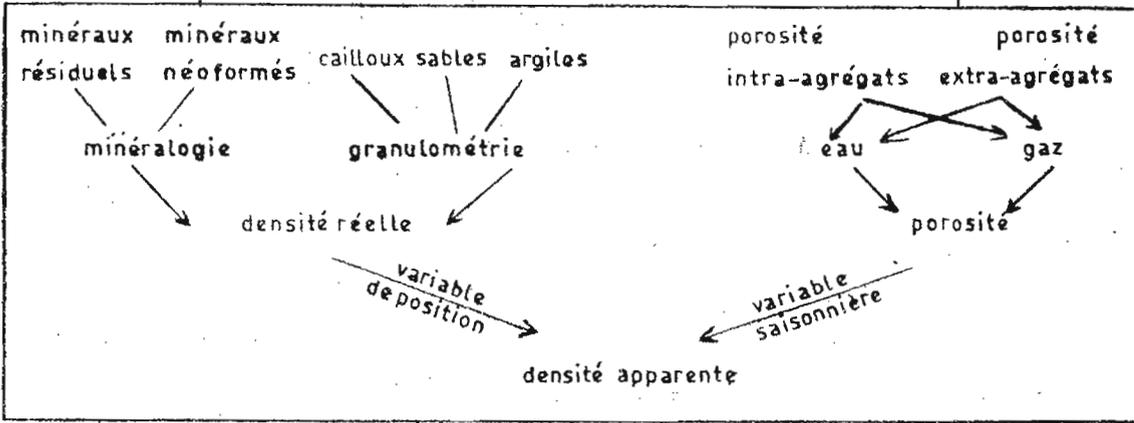
Si le pic exo ou endo étudié disparaît sur la courbe de porosité calculée c'est qu'une variation de densité réelle en était responsable. Reste à savoir si c'est un changement de minéralogie ou de granulométrie qui en est la cause. On examine alors le profil granulométrique : S'il est stable l'origine de la variation étudiée est minéralogique et il faut recourir à une séparation des minéraux ainsi qu'à une analyse semi-quantitative des matières fines (rayon X, A.T.D.).

Si le pic persiste sur la courbe de porosité calculée c'est que la porosité globale du sol a été modifiée. Il importe alors de savoir quelle forme de porosité incriminer : Si c'est la porosité interne des agrégats l'anomalie doit se répercuter sur la courbe de porosité mesurée sur mottes. Sinon c'est une autre échelle de porosité qui est à considérer : fentes de retrait, cavités de faune, développement racinaire, type ou degré de développement de la structure etc. On interroge alors le profil morphologique par une revue des facteurs densimétriques susceptibles d'intervenir.

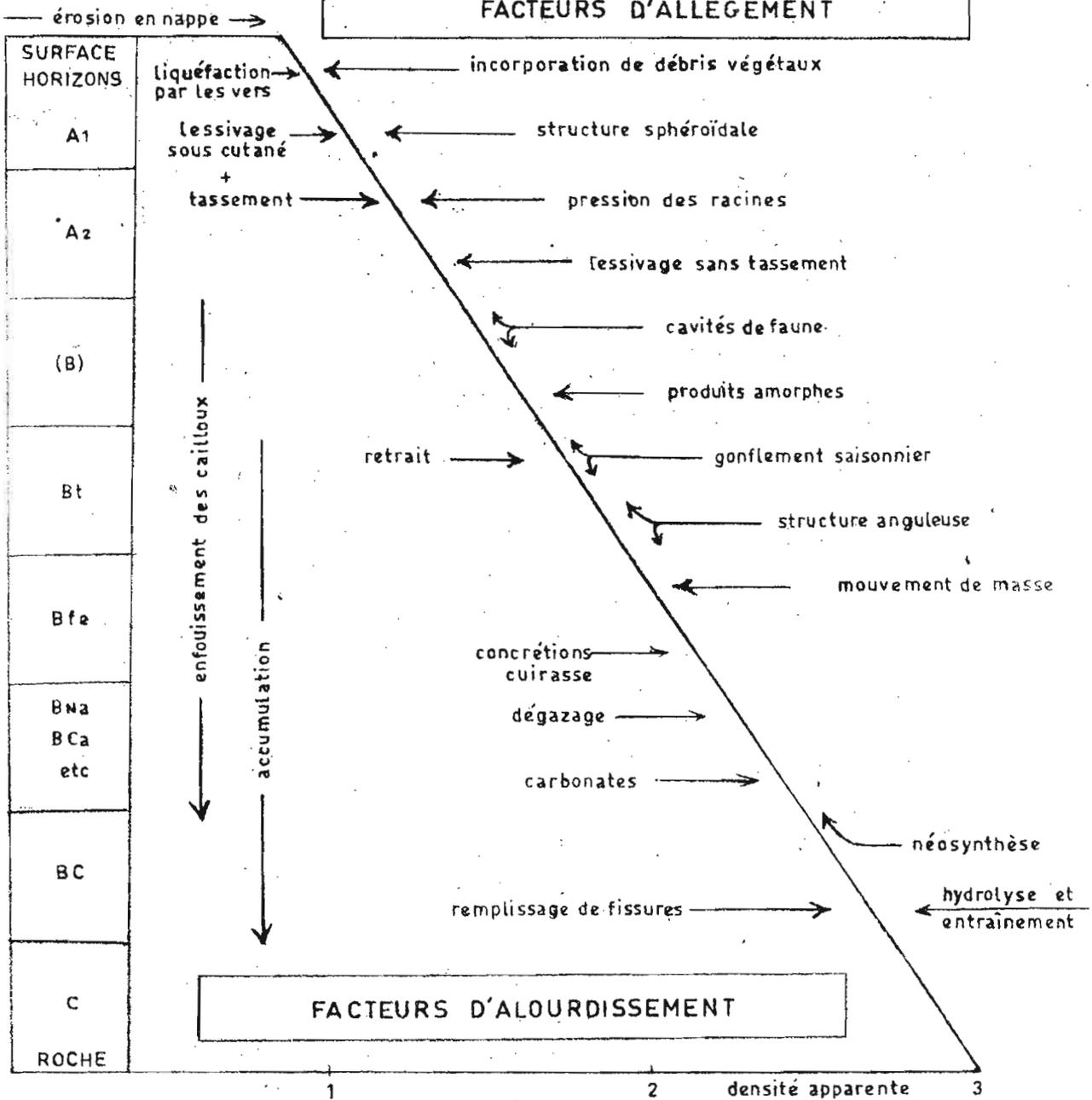
Dans les sols caillouteux il est souvent utile de considérer séparément la densité apparente hors cailloux qui renseigne sur les variations propres à la matière fine.

Cette démarche dichotomique schématisée page (17) n'a pas fourni d'explication satisfaisante à plusieurs variations de densité apparente révélées par les profils densimétriques et attestées par de nombreuses répétitions. C'est que certaines données, minéralogiques surtout, faisaient défaut ou que les observations morphologiques, insuffisamment précisées par des tests chiffrés effectués systématiquement de haut en bas du profil, présentaient des lacunes. Les variations densimétriques observées n'en existent pas moins et traduisent des particularités du sol intéressantes à étudier.

DÉMARCHE DICHOTOMIQUE



FACTEURS D'ALLÈGEMENT



42/ LES FACTEURS DENSIMÉTRIQUES :

La densité apparente des sols étudiés varie de 0,5 à 2,0, celle des roches dont ils proviennent est comprise entre 2,5 et 3,0, enfin les minéraux qu'ils contiennent possèdent une densité propre de 2 à 4,5 conférant au sol une densité réelle qui reste comprise entre 2,6 et 3,1 (voir figure 13). Le bilan de la pédogénèse exercée sur les roches est donc nettement en faveur des processus d'allègement. Si ceux-ci exerçaient leur action progressivement depuis la roche saine jusqu'à la surface du sol la courbe de décroissance de la densité apparente serait régulière. Ce qui n'est pas : elle présente au contraire des inflexions de pente séparant des maxima convexe (crochets exo) et des minima concaves (crochets endo). Ceci provient d'une action différentielle de différents facteurs d'allègement à laquelle s'ajoute celle de divers facteurs d'alourdissement relatif d'origine pédogénétique ou hérités. Enfin d'autres facteurs qui créent des variations de densité au sein des horizons eux-mêmes seront appelés facteurs d'hétérogénéité densimétrique.

Voici une énumération des facteurs densimétriques qui ont été envisagés :

421/ FACTEURS D'ALLEGEMENT

- A/ Exportation en solution des produits d'altération des minéraux.
- B/ Néosynthèse de minéraux argileux, de minéraux amorphes hydratés.
- C/ Apparition d'une structure sphéroïdale (pseudo-particules, agrégats arrondis) ou anguleuse permanente.
- D/ Elimination des cailloux par un processus pédologique.
- E/ Creusement de cavités et galeries par la faune avec remontées biologiques.
- F/ Lessivage vertical ou oblique non suivi de tassement.
- G/ Développement de la faune (propre densité faible, activité respiratoire).
- H/ Pression des racines ou des bulbes.
- I/ Gonflement par franchissement de la limite de retrait.
- J/ Incorporation de débris végétaux.
- K/ Travail du sol par l'homme ou les animaux fousseurs.
- L/ Lent mouvement de masse sur une pente.

422/ FACTEURS D'ALOURDISSEMENT

- M/ Formation et accumulation de minéraux ferrugineux, ou carbonatés, colmatage de fissures par argile illuviée.
- N/ Ségrégation de cailloux (stone line, horizon grossier).
- O/ Dégazage par dispersion en milieu sodique ou calciique ou par franchissement des limites de plasticité ou de liquidité (déjections de vers).
- P/ Retrait après dessiccation.
- Q/ Tassement par pression ou effondrement.
- R/ Lessivage des fines suivi d'un tassement ou d'une accumulation relative de fractions lourdes.

Remarques :

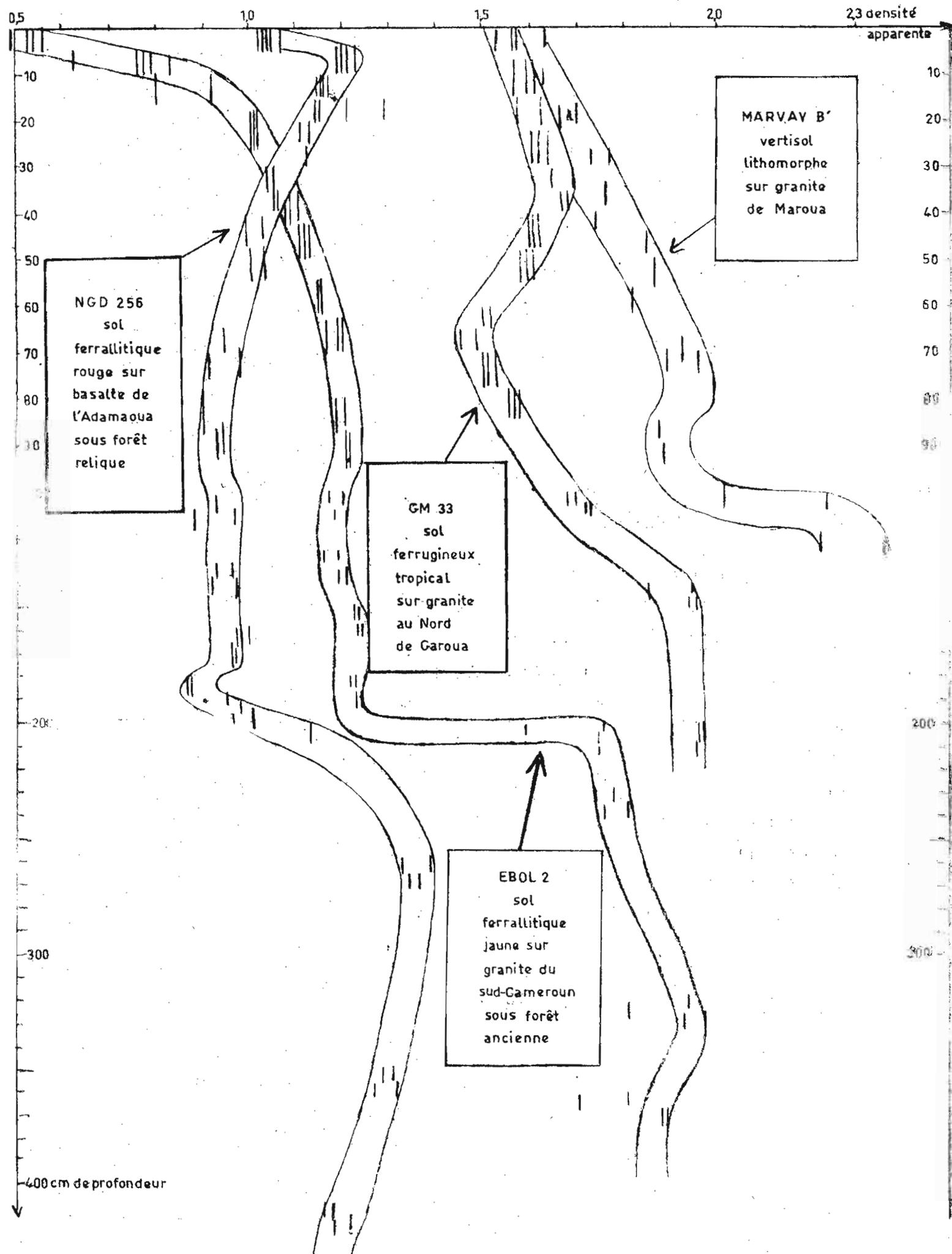
Certains processus provoquent l'allègement d'une partie du sol avec alourdissement d'une autre ou, en d'autres termes, créent une hétérogénéité densimétrique verticale. C'est le cas de la ségrégation des cailloux, du lessivage suivi d'accumulation etc.

D'autres facteurs sont saisonniers comme le franchissement de la limite de retrait qui fait apparaître certaines structures fragmentaires. Toutefois beaucoup de facteurs envisagés ici ne jouent leur rôle que si l'horizon affecté a la possibilité de modifier son volume aux dépens des horizons encaissants ou de l'atmosphère. Enfin presque tous les facteurs densimétriques sont facteurs d'hétérogénéité. Voici les principaux :

423/ FACTEURS D'HETEROGENEITE

- S/ Le travail du sol et le parcours du bétail.
- T/ Les racines et les variations de litière (troncs, branches, brindilles, feuilles).
- U/ Les cavités de faune.
- V/ Le mélange d'horizons encaissants.
- W/ La structure fragmentaire large, la fissuration.
- X/ Les cailloux épars ou en poches (quartz, roches, nodules, concrétions).
- Y/ Les modalités d'accumulation du fer (cuirassement).
- Z/ L'hétérogénéité héritée de la roche et accentuée par l'altération différentielle (boules, filonets etc.).

