

INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHES
FRUITIERES OUTRE-MER.

(I.F.A.C.)

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ET TECHNIQUE OUTRE-MER.

(O.R.S.T.O.M.)

"EROSION, RUISSELLEMENT ET DRAINAGE OBLIQUE SOUS
UNE BANANERAIE DE BASSE COTE D'IVOIRE".

I - MILIEU, DISPOSITIF ET RESULTATS EN 1966

Par

ROOSE (E.J.)

Chargé de recherche en pédologie à l'ORSTOM

&

GODEFROY (J.)

Agro-pédologue I.F.A.C.

Abidjan,

Décembre 1967

P L A N

INTRODUCTION

Chap. 1 - LE MILIEU ET LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL.

- 1.1. Situation géographique et végétation.
- 1.2. Le climat.
- 1.3. Le sol.
- 1.4. Description du dispositif expérimental.
- 1.5. Les mouvements de l'eau de gravité dans le sol.

Chap. 2 - LES RESULTATS DE LA CAMPAGNE 1966.

- 2.1. La pluviosité, la végétation et les pratiques culturales.
- 2.2. L'érosion, le ruissellement, le drainage oblique et l'irrigation.
- 2.3. Résultats d'analyse et discussion.
- 2.4. Conclusions : les pertes physiques et chimiques.

Chap. 3 - CONCLUSIONS GENERALES.

Remerciements.

ANNEXES

1. Description détaillée du dispositif de mesure de l'érosion, du ruissellement et du lessivage oblique.
2. Description et résultats analytiques du sol.
3. Bibliographie générale.

INTRODUCTION.

Un protocole d'accord signé en mars 1967 entre les Directeurs généraux de l'I.F.A.C. et de l'O.R.S.T.O.M. prévoit l'exploitation de deux parcelles aménagées pour l'étude de l'érosion, du ruissellement et du lessivage oblique, l'une sous bananeraie fumée, irriguée et drainée, installée, depuis juin 1965 à Azaguié l'autre mise en place fin 1967 dans la forêt du Téké toute proche.

L'I.F.A.C. assure les manipulations sur le terrain et l'O.R.S.T.O.M. les analyses des échantillons ainsi que le regroupement et l'interprétation des résultats.

Chaque année un rapport rend compte du déroulement des opérations et des résultats obtenus durant la campagne. Ce premier rapport décrit également le dispositif et le milieu dans lequel s'effectuent les mesures.

Les buts poursuivis dans cette étude sont :

- la comparaison de l'érosion et du ruissellement au cours de plusieurs cycles de culture du bananier à ceux qu'on observe sous une forêt dense sempervirente voisine.
- l'observation et la mesure qualitative et si possible quantitative du drainage et du lessivage oblique à l'intérieur d'un sol ferrallitique fortement désaturé sur schiste.
- un bilan approximatif des mouvements des minéraux et matières intéressant la fertilité ou la genèse du sol.

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un programme de recherches sur l'érosion et le lessivage oblique des sols des régions subéquatoriales sous végétation naturelle ou cultivée qui a débuté en 1964 et comprend déjà des parcelles expérimentales à Adiopodoumé, Anguédédou, Azaguié, Divo, Bouaké et Korhogo.

1.1. Situation géographique et végétation.

La station expérimentale de l'I.F.A.C. à Azaguié (1) est située juste en bordure de la forêt classée du Téké à une quarantaine de kilomètres au Nord d'Abidjan.

Le groupement floristique de cette région est la forêt dense humide sempervirente. MANGENOT (1955) appelle pélohygrophyle la formation à Diospyros et Mapania qui s'individualise sur les sols argileux issus de schistes.

La parcelle (2) de la bananeraie a été défrichée manuellement vers 1951, débordée au tracteur, drainée puis labourée au trident sur 30 cm. Depuis lors cette parcelle a vu se succéder une quinzaine de cycles de culture (4) comprenant des essais de fumure, paillage et irrigation (environ 20 mm tous les 10 jours) durant la saison sèche (depuis 1960).

1.2. Le climat.

La station I.F.A.C. de Azaguié se situe dans une zone dont le climat est qualifié de Guinéen-forestier par AUBREVILLE ou encore de Equatorial Attiéen à facies intérieur par ROUGERIE (1960). Il est caractérisé par une forte pluviosité répartie en quatre saisons, une température variant peu autour de 26°C et une humidité très élevée voisine de 90 %.

(1) 5° 33' latitude Nord ; 4° 3' longitude Ouest.

(2) Parcelle du carré 4, près de la collection dans le bas-fond.

(3) Réseau de drains à ciel ouvert de 1 m de profondeur tous les 30 mètres environ.