Figure 4 EXEMPLES DE PROFILS DENSIMÉTRIQUES



Compte tenu de ces particularités on doit s'attendre à des variations de densités en fonction de la saison et aussi de l'échelle de mesure, cm³, dm³ ou m³. Il a été opéré ici à l'échelle du dm³. Il importe donc de décrire pour chaque type de sol les variations de densité apparente en fonction du paramètre profondeur ainsi que l'hétérogénéité propre à chaque horizon à l'échelle de mesure. On doit essayer ensuite de relier ces variations à l'intervention des différents facteurs d'allègement, d'alourdissement et d'hétérogénéité dont l'action relative varie avec le type de pédogénèse. C'est l'objet du chapitre suivant.

Pour interpréter les variations de densité apparente qui ne sont pas dues à un changement de densité réelle il faut éliminer l'influence de celle-ci en calculant la porosité, ou en excluant les cailloux. Ces données permettent ensuite de déterminer la composition volumique du sol à différentes saisons :

43/ LA POROSITE CALCULEE

Si d et D sont les densités apparente et réelle d'un volume unité de sol, le volume occupé par la matière solide séchée à 105° est d/D et par conséquent :

$$P' = (1 - d/D) 100$$

représente le volume disponible pour l'eau et le gaz c'est-à-dire la porosité totale calculée.

P' varie saisonnièrement avec d , il est maximum en saison humide quand d est minimum par suite du gonflement dû au franchissement de la limite de retrait. P' est minimum en saison sèche et peut théoriquement devenir inférieur à l'humidité volumique emmagasinée dans le sol en saison des pluies. C'est pourquoi il est préférable de le mesurer à son maximum c'est-à-dire en fin de saison des pluies.

44/ POROSITE CALCULEE ET POROSITE MESUREE

La porosité calculée P' est en général supérieure à la porosité mesurée sur mottes par imbibition de pétrole (P). La différence $P' - P$ est importante en surface (jusqu'à 30 %) puis diminue rapidement en profondeur (10 % et moins). Pour expliquer cette différence cinq causes ont été envisagées dont quatre indiquent que la porosité mesurée est sous-estimée par rapport à la porosité globale maximum :

- 1/ Dégazage incomplet des mottes dans le pétrole.
- 2/ Le séchage des mottes à 70° néglige l'eau qui part entre 70° et 105° diminuant ainsi le volume mesuré.
- 3/ Les mottes sont étudiées desséchées en dessous de la limite de retrait donc au minimum de porosité.
- 4/ La porosité de mottes de quelques cm³ est inférieure à la porosité globale mieux approchée par la porosité calculée à partir de densités.

La porosité calculée à partir des densités rapportées à la terre séchée à 105° renseigne donc mieux sur la porosité réelle et elle peut valablement être comparée au taux d'humidité volumique ramené lui aussi à la terre séchée à 105°. Toutefois P' est sur-estimé dans l'horizon humifère parce que :

- 5/ Les radicelles et gros débris végétaux, de très faible densité propre, sont éliminés de la mesure de D, certaines matières organiques légères peuvent être détruites par chauffage à 105° et l'eau de constitution de certains produits amorphes légers peut être partiellement évacuée.

Les causes 3, 4 et 5 voient leur influence décroître de haut en bas du profil d'où la diminution concomitante de P' - P.

La part respective de ces cinq causes a été étudiée sur quelques échantillons :

Cause 1/ En maintenant le dégazage sous vide dans la pétrole pendant 20 heures au lieu de 75 à 90 minutes on augmente la porosité mesurée de 0 à 1 %, parfois plus.

Cause 2/ Le départ d'eau entre 70 et 105° est de l'ordre de 1,5 %, exceptionnellement 5 %.

Cause 3/ Le gonflement par humectation (rapport de retrait) lorsqu'il augmente d. de 0,03 augmente P' = $(1 - d/3) / 100$ de 1 %.

Cause 4/ Elle paraît importante et variable selon les sols (fentes béantes, cavités biologiques, racines, bulbes). Calculée par différence elle représenterait jusqu'à 10 % dans les horizons supérieurs.

Cause 5/ 5 %, en volume, de débris végétaux de densité 0,5 feraient passer la densité réelle de 3 à 2,875 diminuant ainsi P' de 2,5 %.

En pratique la porosité calculée a été prise comme référence pour juger du degré d'aération ou d'asphyxie du sol, en tenant compte que sa valeur est légèrement sur-estimée dans l'horizon supérieur. Il semble qu'on puisse considérer qu'il existe des conditions locales d'asphyxie lorsque la différence entre porosité calculée et humidité volumique descend en dessous de 10 % ou lorsque cette humidité devient supérieure à la porosité mesurée sur mottes.

La détermination de la porosité calculée est nécessaire à l'interprétation des courbes de densité apparente car elle permet de détecter les cas où les variations de densité apparente (tassement par exemple) ne sont pas dues à un changement de minéralogie ou de granulométrie ayant modifié la densité réelle.

45/ TRAITEMENT DES HORIZONS CAILLOUX

Soient Ph et Ch respectivement le poids de terre fine et le poids de cailloux contenus dans un volume unité. La densité globale est :

$$dh = Ph + Ch \quad \text{et} \quad d = P + C$$

P et C étant les poids de ces matériaux séchés à 105°, dh et d respectivement la densité en humide et en sec.

Du fait de la densité généralement élevée des cailloux cette densité globale dépend du pourcentage de cailloux dont les variations ne sont guère significatives. On peut donc désirer connaître la densité apparente de la terre fine seulement ou densité "hors cailloux".

Soient d'h et d' les densités apparentes des cailloux, en humide et en sec. La densité des parties fines f s'exprime par :

$$fh = Ph / (1 - Ch/d'h) \quad \text{et} \quad f = P / (1 - Ch/d'h)$$

L'humidité pondérale H' (ou l'humidité volumique H'v) contenue dans les cailloux n'est pas toujours négligeable :

$$H' = (Ch - C) / C \quad H'v = d'H' \quad \text{avec} \quad d'h = d' + H'v/100$$

L'humidité volumique globale est alors :

$$H'vP/f + H'vC/d' = H.P + H'C$$

H étant le taux pondéral d'humidité des parties fines.

La porosité calculée d'un horizon caillouteux s'exprime par P' tel que :

$$P'/100 = 1 - (P/D) - (C/D')$$

où D est la densité réelle de la matière fine et D' la densité réelle de la matière des concrétions.

Exemple 1/ Les concrétions de EBOL 2 (à 3,8 m de profondeur)

Ph =	0,850 kg	Ch =	1,350 kg
P =	0,675 kg	C =	1,195 kg
H =	25,8 %	H' =	11,3 %
f =	1,48	d' =	2,19
fh =	1,86	d'h =	2,47
Hv =	38 %	H'v =	28 %
D =	2,7	D' =	2,75

- d'où - humidité volumique globale : $17,4 + 13,4 = 30,8 \%$
- densité apparente globale d = 1,87 et dh = 2,20
- porosité calculée P' = $(1 - 0,25 - 0,435)100 = 31,5 \%$
- refus volumique : $64 \% \times 1,87/2,75 = 43,5 \%$

Exemple 2/ Les cailloux de HUM 3 (0-5 cm)

Ph =	0,945 kg	Ch =	1,256 kg
P =	0,824 kg	C =	1,183 kg
H =	14,7 %	H' =	5,7 %
f =	1,73	d'h =	2,39
fh =	1,98	d' =	2,26
Hv =	25 %	H'v =	13 %
D =	2,9	D' =	2,8

- d'ou - humidité volumique globale : $12,1\% + 6,7\% = 18,8\%$
- densité globale sèche : 2,01, humide 2,20
- porosité calculée P' = $1 - 0,285 - 0,424 = 29,1 \%$
- refus volumique Rv = $65 \times 2,01/2,8 = 47 \%$

4.6./ CALCUL DE LA COMPOSITION VOLUMIQUE

Soient R le refus et A le taux pondéral d'argile, limon ou sable hors refus. Refus inclus le taux pondéral devient : $A (100-R)/100$. Si D est la densité réelle de la matière de A et d la densité apparente de l'horizon le pourcentage de l'unité de volume occupé par cette matière est appelé son taux volumique A_v :

$$A_v = A (100-R) d/100 D$$

Cas particuliers

1/ Le taux volumique du refus R est :

$$R_v = R.d/D$$

ou si R est composé des phases minéralogiques R_1, R_2, \dots, R_i de densités D_1, D_2, \dots, D_i on a

$$R_v = d \sum R_i/D_i$$

2/ Le taux volumique d'humidité est :

$$H_v = H.d = (dh-d)100$$

où H est le taux pondéral d'humidité et $dh = d (100-H)/100$ la densité humide. Cette humidité volumique est calculée graphiquement à partir des courbes moyennes de d et dh afin d'éliminer les variations dues à l'hétérogénéité densimétrique.

3/ La porosité mesurée sur mottes et la porosité calculée à partir des densités sont des compositions volumiques.

Remarque 1 : dh et d varient saisonnièrement s'il y a franchissement de la limite de retrait et que le gonflement résultant s'exerce librement aux dépens de l'environnement (et non en effaçant la porosité interne). Dans ce cas A_v et R_v varient saisonnièrement avec d.

Remarque 2 : Lorsque la densité réelle varie peu avec la fraction minéralogique et granulométrique considérée (kaolinite : 2,6 - quartz : 2,7 - gibbsite 2,5 - minéraux ferrugineux associés également à toutes les fractions) on peut prendre la densité réelle globale D comme densité réelle de chaque fraction. C'est ce qui a été fait ici (voir chapitre VI).

Remarque 3 : Une mesure correcte du refus R nécessite le prélèvement de toute la matière d'un volume donné. C'est pourquoi il est recommandé d'en effectuer la mesure sur les matériaux extraits d'une cavité creusée pour l'étude de la densité apparente. Le prélèvement sur une tranchée entraîne en effet souvent une perte ou un choix des matériaux.

Diagramme de composition volumique

En pratique on cherche d'abord à connaître les variations saisonnières de l'humidité volumique afin de comparer, à différentes saisons, ces taux d'humidité à la porosité disponible pour l'emmagasiner aux dépens du volume gazeux. Par conséquent la densité apparente d doit avoir été mesurée de préférence au maximum de gonflement pour que l'humidité volumique H_v ne soit jamais supérieure à la porosité calculée P' .

Les variations extrêmes H_v min et H_v max de l'humidité volumique au cours de l'année sont particulièrement intéressantes à connaître et à reporter sur le même diagramme volumique pour déterminer, en suivant les variations relatives d'eau et de gaz, si l'on se rapproche de conditions asphyxiantes et dans ce cas à quelle saison et dans quel horizon.

En ce qui concerne la matière solide les diagrammes volumiques renseignent sur les variations, en fonction du paramètre profondeur, des taux, rapportés au volume, de chaque classe granulométrique, refus compris. Pour cela on peut se contenter de prendre la densité réelle globale des matières fines et celle des cailloux pour calculer A_v et P' à moins qu'on ne dispose d'une estimation des teneurs en différents minéraux et de leur variations avec la profondeur (diffraction aux rayons X, analyse thermodynamique, extraction des formes amorphes de fer, silice et alumine par la méthode P. SEGALEN).

C H A P I T R E V

LES RESULTATS OBTENUS

5.1 DENSITE DES SOLS FERRALLITIQUES

Les sols Ferrallitiques présentent les plus faibles densités apparentes en sec in situ rencontrées : 0,4 à 1,4 dans l'horizon humifère, 0,9 à 1,2 dans l'horizon rouge des sols sur basalte, 1,1 à 1,5 dans les horizons homogènes des autres, rouges et jaunes. Plus profondément la densité apparente s'élève nettement dans l'horizon d'accumulation de fer 1,5 à 2,0. Celle des horizons d'altération n'a malheureusement pas été mesurée.

Les plus fortes variations au sein du profil s'observent dans les sols jaunes qui présentent les plus faibles densités apparentes en surface et les plus élevées dans l'horizon homogène (voir figure 7).

Horizons A : L'horizon humifère A11 dont l'épaisseur varie de 3 à 7 cm présente en EBOL sous forêt des densités faibles, 0,4 à 0,65*, à NGAT sous forêt secondaire des densités plus étalées 0,5 à 1,1, à MEKA sous jachère ancienne des densités voisines de 0,9 en bas de pente, 1,0 en haut, à BALI des densités de 0,75 sur basalte et de 1,1 sur granite, à NGD sous une forêt claire préservée du surpâturage une densité de 1,05 (basalte) et de 1,35 (granite) dans une zone de parcours de bétail.

L'horizon de pénétration humique apparente A12 épais de 5 à 7 cm présente une densité supérieure de 0,1 à 0,3 à celle de l'horizon A11. La figure 7 exprime les résultats de plusieurs répétitions effectuées sur différents horizons A Ferrallitiques. Chaque mesure sur l'horizon A11 est doublée d'une mesure effectuée sur l'horizon A12 exactement au droit de la précédente (même position de la plaque de base) : on constate que l'ordre de croissance de la couche A12 ne suit pas celle de A11, par exemple en EBOL 1 on obtient :

(*) Rappelons que toutes les valeurs de densité indiquées dans cette étude sont rapportées à la matière séchée à 105°.

Figure 5 DENSITÉ APPARENTE MESURÉE IN SITU
DE SIX SOLS FERRALLITIQUES JAUNES

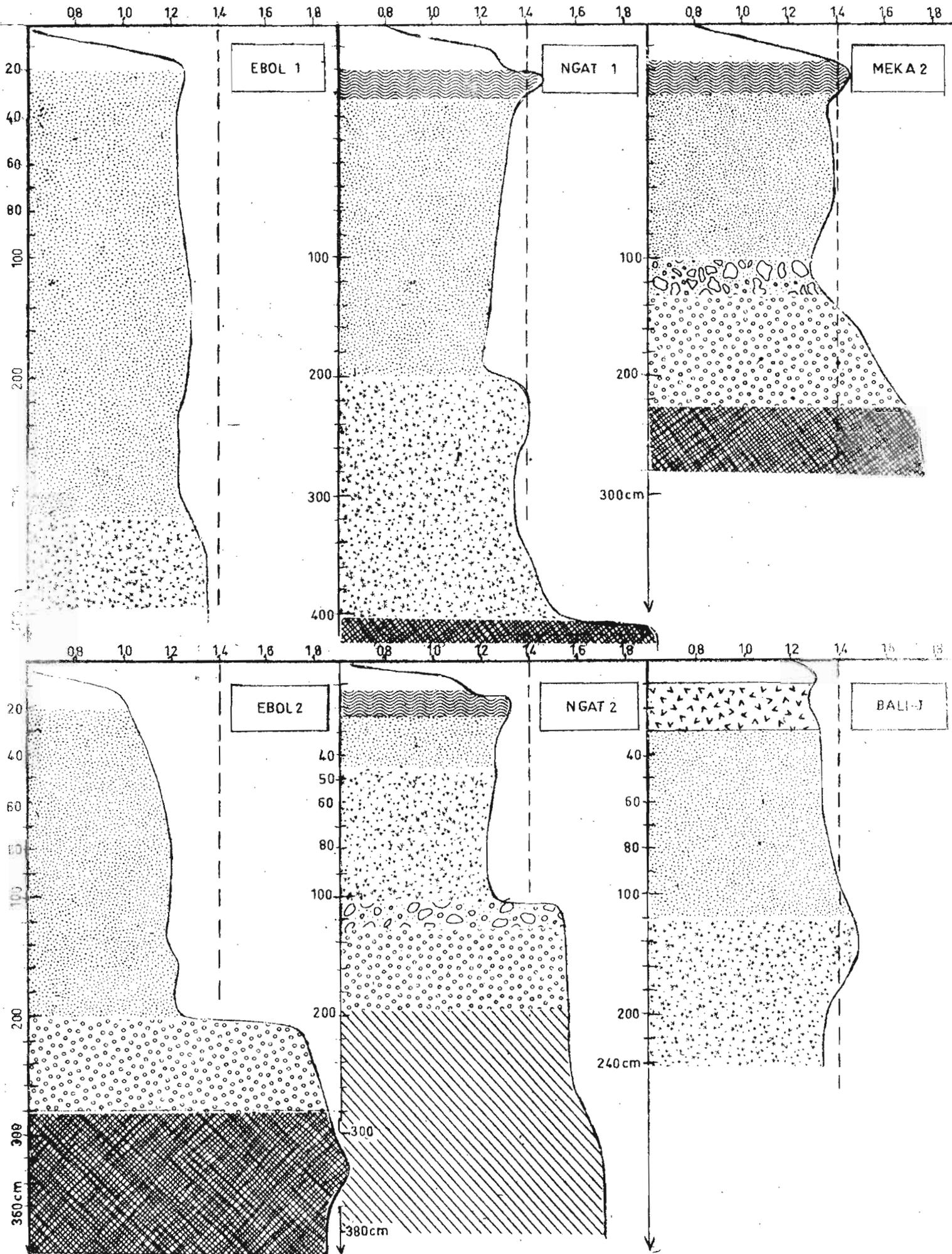
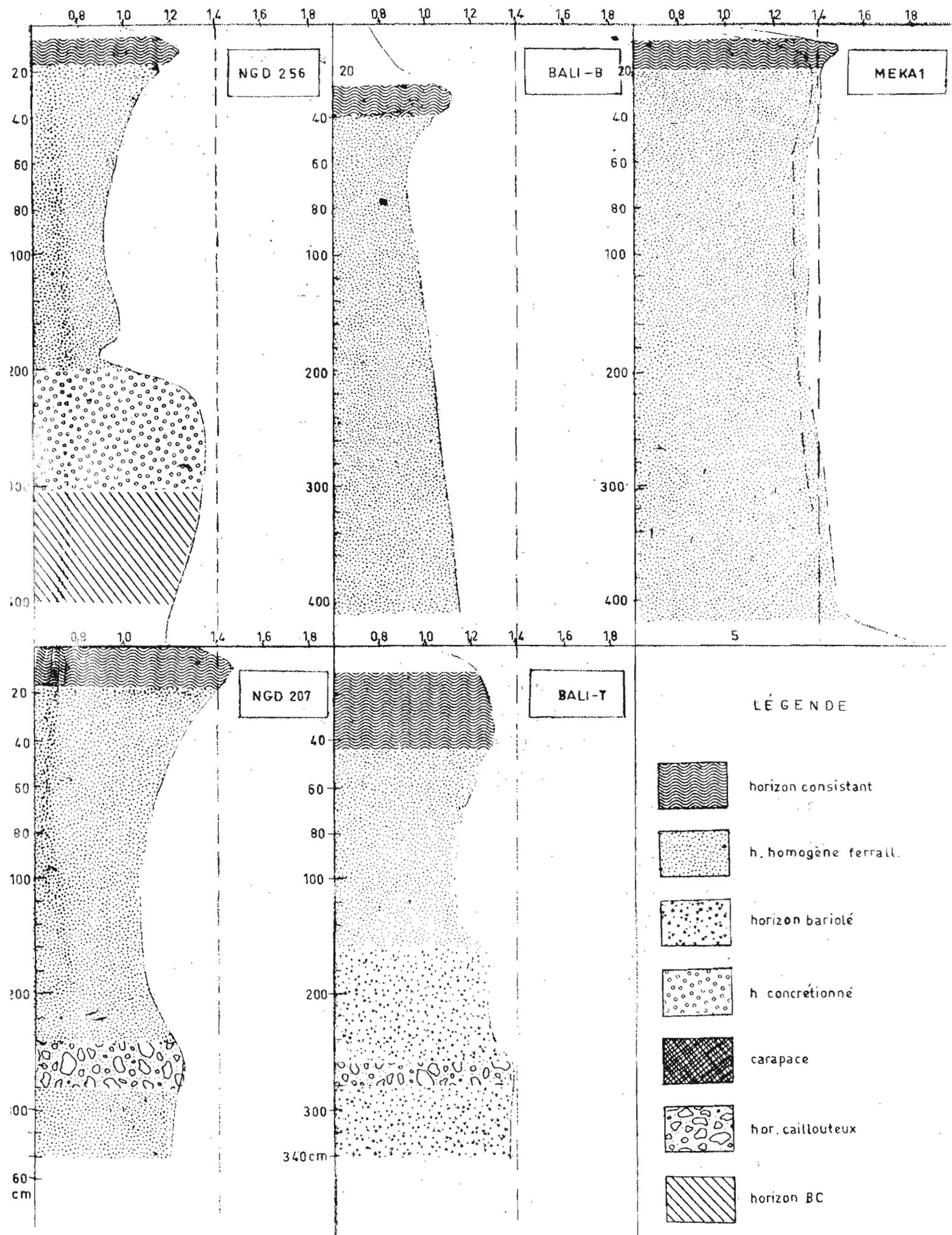


Figure 6 DENSITÉ APPARENTE MESURÉE IN SITU
DE CINQ SOLS FERRALLITIQUES ROUGES



Répétition	1	2	3	4	5
Couche 0-5	0,56	0,57	0,62	0,65	0,67
Couche 5-10	0,84	0,89	0,87	0,80	0,86

Horizons B : Sous les horizons A les courbes de densité apparente montrent un brusque maximum (densité 1,2 sur basalte, 1,4 sur les autres), situé à faible profondeur (5 à 40 cm). Ce "pic de densité" est très net à BALI et NGD moins marqué à MEKA et NGAT, absent à EBOL, c'est-à-dire qu'il paraît, à la lumière de ces premiers résultats, s'estomper du milieu tropical vers le milieu équatorial.

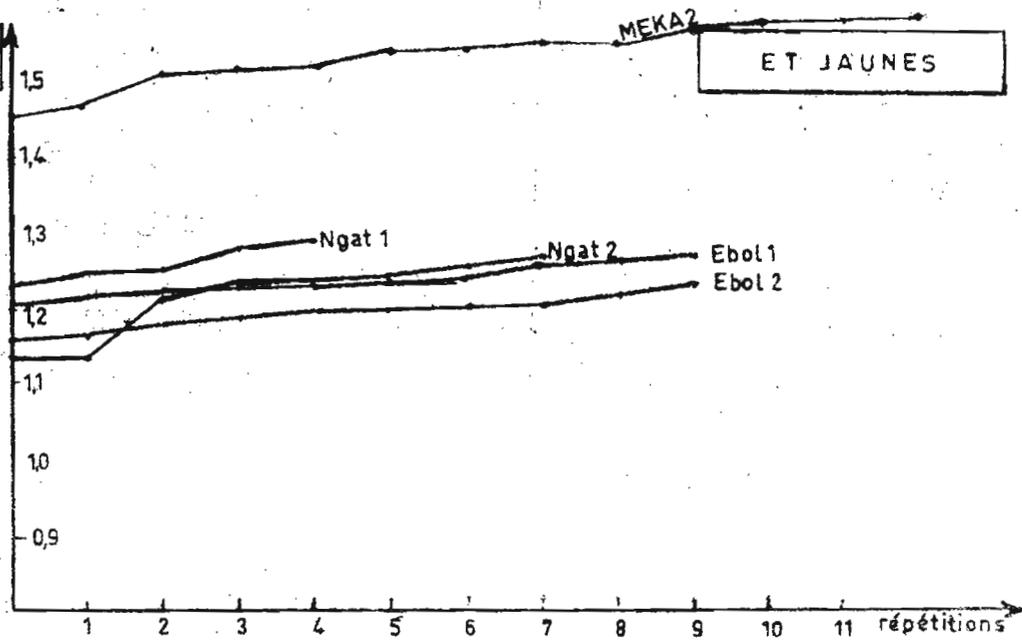
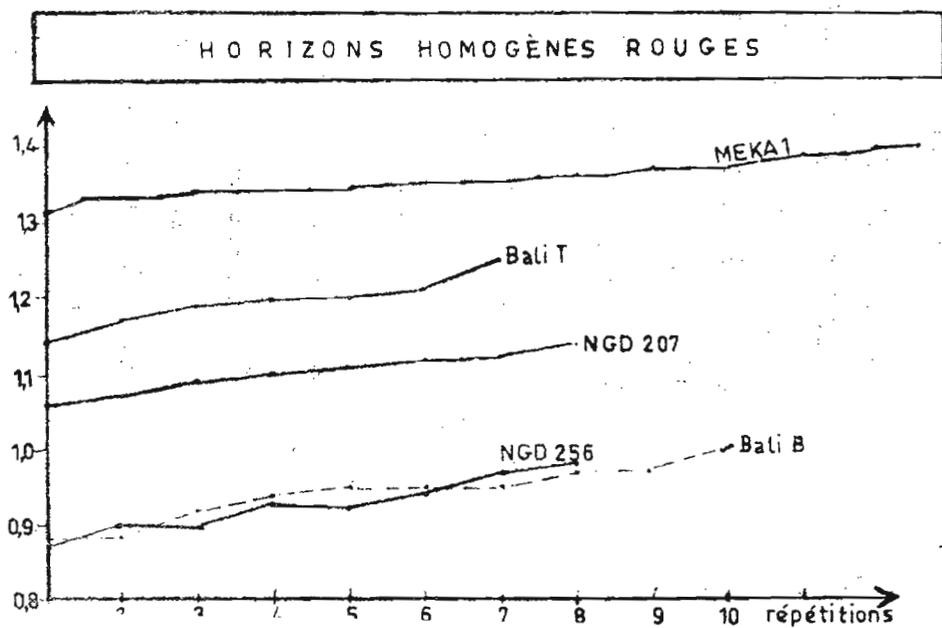
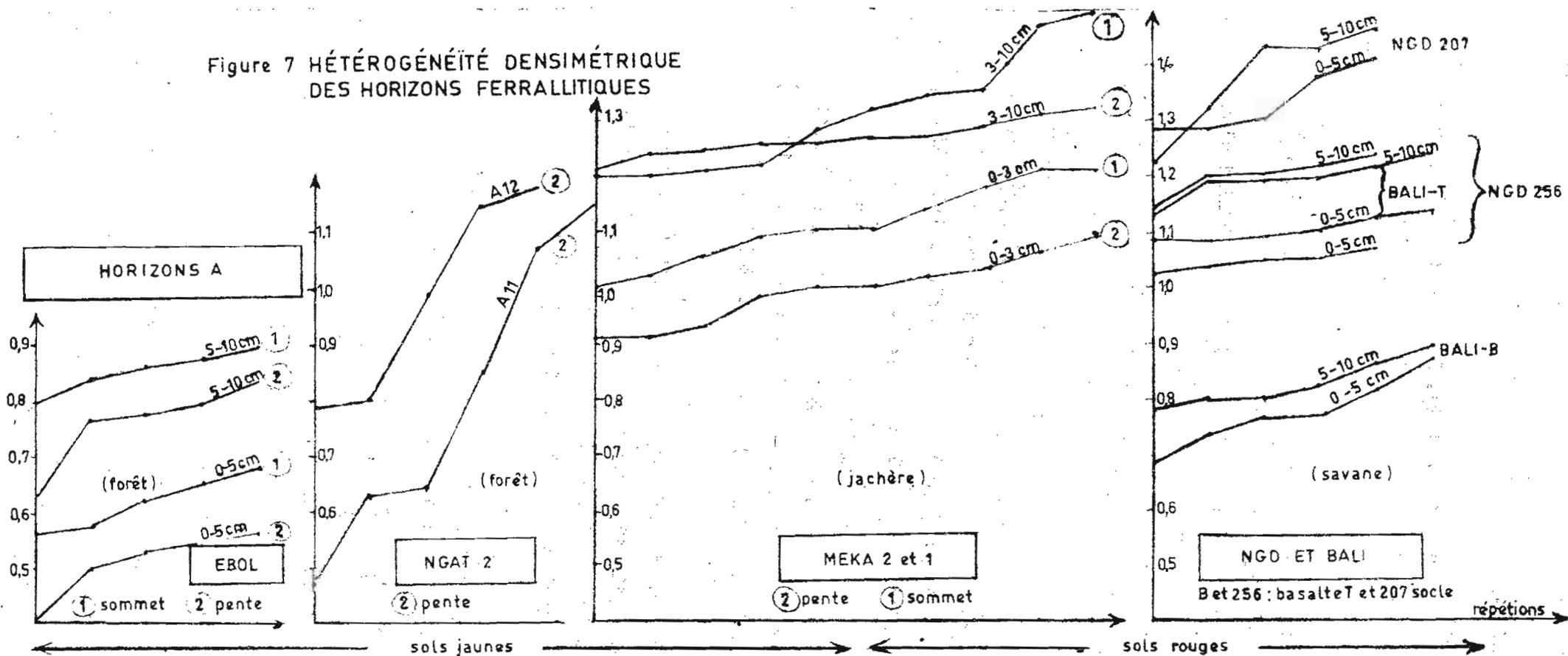
Sa coïncidence avec l'horizon "de consistance" souvent observé demande à être vérifiée. Pour cela il serait utile de pouvoir chiffrer l'augmentation de cohésion dont l'appréciation reste trop subjective (ne pourrait-on confectionner à cet effet un petit pénétromètre sur le principe des pénétromètres à fruits ?). A EBOL on note une augmentation de cohésion plus profonde qui peut coïncider avec un léger maximum très étalé de la densité apparente.

L'origine de ce pic exo de densité est en cours d'étude : La comparaison à cet endroit des courbes détaillées de porosité, granulométrie et densité réelle indique que l'on est en présence d'un phénomène de tassement dû soit aux alternances d'humectation saisonnière soit aux pressions racinaires soit plutôt à d'anciennes cultures. De nouvelles mesures, sous forêt primaire notamment, sont encore nécessaires.

Sous ce pic brusque de densité les courbes présentent ensuite une large portion légèrement déprimée qui s'étale parfois jusqu'à 2 m de profondeur. La diminution de densité qui lui correspond ne peut être interprétée simplement par la présence au-dessus du pic précédemment décrit et en dessous des horizons denses d'accumulation de fer. En effet ce creux de densité se termine, comme on peut le constater là où l'horizon meuble est épais, bien avant l'apparition de ces horizons ferruginisés. La densité apparente y descend à 1,0 (sols rouges sur basalte) ou 1,2 (autres sols).

A la base des horizons homogènes meubles on observe souvent une légère dépression de densité qui accentue l'écart avec les horizons fer-

Figure 7 HÉTÉROGÉNÉITÉ DENSIMÉTRIQUE
DES HORIZONS FERRALLITIQUES



ruginisés en carapace (voir profil NGD 256, EBOL 2). En MEKA 2 c'est même la partie supérieure, bouillante, de l'horizon gravillonnaire qui est affectée par cette dépression.

Ces horizons ferruginisés présentent une densité de 1,5 à 2,1, les plus fortes de ces densités caractérisant plus souvent les carapaces et cuirasses. Ces horizons ferruginisés sont précédés en EBOL 1 et NGAT 1 d'un horizon bariolé dont la densité est peu élevée (1,4).

Hétérogénéité densimétrique : (voir figure 7)

Elle est très élevée dans l'horizon humifère des sols sous forêt secondaire comme à NGAT (0,5) assez élevée sous jachère à MEKA (0,2) moyenne sous forêt ancienne à EBOL (0,1) du même ordre dans les jachères récentes des savanes de BALI, faible en NGD 256 (0,07) sous une forêt claire relique, plus élevée dans les zones surpâturées de NGD 207 (0,25).

L'hétérogénéité densimétrique est faible dans l'horizon "homogène" des sols rouges : 0,09 en MEKA 1 (23 mesures entre 80 et 200 cm de profondeur) 0,11 en BALI-T (7 mesures de 50 à 100 cm) et BALI - B (10 mesures de 50 à 100 cm) 0,10 en NGD 256 (8 mesures de 75 à 120 cm), 0,08 en NGD 207 (8 mesures de 100 à 160 cm).

Dans les sols jaunes elle est plus importante à NGAT 2 : 0,15 (8 mesures de 40 à 100 cm) et à MEKA 2 : 0,12 (12 mesures de 30 à 80 cm) mais faible également dans les autres : 0,08 en EBOL 2 (10 mesures de 80 à 140 cm), 0,05 en EBOL 1 (10 mesures de 40 à 80 cm) et NGAT 1 (5 mesures de 70 à 160 cm).

Dans les horizons ferruginisés (sols jaunes seulement) l'hétérogénéité densimétrique (à l'échelle de mesure : 1 dm³) est plus importante :

- 0,25 dans la carapace d'EBOL 2 (8 mesures)
- 0,25 dans le schiste ferruginisé de NGAT 2 (7 mesures)
- 0,25 dans la carapace de MEKA 2 (10 mesures)

ANALYSE DES FACTEURS

1/ HORIZONS ARGILLEUX COLORES

Les sols Ferrallitiques sont avec le sol Brun les plus légers des sols étudiés. Dans l'horizon homogène la densité apparente descend à

1,2 pour les sols formés sur roches cristallines de densité 2,6 et même à 1,0 pour les sols formés sur basalte de densité 3,0. Le rapport de densités roche/sol y atteint donc respectivement des valeurs de 2 et 3. On remarque que les basaltes, roches les plus denses, donnent naissance aux sols les plus légers.

Or la densité réelle de ces horizons homogènes, assez constante, s'établit de 2,7 à 2,85, les valeurs les plus élevées correspondant encore aux sols dérivés de basalte. La nature des produits néoformés en milieu ferrallitique n'a donc qu'une influence légère sur l'allègement. Celui-ci provient donc essentiellement de la répartition granulométrique et de l'arrangement structural de ces minéraux de densité moyenne relativement élevée. Les produits amorphes, abondants dans les sols rouges, possèdent des densités faibles, accusées encore par leur fort degré d'hydratation. Après chauffage à 105° une partie de cette eau est éliminée majorant ainsi la densité réelle.

Le domaine ferrallitique est caractérisé par une intervention très poussée du facteur d'allègement A (exportation des produits d'altération des minéraux) qui effectue l'horizon d'altération à architecture conservée. La densité apparente de cet horizon friable très épais n'a malheureusement pas été mesurée ici. On peut cependant la supposer intermédiaire entre celle de la roche (2,6) et celle des horizons argileux. En effet l'effacement de l'architecture de la roche lors du passage de l'horizon C à l'horizon B paraît traduire un gonflement qui diminue encore la densité apparente pour l'amener aux valeurs obtenues dans le B argileux.

Les sols Ferrallitiques présentent des porosités mesurées sur mottes de 40 à 60 % donc nettement plus élevées que celles des autres sols étudiés (20 à 40 %). Les facteurs d'allègement responsables de la légèreté relative de ces sols sont ceux qui créent ces pores dont le volume atteint ou dépasse celui de la matière solide. Le développement d'une faune abondante, en particulier termitique, qui perfore et mine la masse argileuse de galeries et cavités dont les débris sont partiellement remontés peut être au premier chef incriminé. A l'action de la faune qui se manifeste par sa densité propre, ses dégagements gazeux, ses galeries et ses remontées s'ajoute celle de la flore dont les racines, en se développant exercent des pressions auxquelles le sol peut répondre en se dilatant vers le haut.

La forte humectation de ces sols (40 % d'humidité volumique en fin de saison des pluies) qui en maintient la plus grande partie au-dessus de la limite de retrait doit être également un facteur important d'allègement. Cependant en MEKA 1 les mesures de densité apparente effectuées en pleine saison sèche (Février) donnent au contraire des valeurs légèrement inférieures à celles obtenues en saison des pluies (Juin voir figure 6 courbe en pointillé). Le lessivage, dont l'importance au sein des horizons meubles est difficile à évaluer, joue encore en faveur de l'allègement. Il en est de même de l'élimination des cailloux si son mécanisme est pédologique.

La densité plus faible des horizons rouges relativement aux horizons jaunes peut être recherchée dans la présence de produits ferrugineux amorphes hydratés, (de faible densité propre 2,2) qui y sont plus abondants (P.SEGALEN) et dans l'organisation en pseudo-particules légères de la masse fine de ces sols.

2/ HORIZONS SUPERIEURS

Là aussi les sols Ferrallitiques se distinguent par des densités apparentes extrêmement basses, sous forêt en particulier (EBOL et NGAT) bien que la densité réelle * y soit nettement plus forte que dans les horizons argileux sous jacents (2,9). Le lessivage (oblique ?) des fines suivi du tassement et de l'accumulation des minéraux lourds explique cette plus forte densité réelle. Si, en dépit de ce facteur d'alourdissement la densité apparente est très faible c'est qu'il y a un abondant apport de débris végétaux que la faune morcelle et mélange, qu'une structure arrondie s'y développe, que des produits organiques légers s'y synthétisent**, que les pressions des racines et des animaux qui les parcourent en soulèvent aisément la matière, toutes causes d'allègement auxquelles un travail ancien du sol a pu s'ajouter. Cet allègement, maximum dans l'horizon humifère A11 est encore sensible dans l'horizon A12 dont la densité apparente est un peu supérieure : différence : 0,1 à 0,3.

* Cette densité réelle y est légèrement surestimée (voir paragraphe IV-5).

** Le chauffage à 105° pour la mesure de densité réelle altère partiellement ces produits, diminuant ainsi leur influence sur la densité réelle.

3/ HORIZONS GROSSIERS ET FERRUGINISES :

L'élimination des cailloux des horizons homogènes, facteur d'allègement, trouve une compensation interne dans leur accumulation en stone-line isolée ou comme, c'est le cas ici à la partie supérieure des horizons ferruginisés. L'arrivée de ces horizons étant brutal, brusque sera l'augmentation de densité apparente à ce niveau.

Bien que les produits ferrugineux amorphes abondent dans les concrétions celles-ci sont denses (densité réelle 2,8 - 2,9 parfois 3,4 - densité apparente 1,8 à 2,8) comme les produits ferrugineux cristallisés qu'elles contiennent*. La densité apparente est donc élevée dans ces horizons même si deux facteurs d'allègement la tempèrent : formes arrondies des concrétions laissant des espaces remplis de matrice et l'évidement de ces espaces par un entraînement des fines (horizon bouillant de MEKA 2, NGAT 2 et EBOL 2).

4/ RESUME : on peut envisager, de haut en bas l'intervention des facteurs densimétriques suivants :

Horizon A : facteurs d'allègement (K) J - H - G - E - C
facteur d'alourdissement R
facteurs d'hétérogénéité (S) - T - U

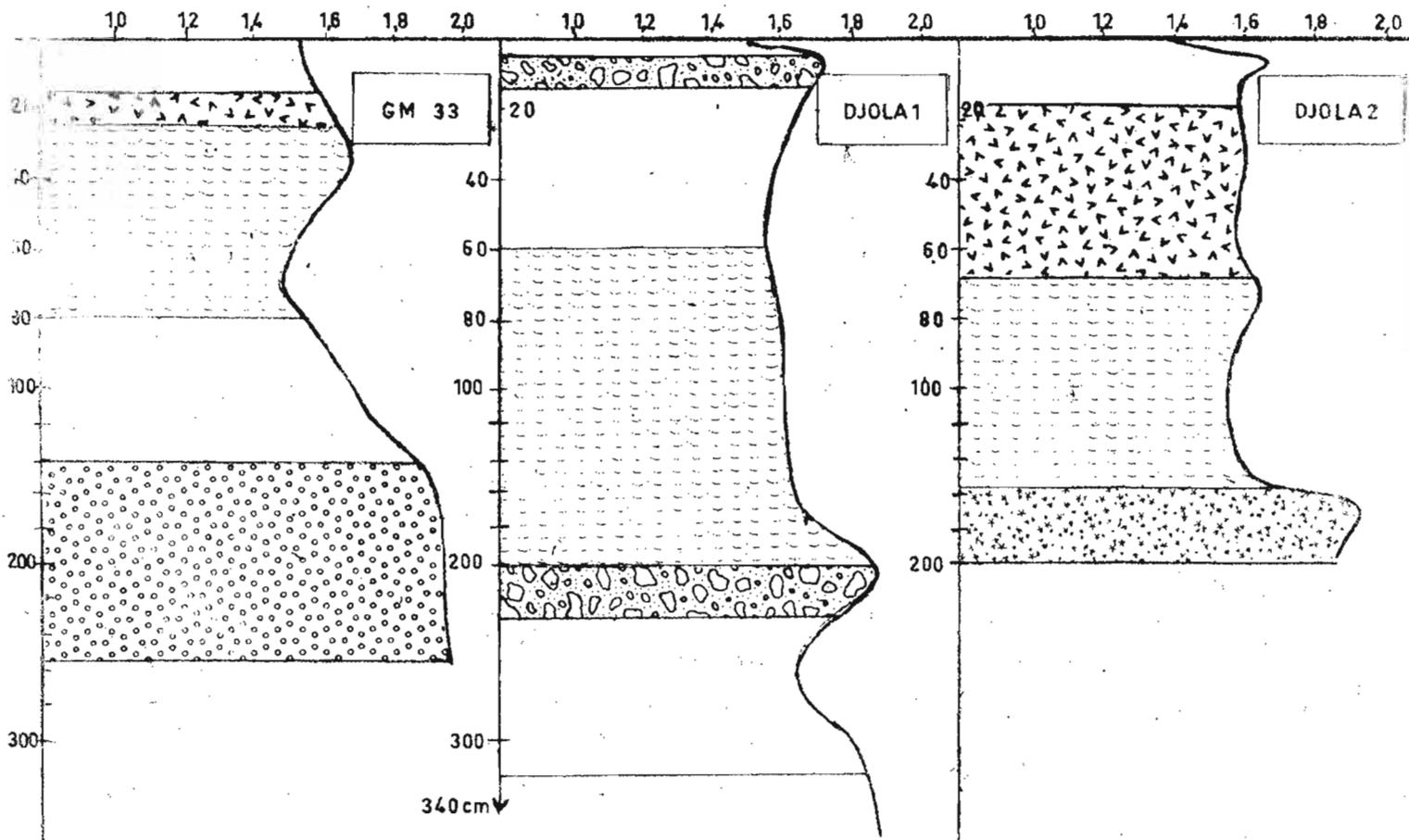
Horizons B : argileux facteurs d'allègement : (I)-G-E-D-(C)-B-L
facteurs d'alourdissement : néant
facteurs d'hétérogénéité - U

Horizons B : ferrugineux facteurs d'allègement F ?
facteurs d'alourdissement M et N
facteurs d'hétérogénéité X, Y

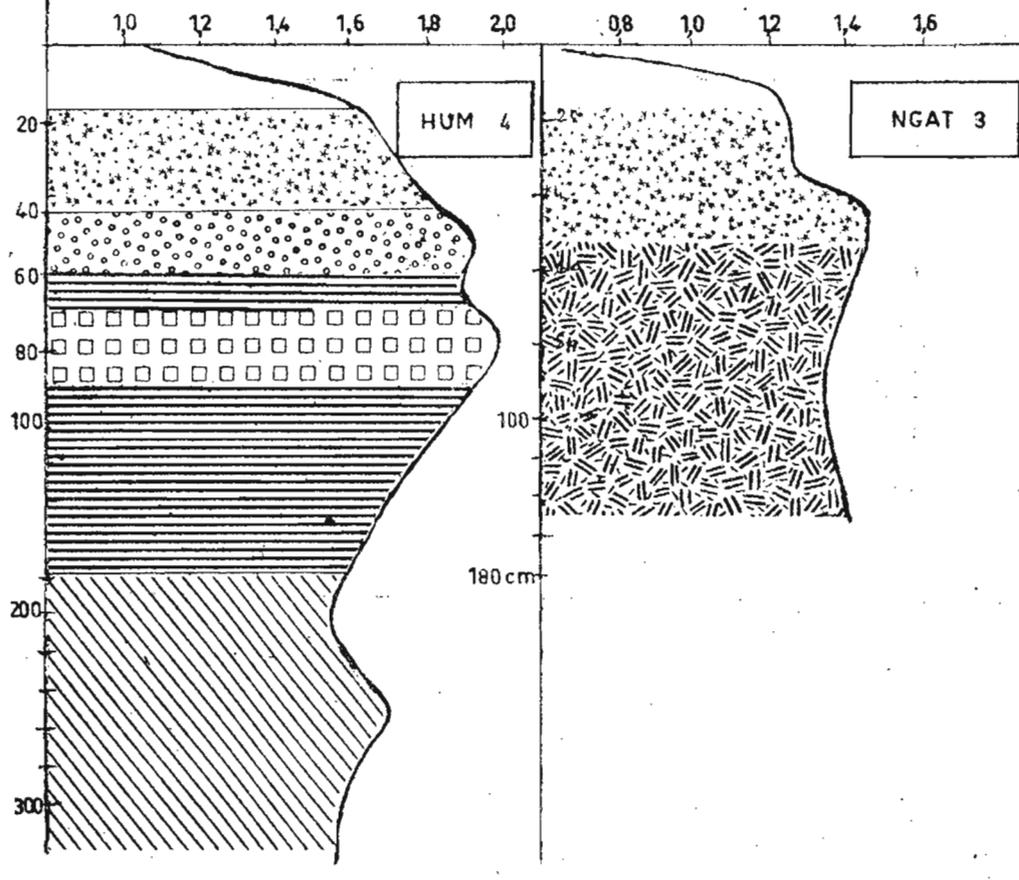
Horizon C : (altération)
facteurs d'allègement A et B
facteurs d'alourdissement (Q)
facteurs d'hétérogénéité Z

* Ces concrétions peuvent emmagasiner de 2 à 40 % d'humidité volumique (porosité).

Figure 8 DENSITÉ APPARENTE DE TROIS PROFILS FERRUGINEUX



DENSITÉ APPARENTE DE DEUX
SOLS HYDROMORPHES



LÉGENDE

-  horizon lessivé
-  pseudogley ou h. taché
-  B. textural
-  h. concrétionné
-  h. carbonaté
-  (B) argilisation
-  h. caillouteux
-  horizon BC
-  horizon C
-  roche dure
-  gley

5.2 DENSITE DES SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX

Deux sols seulement ont été étudiés, l'un sur grès, l'autre sur granite. Le sol sur grès comprend deux profils, l'un en haut de pente DJOLA 1, l'autre à mi-pente DJOLA 2. La forte hétérogénéité densimétrique due à de nombreuses cavités termitiques ne permet guère l'interprétation de la courbe obtenue en DJOLA 2. La courbe de densité en GM 33 sur granite présente au contraire un mouvement net certifié par de nombreuses répétitions (voir figure 4).

La densité apparente de ces sols atteint 1,65 dans les horizons argileux. Elle est donc nettement supérieure à celle des sols Ferrallitiques. Elle monte à 1,9 dans l'horizon grossier (DJOLA 1 à 2 m) et dans les horizons concrétionnés (GM 33) ou carapacés (DJOLA 2). On obtient donc des densités voisines dans les horizons feruginisés des sols Ferrallitiques et des sols Ferrugineux Tropicaux. En surface la densité apparente est de 1,4 - 1,5. L'horizon humifère de ces profils Ferrugineux est donc plus dense que celui des sols Ferrallitiques étudiés sous savane (sauf en NGD 207 affecté par le surpâturage). Au total l'amplitude de variation entre les horizons A1 et B2 Fe ne dépasse pas 0,5 ce qui distingue encore nettement ces sols des sols Ferrallitiques.

On observe à faible profondeur dans les trois courbes un pic où la densité atteint 1,7. Il est brusque et situé entre 5 et 10 cm à DJOLA étalé vers 40 cm en GM 33. La cause de ce pic paraît toutefois différente dans les trois cas :

En DJOLA 1 l'horizon humifère, épais de 10 cm est sableux, tassé, imperméable et soumis à l'érosion en nappe. Il contient quelques graviers quartzeux. La densité réelle y atteint la valeur 3,2 indiquant une concentration en minéraux lourds. Ces particularités expliquent bien ce pic.

En DJOLA 2 l'horizon humifère, épais de 18 cm est également sableux mais particulière et perméable. Il représente une zone d'atterrissement de sables, sans graviers. La densité réelle n'est que de 2,7 (quartz). La réalité du pic observé, qui n'est attesté que par deux mesures, demande à être confirmée.

En GM 33 par contre l'existence d'un pic de 1,65 culminant à 40 cm de profondeur est attestée par de nombreuses répétitions. Il coïncide cette fois avec la moitié supérieure de l'horizon B rougi et argileux (28 %). Il est suivi d'un minimum de 1,50, situé à 70 cm, donc dans la deuxième partie de l'horizon de teneur maximum en argile (35 %). Les variations de densité réelle ne peuvent expliquer ce mouvement en S renversé de la courbe. Il semble qu'il y ait un tassement de la matière du sol dans la partie la plus rouge puis augmentation de la porosité dans la partie la plus argileuse. Les mesures de porosité sur mottes confirment cette interprétation.

Sous ce minimum la densité apparente augmente régulièrement pour atteindre 1,95 dans les horizons ferruginisés où elle se stabilise. Cette augmentation est due à une diminution de porosité et non à une augmentation de densité réelle malgré l'apparition de concrétions (voir figures 12 et 13).

5.3 DENSITE DES VERTISOLS

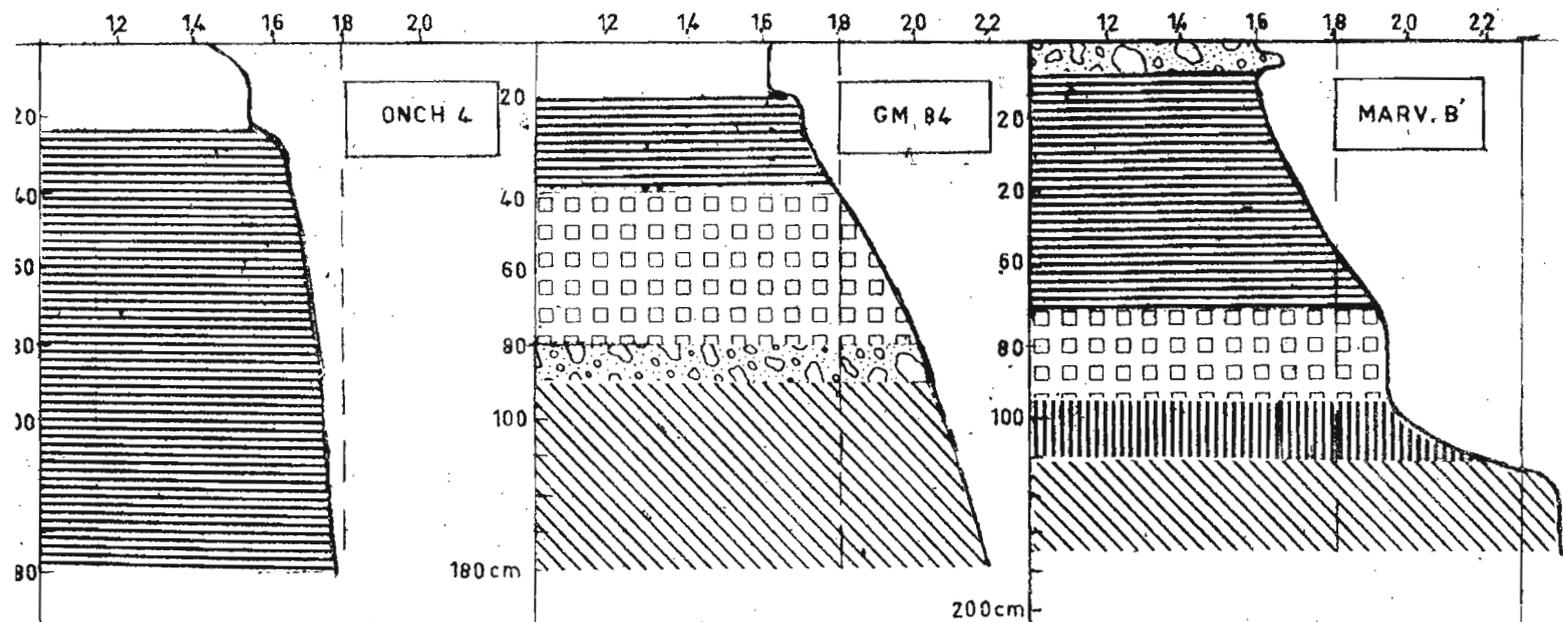
Les trois profils étudiés présentent une étroite parenté : La densité apparente croît lentement et régulièrement de 1,5 à 1,8 jusqu'à l'horizon BC (débutant à 40 cm en GM 84, à 80 cm en MARVAY B' non atteint en ONCH 4). Le passage à la roche résistante est progressif en GM 84, brusque en MARVAY B' et la densité y atteint 2,3.

Le petit pic entre 5 et 10 cm en MARVAY B' est dû à quelques cailloux de quartz et le palier observé en ONCH 4 et GM 84 vers 20 cm paraît caractériser le passage des horizons superficiels plus finement structurés, aux horizons largement structurés vertiques.

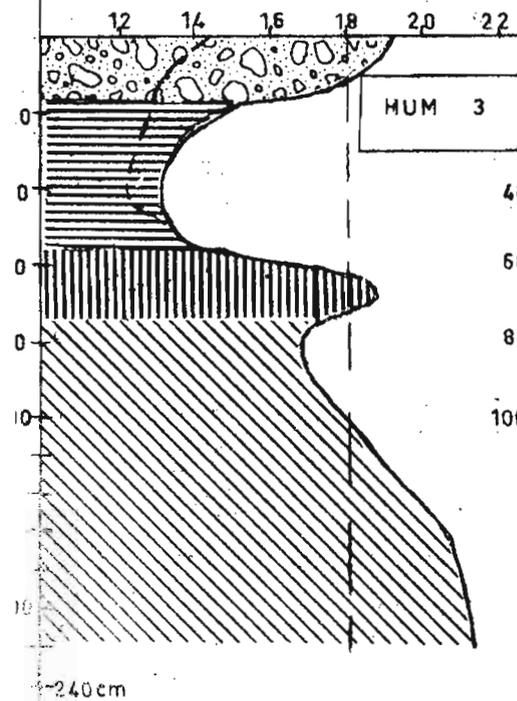
Aucun maximum ne marque l'horizon carbonaté 40-80 cm de GM 84 alors que l'accumulation de carbonates en provoque un dans le sol hydromorphe à vers HUM 4 (voir chapitre 5.7) et en MARVAY B' vers 80 cm.

L'hétérogénéité densimétrique est importante dans tous les horizons du vertisol où elle peut atteindre 0,1 même lorsque il n'existe ni fente ni caillou ni cavité pour fausser les mesures.

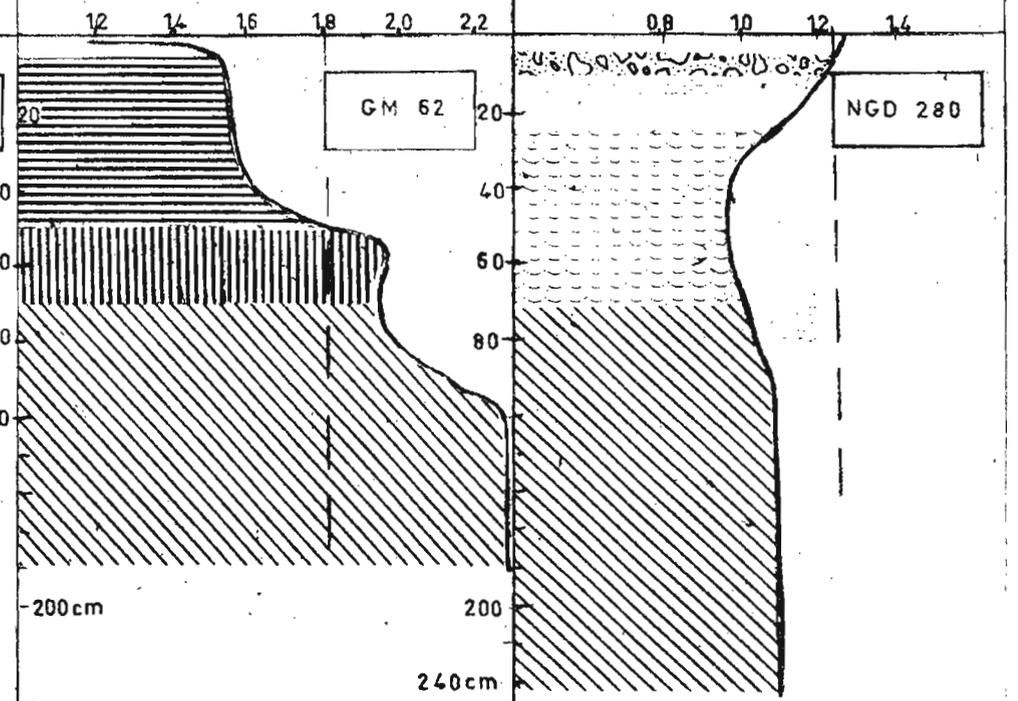
Figure 9 DENSITÉ APPARENTE DE TROIS VERTISOLS



DENSITÉ APPARENTE DE DEUX SOLS ROUGES TROPICAUX



DENSITÉ APPARENTE D'UN SOL BRUN MÉSOTROPHE/FERRALLITE



densité hors cailloux

voir légende figure 8

ANALYSE DES FACTEURS :

La densité de 1,8 atteinte progressivement dans les horizons B vertiques est peu inférieure à celle de la montmorillonite (2,04) qui constitue une part importante de ces sols. L'écart relativement modéré entre les densités apparentes (1,8) et réelles (2,65) paraît être une caractéristique de ces sols peu poreux (25 à 30 %).

Les facteurs d'allègement sont essentiellement la néosynthèse de montmorillonite (facteur B) et le gonflement résultant de l'humectation (facteur I) en B auxquels s'ajoute en A la création d'agrégats grumoso-liques (facteur C).

L'élimination des cailloux (facteur D) intervient également bien que neutralisé par les ségrégations de carbonates sous formes de nodules (facteur M).

Le principal facteur d'alourdissement pourrait être la fluidification de la masse argileuse qui ne laisse subsister qu'une porosité minime. Les horizons vertiques se rapprochent en cela des horizons sodiques des sols halomorphes.

5.4. DENSITE DE DEUX SOLS ROUGES TROPICAUX

HUM 3 a été étudié en fin de saison des pluies, GM 62 en pleine saison sèche.

RESULTATS OBTENUS :

Les densités apparentes globales de ces deux sols sont différentes dans les horizons A et B. La présence de gros cailloux en HUM 3 en est la cause car si l'on calcule la densité hors cailloux (voir chapitre IV-5) qui a été portée en tireté sur la figure 9 les deux profils densimétriques se ressemblent. Les cailloux présents en GM 62, trop petits n'ont pas été séparés. La densité apparente y est donc supérieure à celle de HUM 3 hors cailloux.

La densité apparente des horizons A (hors cailloux) est peu inférieure à 1,4. Dans l'horizon B elle est de 1,25 (HUM 3) à 1,5 (GM 62) et la courbe y est concave. Puis une forte augmentation jusqu'à 1,9 af-

fecte les horizons BC dont les fissures sont colmatées par de l'argile rouge (néoformée ou illuviée ?). Enfin après un palier (GM 62) ou une dépression (HUM 3) la densité augmente dans l'horizon C jusqu'à 2,2 - 2,3.

La densité réelle (figure 13) est très élevée en HUM 3 (2,9 à 3,0) et faible en GM 62 (2,7 à 2,8). C'est pourtant en HUM 3 que la densité apparente atteint les plus faibles valeurs (1,25 hors cailloux).

ANALYSE DES FACTEURS

La densité élevée des horizons A, où une structure fragmentaire apparaît cependant peut être attribuée à la présence de cailloux de roche résistante et au tassement de la matrice par ces cailloux.

En (B) les deux principaux facteurs d'allègement sont la néoformation de montmorillonite qui serait peu dense (2,04 ?) et l'apparition d'une structure fortement développée épousée par les radicules. La présence de produits ferrugineux amorphes légers (hydratés) peut aussi être invoquée. La densité hors cailloux qu'on y observe : 1,25 (saison humide), est peu supérieure à celles des horizons équivalents des sols Ferrallitiques rouges (0,9 à 1,3) et du sol brun eutrophe (1,0).

Deux facteurs d'alourdissement viennent perturber la décroissance de la densité apparente de bas en haut : L'accumulation de cailloux dans les horizons A et B de HUM 3 et en BC le colmatage des joints de la roche altérée par l'argile rouge.

Enfin les facteurs d'hétérogénéité sont importants : en C c'est l'hétérogénéité héritée de la roche, en A et B la répartition des cailloux.

Comparaison avec les vertisols : GM 62 et GM 84 forment une séquence topographique. La densité en (B) du sol Rouge de sommet est supérieure à celle du vertisol de bas de pente ce que confirme l'étude des autres vertisols et sols Rouges. La densité réelle (voir figure 13) ne l'explique pas puisqu'elle est au contraire moins élevée dans les trois vertisols étudiés (2,6 - 2,7) que dans les deux sols Rouges (2,7 à 3,0). On ne peut pas invoquer non plus une plus forte quantité de montmorillonite, argile légère également présente dans ces deux types de sols.

Le fort développement d'une structure fragmentaire fine et une porosité mesurée sur mottes un peu meilleure (30-40 %) peut expliquer la densité des horizons (B) des sols Rouges plus faible que celle des horizons verticaux ou sodiques (1,6-1,8).

5.5. DENSITE DU SOL BRUN

Le sol Brun étudié n'est guère représentatif de l'ensemble de la classe : il est formé en effet sur du basalte antérieurement ferrallitisé et ne comporte donc pas de morceaux de roche-mère peu altérés.

RESULTATS OBTENUS

En surface la densité est élevée : 1,3 à cause du surpâturage qui tasse la couche lamellaire de surface et de la présence de quelques petits cailloux.

En B elle est faible : 0,9 à 1,0 comme dans le sol Ferrallitique sur basalte de la même région. Elle n'augmente guère dans les horizons BC et C (1,1) dont la densité pourrait renseigner sur celle de l'altération ferrallitique du basalte.

ANALYSE DES FACTEURS

Les facteurs d'allègement envisagés sont en C et BC l'altération (facteur A) en BC et (B) la néosynthèse argileuse et de produits amorphes ainsi que la structure fine bien développée.

Les facteurs d'alourdissement agissent en A : tassement par pression (facteur Q) et résidu caillouteux (facteur N).

Peu de facteurs d'hétérogénéité en l'absence de morceaux de roche.

5.6 DENSITE DE TROIS PROFILS HALOMORPHES ET LESSIVES

Les trois profils étudiés MARVAY A, B et D (figure 10) appartiennent au même interfluve. Les deux premiers sont sodiques, les deux derniers lessivés.

RESULTATS OBTENUS :

En surface la densité apparente est élevée : 1,4. Puis les trois courbes présentent le même mouvement en S inversé qui se termine au début des horizons massifs. L'amplitude de ce mouvement est plus prononcée (0,2) en B et D où le minimum correspond à la "ligne blanche" poudreuse et bouillante. Puis la densité des horizons massifs et sodiques de A et B est de 1,6 à 1,8. Celle des horizons structurés et carbonatés sous-jacents est moindre (1,6) et un pic endo annonce le passage à la roche altérée. Enfin une montée rapide de la densité jusqu'à 2,4 caractérise le contact avec la roche résistante.

ANALYSE DES FACTEURS

Dans ces profils (figure 13) la densité réelle atteint presque 2,9 et varie peu sauf une montée à 2,95 en MARVAY A vers 40 cm.

La densité apparente élevée de surface s'explique par la dessiccation, la texture sableuse et l'absence d'activité biologique et de structure fragmentaire.

Le pic exo du S inversé caractérise l'horizon lessivé sableux, faiblement polyédrique qui se défait à l'humectation et comporte quelques graviers. Un tassement après lessivage et le retrait par dessiccation sont à envisager pour l'expliquer.

Le pic endo du S correspond en B et D à l'horizon excavé bouillant, amaigri semble-t-il par entraînement des fines. La faible densité peut être imputée à l'absence de tassement d'où résulte la forte porosité observée. En MARVAY A il est dû à la structure finement cubique, aux calottes vésiculaires et à des petites poches claires et sableuses (faune ou lessivage).

La densité des horizons massifs et sodiques est élevée comme celle des horizons vertiques étudiés précédemment. La courbe y est plus ou moins convexe. La porosité sur mottes y est faible (30-35 %). On peut penser à un dégazage par dispersion en milieu sodique (structure massive). En MARVAY A cet horizon se trouve probablement en dessous de la limite de retrait. L'activité de la faune est faible à nulle. Une accumulation d'argile est possible à la partie supérieure de cet horizon (facteur M).

La densité plus faible des horizons carbonatés s'explique par la structure fragmentaire qui s'y établit et par un faible pourcentage de nodules concentrés. Il est possible aussi qu'une circulation oblique de l'eau à ce niveau exporte des produits dissouts ou en suspension. L'accentuation de ce processus au contact avec la roche altérée imperméable expliquerait le mouvement endo qui s'y observe. De nouvelles mesures et observations sont nécessaires pour confirmer cet allègement et savoir comment il se traduit dans la morphologie.

La densité de la roche résistante est la même pour les trois profils : 2,4 et la montée y est également rapide : plus de 0,05 par décimètre. La densité atteinte est peu inférieure à celle de la roche saine (granite). Le facteur d'allègement A (dissolution des minéraux) est responsable de cette décroissance régulière. Un mouvement latéral des solutions est vraisemblable.

Au total la densité apparente passe de 2,4 dans la roche à 1,4 en surface en subissant des petites ondulations de part et d'autre de l'horizon massif.

5.7. DENSITE DE DEUX SOLS HYDROMORPHES

Les deux sols Hydromorphes étudiés sont très différents : NGAT 3 est un sol à gley formé sur les colluvions d'un bas-fond en zone ferrallitique, HUM 4 est un sol hydromorphe lithomorphe à accumulation de fer et de carbonates du bassin de la Benoué.

RESULTATS OBTENUS : La densité apparente est faible dans l'horizon A1 : 0,7 à 1,0. La mauvaise décomposition de la matière végétale et organique caractéristique des sols Hydromorphes n'en est pas responsable : la densité est la même en NGAT 3 et dans la séquence ferrallitique qui le commande. En HUM 4 cette densité est celle d'un horizon très caviteux construit par les vers de terre.

Le profil NGAT 3 marque ensuite un palier de 1,25 correspondant au pseudo-gley puis une montée à 1,4 à la partie supérieure du gley. C'est la densité des horizons bariolés de la séquence ferrallitique.

Le profil HUM 4 marque deux pics exo très nets. Le premier (densité 1,9) correspond à l'accumulation de concrétions ferrugineuses, le second (densité 2,0) à l'accumulation de nodules carbonatés. Le petit intervalle argileux entre les deux est moins dense. Sous ces maxima la densité apparente présente une forte décroissance concave (densité 1,6) qui caractérise l'horizon argilisé vertique. Le pic exo vers 2,6 m n'est pas expliqué (nodules isolés ?). Enfin la roche altérée sous-jacente, fraîche, porceuse et friable est particulièrement légère (densité 1,6) sous ces climats.

ANALYSE DES FACTEURS : HUM 4. L'exportation des produits d'altération des minéraux est un facteur d'allègement qui a fortement joué dans l'horizon C du sol HUM 4, faisant passer la densité apparente de 2,6 dans la roche à 1,6 dans l'altération. Pas d'effondrement, l'architecture de la roche est conservée. L'argilisation vertique n'a pas modifié cette densité qui est celle des autres horizons vertiques étudiés (voir chapitre V-3). Par contre l'accumulation de fer et de carbonates provoque des pics exo très prononcés : 1,9 pour le fer, 2,0 pour les carbonates. On retrouve ici les densités atteintes dans les horizons ferruginisés des sols Ferrallitiques et des sols Ferrugineux Tropicaux et dans les horizons carbonatés de MARVAY B' et GM 84. En surface par contre le travail des vers de terre est un puissant facteur d'allègement bien que la texture soit sableuse. L'amplitude des variations verticales de densité atteint ici 1,0.

L'hétérogénéité densimétrique est forte dans ce profil et plus particulièrement dans l'horizon travaillé par les vers (voir figure 10). En dessous elle est exagérée par l'ondulation des horizons d'accumulation qui disperse les résultats des répétitions effectuées à une même profondeur. Dans les deux autres mètres inférieurs elle peut être attribuée à l'irrégularité de l'accumulation des carbonates.

NGAT 3. L'augmentation de densité dans le gley(1,4) le rapproche des horizons bariolés hydromorphes des profils Ferrallitiques de la séquence. Un franchissement sous-pression de la limite de plasticité pourrait effacer une partie de la porosité. L'activité biologique y est réduite, la structure est massive, l'enracinement nul.

La faible densité du pseudo-gley (1,2) est plus difficile à expliquer puisqu'il n'y a ni structuration ni activité biologique. Faut-il admettre que le gonflement résultant du franchissement de la limite de retrait n'est pas compensé par le dégazage ? Le faible pourcentage de fer et l'absence de cailloux y contribuent aussi.

5.8. TABLEAUX RECAPITULATIFS DES RESULTATS

HORIZON	SOLS FERRALLITIQUES		
	JAUNE	ROUGE / GRANITE	ROUGE / BASALTE
A11	0,4 à 0,8	1,0 à 1,3	0,75 à 1,05
A12	0,6 à 1,0	1,2 à 1,4	0,85 à 1,15
pic exo	1,4	1,3 à 1,5	1,1 à 1,2
endo (B)	1,2	1,05	0,9
bariolé	1,4	1,2 à 1,3	-
B f e	1,6 à 1,9	1,8	1,4
BC	1,7	-	1,3

HORIZON	SOL BRUN	ROUGE TROPICAL	VERTISOL
A1	1,3	1,4	1,4 - 1,6
(B) endo	0,95	1,25	1,5 - 1,8
B carb	-	-	1,9
BC	1,1	1,9	2,0
C ou R	-	2,2	2,3

HORIZON	SOL HYDROM.	FERRUGINEUX	HALOMORPHE
A1	0,7 à 1,0	1,5	1,4
A2 exo	-	1,6	1,7
Bt	-	1,65	1,6 - 1,7
(B)	1,6 à 1,8	-	1,6 - 1,8
B gley	1,4 à 1,7	-	-
Bfe	1,90	1,90	-
B carb.	2,00	-	1,6
BC	1,60	-	1,7 - 1,9
R	-	-	2,4

DENSITE DES DIFFERENTS HORIZONS

	FJ	FR	SB	RT	V	HY	FT	HL
A1	0,4-0,8	0,7-1,3	1,3	1,4	1,4-1,6	0,7-1,0	1,5	1,4
exo	1,4	1,1-1,5	-	-	-	-	1,6	1,7
Bt	-	-	-	-	-	-	1,65	1,6-1,7
Bfe	1,6-1,9	1,4-1,9	-	-	-	1,9	1,9	-
B carb.	-	-	-	-	1,9	2,0	-	1,6
Bg	1,4	1,2-1,3	-	-	-	1,4-1,7	-	-
(B)	1,2	0,9-1,05	0,95	1,25	1,5-1,8	1,6-1,8	-	1,6-1,8
BC	1,7	1,3	1,1	1,9	2,0	1,6	-	1,7-1,9
R	-	-	-	2,2	2,3	-	-	2,4

- FR = sols Ferrallitiques rouges
- FJ = sols Ferrallitiques jaunes
- SB = sol Brun
- RT = Sols Rouges Tropicaux
- V = Vertisols
- HY = Sols Hydromorphes
- FT = Sols Ferrugineux Tropicaux
- HL = Sols Halomorphe et lessivé.

C H A P I T R E VI

EXEMPLES DE COMPOSITION VOLUMIQUE

Dix exemples de composition volumique en fonction de la profondeur sont présentés sur les figures 11 et 12. Ces compositions volumiques ont été établies à partir des formules données au chapitre IV (voir paragraphes 4, 5 et 6). Sept graphiques caractérisent les sols en saison des pluies, au maximum d'humidité pour DJOLA 1, HUM 3, ONCH 4, MARVAY A et MARVAY B, deux mois après le début des pluies pour EBOL 1 et NGD 256. Les trois autres ont été établis au minimum d'humectation, en fin de saison sèche.

On trouve de gauche à droite, d'abord les courbes de :

Humidité volumique - Porosité sur mottes - Porosité calculée.

Les trois segments déterminés par ces **trois** courbes sur une droite horizontale à une profondeur donnée représentent donc le pourcentage du volume unité occupé respectivement par l'eau, le gaz des mottes et le gaz des fissures et cavités.

Les autres segments suivants représentent la matière solide avec, dans l'ordre, les pourcentages du volume unité occupés par le refus, les sables, les limons et l'argile :

!	10	20	30	40	volume	unité	70	80	90 %	!											
!	!	!	!	!	!	!	!	!	!	!											
!	porosité calculée par les densités					!	matière solide				!										
!	porosité mesurée			!								!									
!				!								!									
!	1	Humidité volumique	!	2	gaz	!	3	gaz	!	4	refus	!	5	sables	!	6	limon	!	7	argile	!

Commentaire succinct :

1/ SOLS JAUNE ET SOL ROUGE FERRALLITIQUES : (figure 11)

Bien que l'humidité ne soit pas encore à son maximum le sol jaune est proche de l'asphyxie entre 0,7 et 2,0 m de profondeur : l'humidité est supérieure à la porosité sur mottes et inférieure de 12 % à

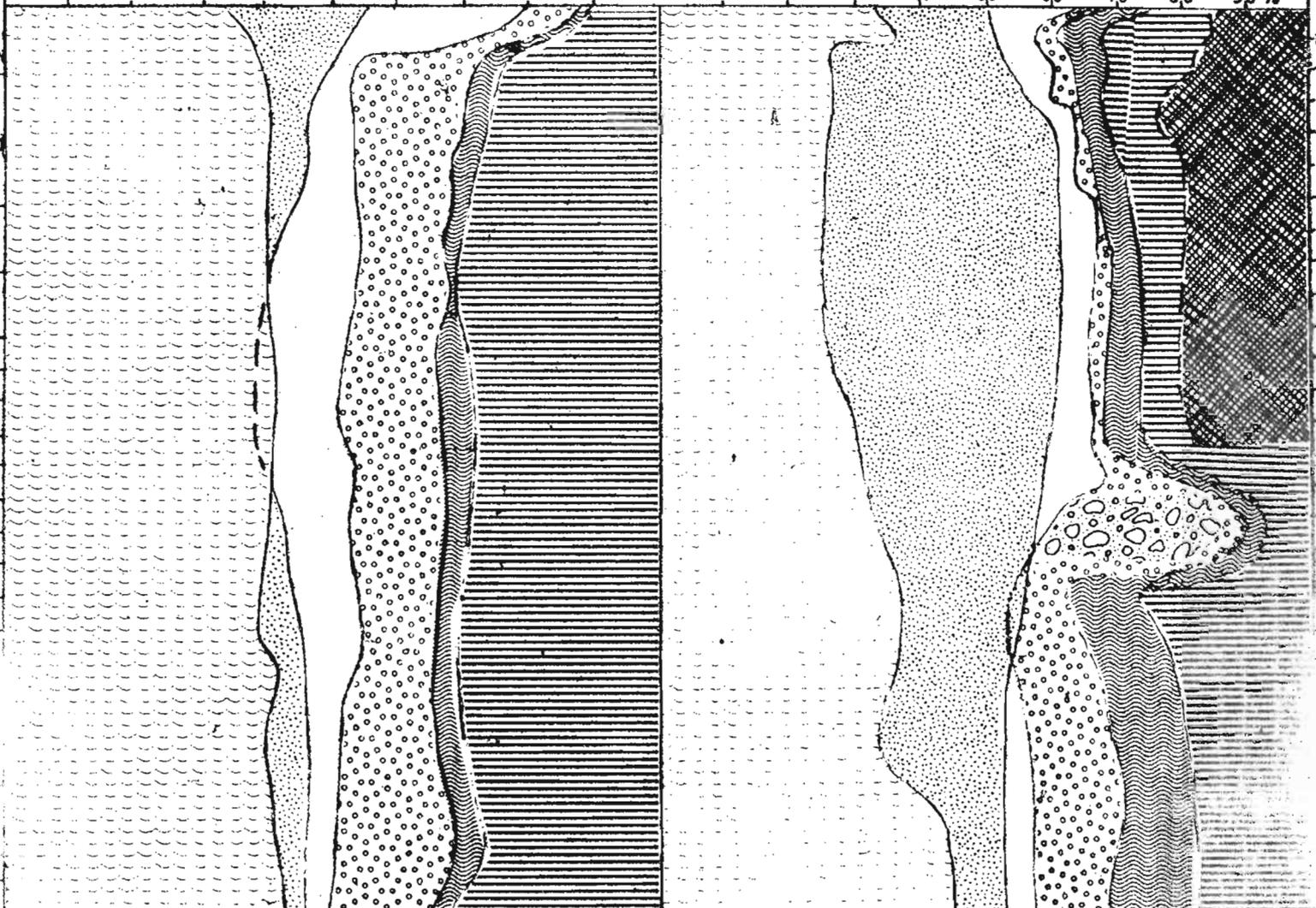
Figure 11. COMPOSITION VOLUMIQUE

EBOL 1 Ferrallitique jaune (pluies 1970)

NGD 256 Ferrallitique rouge (pluies 1970)

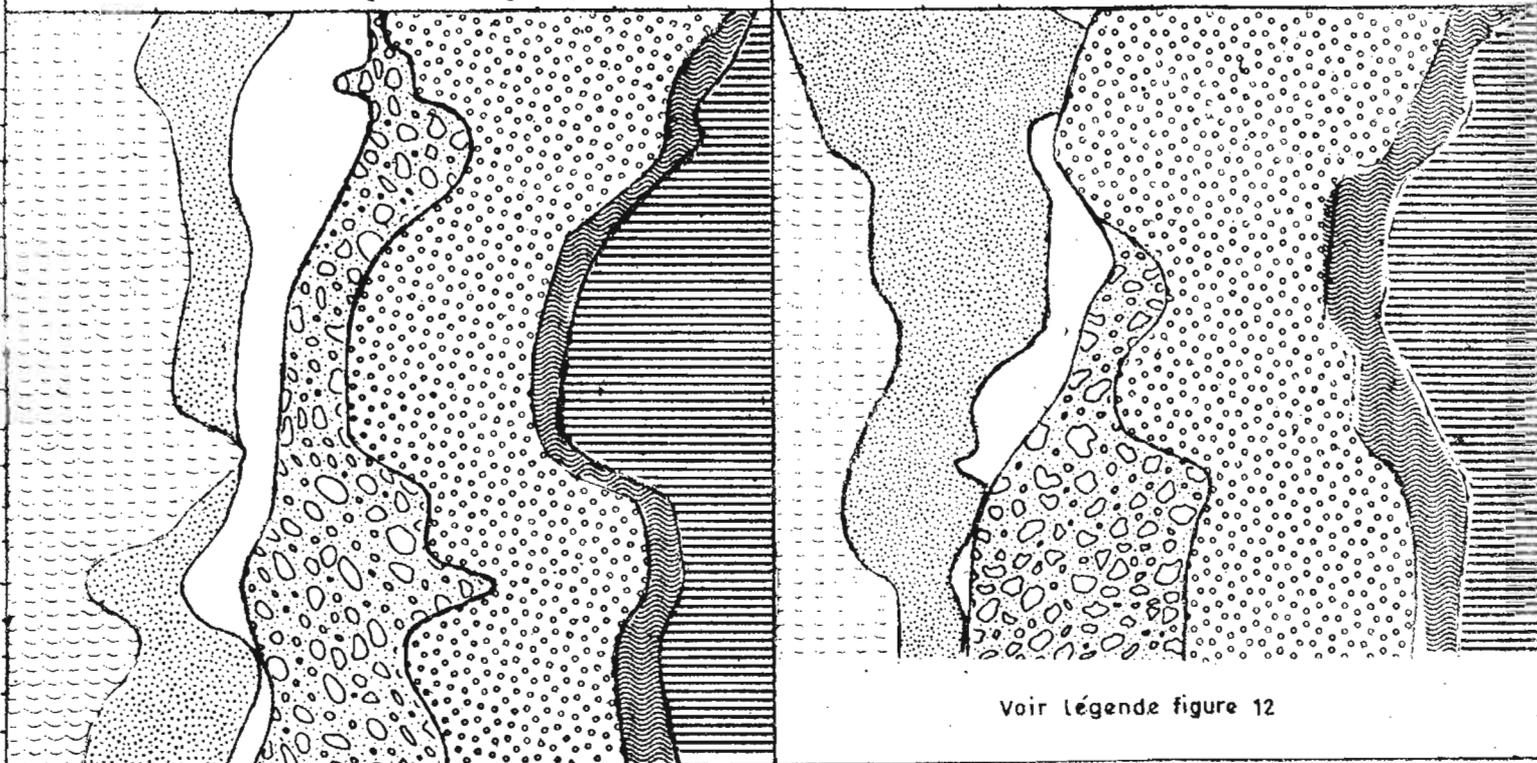
10 20 30 40 50 60 70 80 90%

10 20 30 40 50 60 70 80 90%



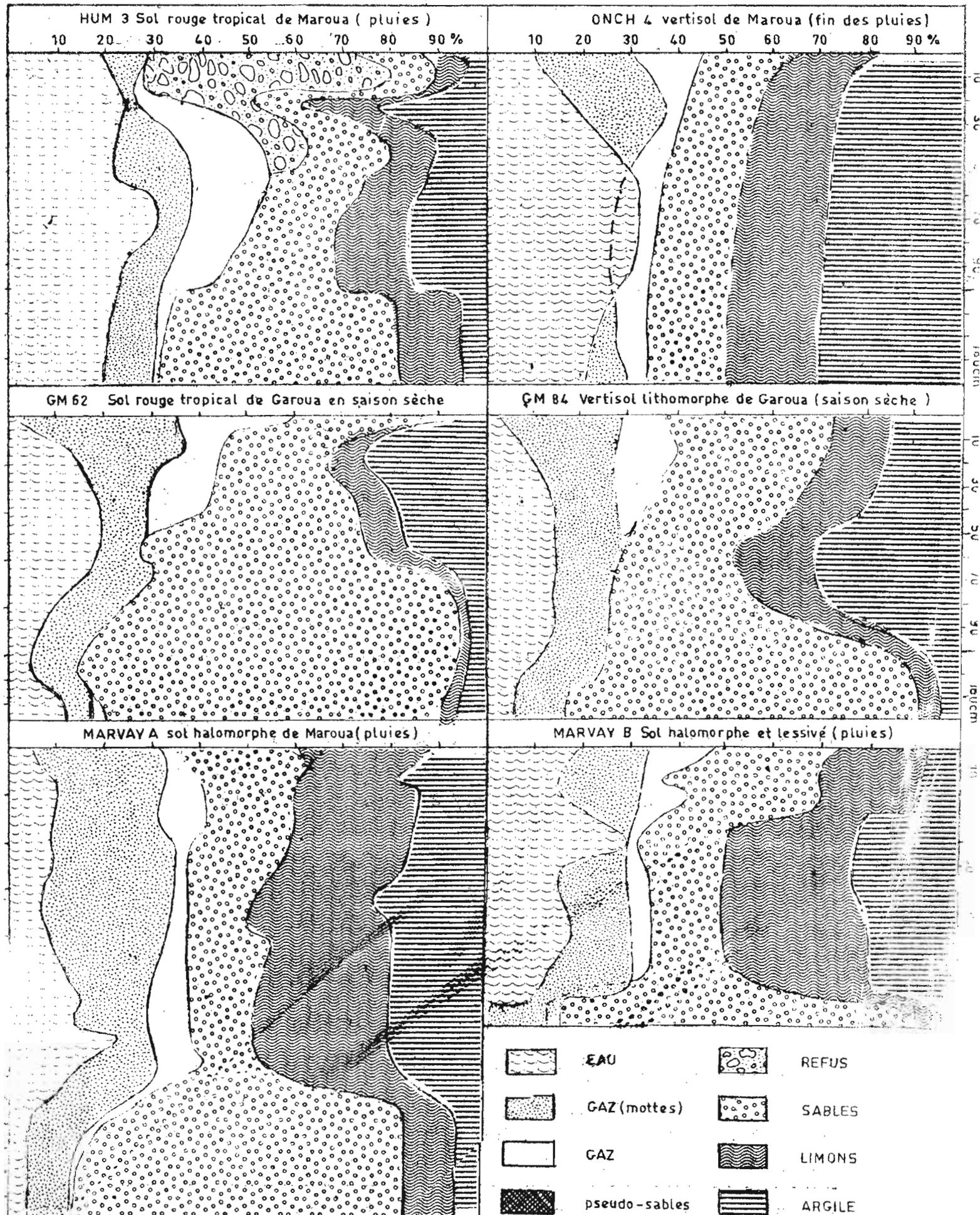
DJOLA 1 Ferrugineux sur grès (fin des pluies)

GM 33 Ferrugineux sur granite (saison sèche)



Voir Légende figure 12

Figure 12 COMPOSITION VOLUMIQUE



la porosité calculée. La porosité sur mottes étant sous-estimée de quelques % cela signifie que presque tous les pores des agrégats sont gorgés d'eau et que le gaz n'occupe plus que des espaces plus grossiers : fissures, cavités, tubes, espaces inter-agrégats.

Le sol rouge au contraire est très aéré, aucun étranglement ne s'y manifeste et le gaz occupe encore plus de 30 % du volume dans les deux premiers mètres.

Cette différence fondamentale entre sol rouge et sol jaune en saison des pluies s'observe dans les diagrammes de composition volumique de tous les sols Ferrallitiques étudiés sauf MEKA 2 et BALI J qui sont associés topographiquement à des sols rouges. Ces résultats seront présentés dans un autre rapport.

Dans ces sols Ferrallitiques le volume d'eau emmagasinée est énorme : Pour la tranche 0-4 m : 1,6 m³/m² * dans le sol sol jaune (tranche d'eau équivalente 160 cm) et 1,25 m³/m² dans le sol rouge (tranche d'eau : 125 cm). Cette quantité d'eau représente 84 % et 75 % de la pluviométrie annuelle.

Le volume occupé par le gaz est pour la tranche 0-4 m étudiée de 0,48 m³/m² dans le sol rouge. L'aération diminue nettement à partir de 4 m.

La matière solide occupe respectivement 46 % et 35 % du volume. L'argile à elle seule en occupe presque 30 %. Le poids de la matière sèche contenue dans la couche 0-4 m est de 5 tonnes/m² pour le sol jaune (46 % de densité réelle 2,7) et de 4 tonnes/m² pour le sol rouge (35 % de densité réelle 2,85).

La pression exercée par le poids du sol humide à 4 m de profondeur est de 0,55 et 0,52 kg/cm².

0,3 m. éq. de potassium échangeable supposés répartis uniformément dans la tranche 0-4 m représenteraient respectivement 585 g et 475 g par m² surface.

2/ SOLS FERRUGINEUX TROPICAUX (figure 11)

Le sol sur grès DJOLA 1 étudié vers son maximum d'humidité en contient 20 % dans les deux premiers mètres. Un engorgement apparaît au-dessus du niveau grossier qui ne sert donc pas de drain.

* Tous ces résultats sont rapportés au m² de terrain.

Le volume d'eau emmagasiné dans les trois mètres étudiés était de 0,57 m³/m² soit une couche d'eau de 57 cm ou 49 % de la pluviométrie annuelle.

Le volume occupé par le gaz est faible : 20 % dans le premier et le troisième mètre, 15 % dans le second soit au total 0,55 m³. Ce sol est mieux aéré (0,18 m³/m²) que le sol jaune Ferrallitique (0,12 m³/m², mais moins bien que le sol rouge (0,30 m³/m²).

La matière solide occupe 55 % du volume en surface et 65 % en profondeur. Le poids de la tranche 0-3 m humide est de 6,5 tonnes/m² donc bien plus que 4 m de sol Ferrallitique.

La pression exercée par mètre de sol humide est de 0,19 kg/cm² et donc bien supérieure à celle des sols ferrallitiques humides : 0,12 kg/cm².

Le sol sur granite GM 33 était à son minimum d'humectation : 10 % dans les deux premiers mètres soit une tranche d'eau de 20 cm représentant 22 % de la pluviométrie annuelle.

Le volume occupé par le gaz est de 0,3 m³/m² dans le premier mètre et 0,2 m³/m² dans le second soit 0,25 m³ par m³.

Le poids des deux premiers mètres de matière solide est de 3,5 tonnes/m².

3/ SOLS ROUGES TROPICAUX (figure 12)

HUM 3 est étudié à son maximum d'humidité, GM 62 au minimum.

HUM 3 contient en volume 25 % d'eau dans le mètre supérieur soit une tranche de 25 cm et encore 20 % dans la roche altérée sous-jacente. Les deux premiers mètres du sol ont donc emmagasiné 0,45 tonnes/m² soit une tranche de 45 cm représentant 56 % de la pluviométrie annuelle.

Le pourcentage de gaz est très important dans l'horizon B : jusqu'à 30 % ; aucune asphyxie n'est à redouter.

La matière sèche occupe 70 % du volume en A et C, 50 % en B et BC. Le poids du solum (1m) est donc de 1,6 tonne/m² (densité réelle 2,95) et il exerce une pression de 0,185kg/cm².

GM 62 contient seulement 15 % d'humidité dans le solum (70 cm) soit 100 litres d'eau/m² (tranche équivalente 10 cm).

Le pourcentage de gaz est important dans le solum : 25 %.

La matière sèche occupe 60 % du volume dans le solum et 80 % dans l'horizon C. Le poids du solum est donc de 1,65 tonne/m². Il exerce une pression de 0,165 kg/cm².

4/ VERTISOLS (figure 12)

ONCH 4 est à son maximum d'humidité, GM 84 au minimum.

En ONCH 4 l'humidité occupe 30 % du volume entre 50 et 110 cm de profondeur et l'asphyxie est à peu près réalisée isolant de l'atmosphère les couches profondes du sol.

L'humidité du premier mètre équivaut à une couche de 25 cm d'eau et celle du mètre suivant de 22 cm. 47 cm d'eau emmagasinée dans les deux mètres étudiés représentent 58 % de la pluviométrie annuelle.

En GM 84 qui est à son minimum d'humidité le profil hydrique est encore gonflé dans l'horizon B : 14 % d'humidité entre 0,3 et 1 m de profondeur.

La tranche d'eau contenue dans le premier mètre est de 12 cm, dans le suivant de 5 cm au plus. Soit au maximum 18 % de la pluviométrie annuelle.

L'aération est correcte à cette saison 30 % en surface, 12 % à partir de 0,6 m.

La matière solide occupe 60 % en A, 70 % en B et 85 % en C. Le poids du solum (1 m) est de 1,8 tonne/m².

5/ INTERFLUVE HALOMORPHE (figure 12)

Cette séquence est étudiée en fin de saison des pluies donc vers son maximum d'humectation. En haut d'interfluve (MARVAY A) l'humidité est faible 8 % dans le mètre supérieur puis on constate un crochet à 20 % dans l'horizon BC. La tranche d'eau emmagasinée dans le solum est de 21 cm. En bas d'interfluve (MARVAY B) l'humidité est plus élevée : 18 % dans le solum dont l'épaisseur n'est que 1 m. Compte tenu des surfaces occupées la tranche d'eau emmagasinée en moyenne sur l'interfluve est de 20 cm.

Le volume gazeux est important 25 % dans le solum de MARVAY A et 11 % dans celui de MARVAY B. Sa composition n'est pas connue. La matière solide occupe 62 % du volume du solum. Le poids moyen du solum est de 2,1 tonnes/m² exerçant une pression de 0,21 kg/cm².

6/ COMPARAISON

L'eau emmagasinée dans les sols Ferrallitiques jaune, et rouge et le sol Ferrugineux sur grès sont en saison des pluies :

Couche	Ferrall. J	Ferrall. R	Ferrug. Trop.
0 - 1 m	39 cm	27 cm	21 cm
0 - 2 m	80 cm	55 cm	45 cm
0 - 3 m	120 cm	90 cm	57 cm
0 - 4 m	160 cm	125 cm	-

soit respectivement 44 %, 34 % et 49 % de la pluviométrie annuelle pour la couche 0 - 2 m.

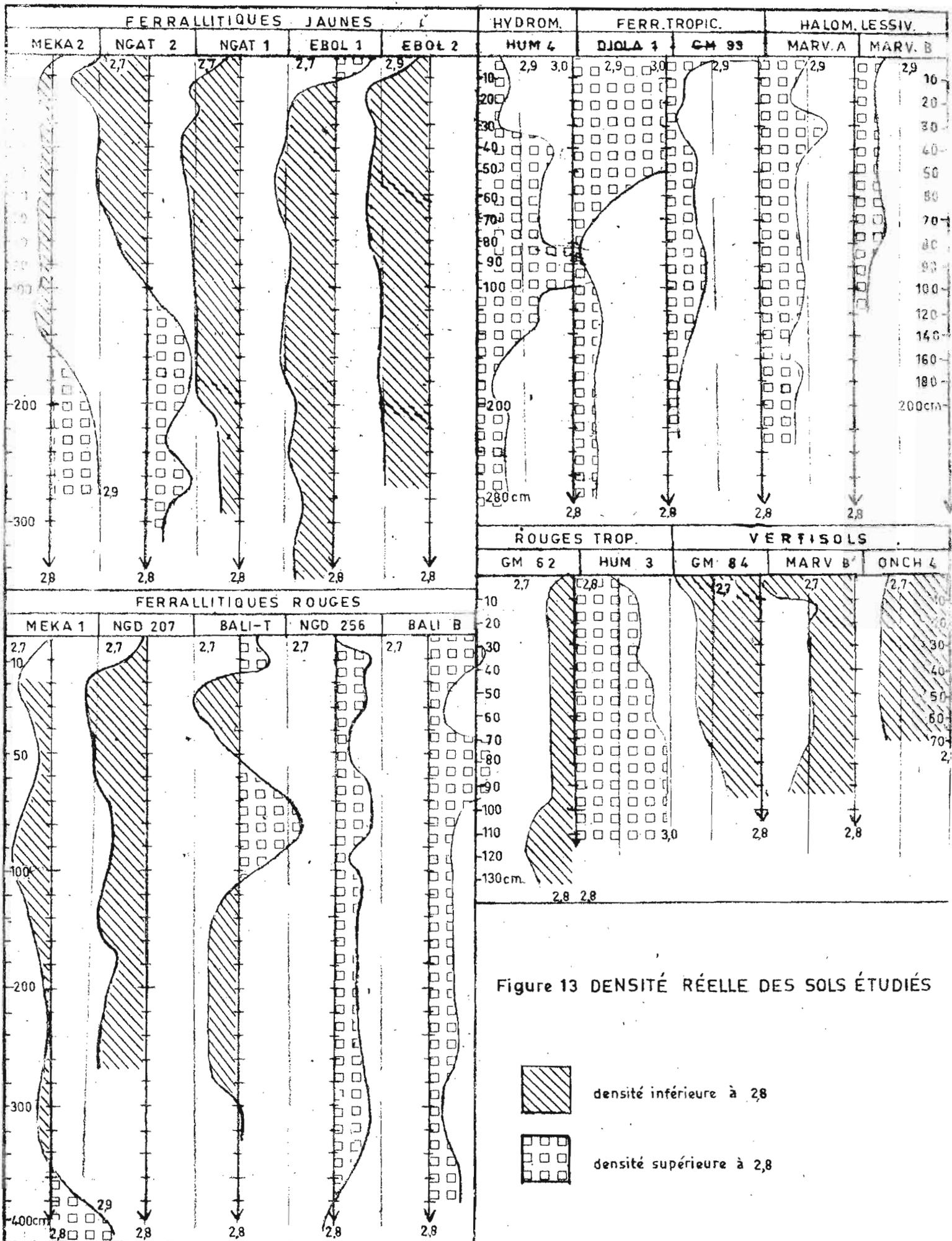
L'eau emmagasinée à Maroua dans le Vertisol, le Sol Rouge Tropical et le sol halomorphe sont en fin de saison des pluies :

Couche	Vertisol	Rouge Trop.	Halomorphe
0 - 1 m	25 cm	25 cm	8 cm
0 - 2 m	47 cm	45 cm	20 cm

soit respectivement 58 % - 56 % - et 25 % de la pluviométrie annuelle dans la couche 0 - 2 m. De plus les 20 cm du sol halomorphe représentent les réserves totales de ce sol tandis que l'altération du sol Rouge et les couches profondes du vertisol contiennent encore des réserves importantes.

C O N C L U S I O N :

Etablis à différentes saisons pour chaque type de sol d'une région les diagrammes de composition volumique renseignent sur la dynamique de l'eau et des gaz qu'ils contiennent et permettent de suivre les variations, en fonction du paramètre profondeur, des taux volumiques des différentes fractions granulométriques.



C H A P I T R E VII

C O N C L U S I O N

La connaissance des variations de la densité apparente de la surface du sol jusqu'à la roche profonde (profil densimétrique) présente un double intérêt :

1/ Etudier les processus pédogénétiques qui déterminent cette densité (nature, importance, fonctionnement). Pour cela chaque ondulation du profil densimétrique (crochets endo ou exo) est analysée par une méthode dichotomique qui permet de remonter de proche en proche jusqu'à le ou les agents responsables : minéralogie, granulométrie, porosité intra-agrégats, porosité extra-agrégats, humidité. Cette analyse nécessite la détermination de variables d'ordre moins élevé que la densité apparente et en premier lieu :

- La densité réelle fonction elle-même de la minéralogie et de la granulométrie.
- La porosité des mottes, la porosité de cavités, fissures et interstices, le volume racinaire.
- Toutes les ondulations révélées par les profils densimétriques n'ont cependant pas été expliquées. Beaucoup le seront lorsque les faits morphologiques pourront être chiffrés (consistance, degré de structuration, porosité de fissures, de tubes, de cavités, micro-structure des pseudo-sables, des minéraux amorphes etc.).

2/ Etablir la composition volumique en eau, gaz et matière du sol (diagrammes de composition volumique) à différentes périodes pour étudier la dynamique saisonnière de l'eau, des gaz et des matières solides (gonflement).

Ce rapport avait pour objet :

- d'exposer la méthode utilisée pour mesurer la densité apparente,
- d'indiquer le mode de raisonnement suivi pour tenter d'expliquer ses variations verticales et saisonnières,
- et enfin, pour montrer l'intérêt de ces déterminations, de présenter les profils densimétriques des principaux types de sols du Cameroun ainsi que leurs diagrammes de composition volumique.

Les résultats présentés ici, valables pour les profils choisis, ne peuvent être étendus a priori à l'ensemble des classes qu'ils représentent. De nombreuses mesures sont encore nécessaires pour établir avec certitude les caractères densimétriques des différents types de sols du Cameroun. Les principaux caractères observés sont :

Les horizons argileux des sols Ferrallitiques étudiés sont nettement moins denses (0,9 à 1,4) que ceux des sols Tropicaux (1,5 à 1,8). Par contre les densités apparentes des horizons ferruginisés sont voisines dans tous les sols.

Les sols jaunes Ferrallitiques étudiés sont plus denses que les rouges et l'amplitude des variations y est plus grande.

Le profil densimétrique présente une forme concave dans les horizons (B) d'argilisation des sols Ferrallitiques et des sols rouges Tropicaux. Elle est convexe dans les horizons d'accumulation d'argile, fer et carbonates. Les vertisols présentent une montée lente et régulière de la densité apparente en B et leur densité (1,5 à 1,8) est aussi celle des sols Halomorphes. Les sols rouges (Ferrallitiques et Tropicaux) qui sont par ailleurs riches en fer amorphe et en pseudo-particules (HUMBEL et NALOVIC 1970) sont moins denses respectivement que les sols jaunes Ferrallitiques et Ferrugineux Tropicaux (densité hors cailloux).

La nature des minéraux néoformés n'est pas fondamentalement responsable de l'allègement du sol par rapport à la roche. La densité réelle des sols n'est en effet que peu inférieure à celle de la roche saine sous-jacente (0,1 à 0,3). Ce sont la structure des produits néoformés, (pseudo-sables), l'agrégation (structure sphéroïdale et structure fragmentaire fine) et l'activité biologique (pores, tubes, cavités) qui sont les principaux facteurs d'allègement.

Problèmes particuliers 1/ Les sols Ferrallitiques (sauf EBOL, séquence la plus équatoriale) présentent à faible profondeur un petit crochet exo qui paraît dû à un tassement : La cause peut être : anciennes cultures ou surpâturage, alternances d'humectation, pression racinaire.

2/ Un crochet endo s'observe fréquemment en profondeur immédiatement au-dessus de l'horizon ferrugineux (sols ferrallitiques) ou de la roche décomposée (autres sols). Traduit-il une circulation oblique d'eau qui aurait échappée à l'examen morphologique ?

3/ Inversement une augmentation de densité apparente caractérise parfois les premiers décimètres de la roche altérée. S'agit-il d'une accumulation non décelée ou plus simplement d'un colmatage des joints de la roche par de

l'argile (illuviée ou néoformée) comme on peut l'observer dans les sols Rouges Tropicaux ?

4/ Les profils densimétriques des sols Lessivés (Ferrugineux, Halomorphes) présentent souvent une portion de courbe en S inversé qui ne paraît pas avoir partout la même cause. L'analyse densimétrique devrait permettre de distinguer le lessivage accompagné de tassement du lessivage sans tassement. Le mouvement en S de l'horizon d'accumulation du sol Ferrugineux sur granite n'a pas reçu d'explication satisfaisante.

5/ Il existe parfois en surface du sol une augmentation de densité apparente due à une concentration en minéraux lourds. La densité réelle hors radicelles augmente d'ailleurs assez fréquemment à la partie supérieure des profils.

L'analyse densimétrique peut améliorer nos connaissances sur divers processus pédogénétiques qui ont pour effet, les uns de créer les constituants du sol à partir des matériaux fournis par la roche-mère, les autres d'en diluer ou concentrer la matière. Certaines données sont utiles ou nécessaires à une interprétation correcte du profil densimétrique, ce sont : la densité réelle - la porosité sur mottes - la granulométrie - la minéralogie semi-quantitative - la résistance à la pénétration - la limite et le rapport de retrait - les limites de liquidité et de plasticité. Enfin la description morphologique doit être la plus précise possible et étayée par des tests chiffrables.

L'échelle du décimètre - cube que fournit le densitomètre à membrane utilisé convient généralement à cette analyse qui pourrait être utilement complétée par des mesures de densité apparente sur mottes ou agrégats au laboratoire (échelle du centimètre-cube).

C H A P I T R E VII

B I B L I O G R A P H I E

- BARBERY (J.).- 1970. Notice des cartes pédologiques 1/50.000° FOUMBAN-DESCHANG 3d et 4c. Centre ORSTOM de Yaoundé.
- CHAMPETIER DE RIBES (G.).- 1956. Carte géologique de reconnaissance au 1/500.000e. YAOUNDE-EST et Notice.
- CURIS (M.), GLAISSE (G.).- 1954-56. Etude pédologique de la station de NKOEMBONE. ORSTOM - IRCAM 11 p. YAOUNDE.
- HUMBEL (F.X.).- 1967. Notice de la carte pédologique 1/50.000° NGAOUNDERE 1d. Centre ORSTOM de Yaoundé, 118 p.
- HUMBEL (F.X.) et PELLIER (J.L.).- 1969. Porosité, densité et perméabilité de sols Ferrallitiques rouge et jaune près de YAOUNDE. Centre ORSTOM de YAOUNDE, 28 p.
- MARTIN (D.), SIEFFERMANN (G.), VALLERIE (M.).- 1966. Les sols rouges du Nord-Cameroun. Cah. ORSTOM sér. Pédol., vol. IV, 3.
- MARTIN (D.).- 1969. Les sols Hydromorphes à pseudo-gley lithomorphes du Nord-Cameroun. Cah. ORSTOM sér. Pédol., vol. VII, n° 2 et 3.
- NALOVIC (Lj.) et HUMBEL (F.X.).- 1970. Contribution à l'étude de la localisation des différentes formes du fer au sein de quelques sols du Cameroun. (à l'impression).
- PELLIER (J.L.).- 1969. Données générales sur la répartition des principaux types de sols de la région de Yaoundé. Centre ORSTOM de Yaoundé, 24 p.
- SEGALEN (P.).- 1962. Notice de la carte pédologique 1/50.000° MAROUA. Centre ORSTOM de Yaoundé.
- SEGALEN (P.).- 1968. Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes. Cah. ORSTOM sér. Pédol. Vol. VI n° 1 1968.