(4) Bananiers cultivar Poyo plantées à la densité de 2000 pieds/ha : le cycle dure de 9 à 12 mois.

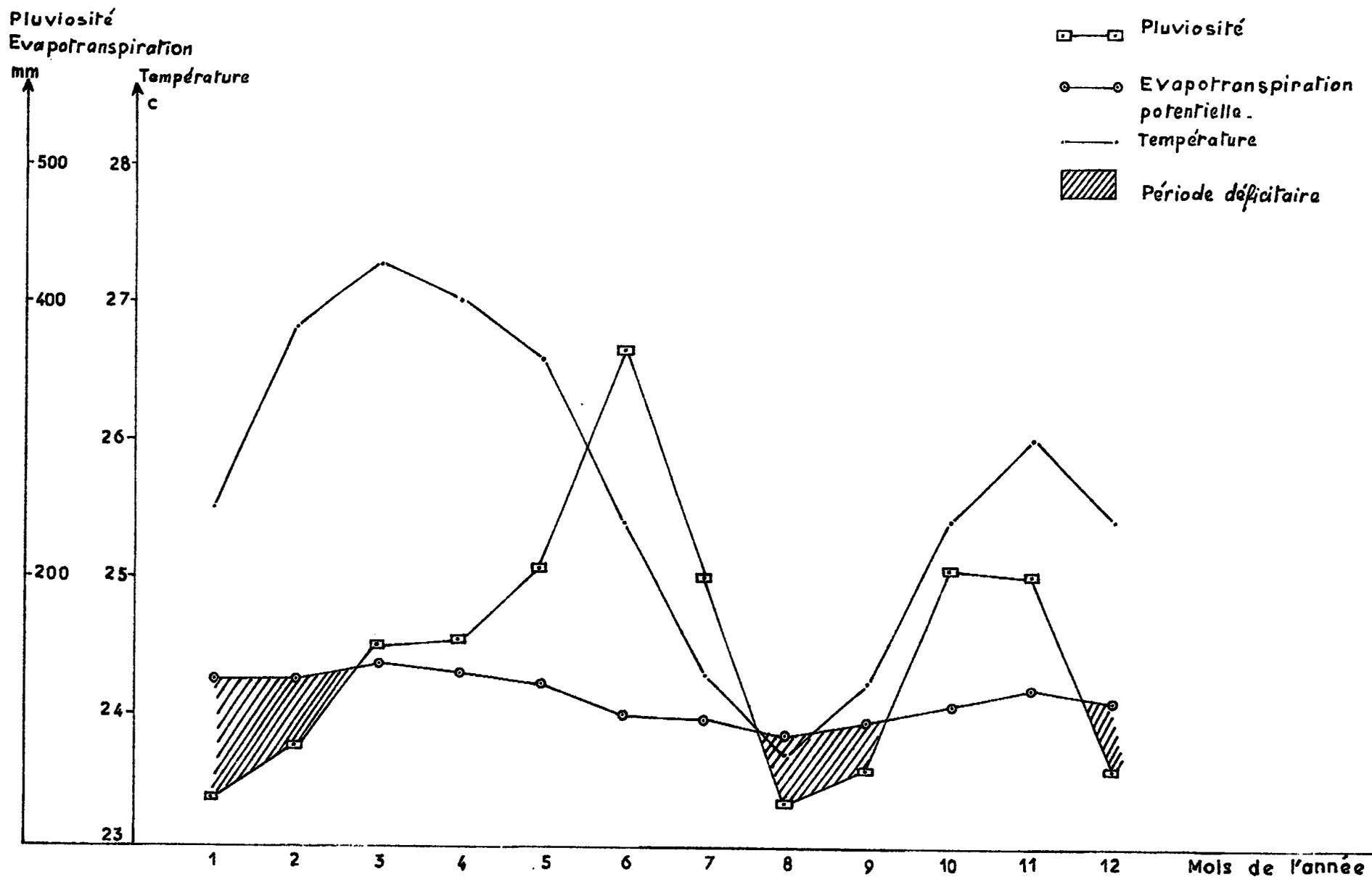


Figure 1 variations mensuelles de température, pluviosité et évapotranspiration potentielle (Formule de TURC) à AZAGUE (Station IFAC) - Moyennes de 1951- 1965-

Les précipitations moyennes annuelles (1) sont de l'ordre de 1800 mm mais peuvent varier du simple au double d'une année à l'autre. Deux saisons des pluies centrées sur juin et octobre alternent avec deux saisons sèches d'importance très inégale (voir figure 1). La grande saison des pluies commence en avril-mai par une série de tornades violentes mais de courte durée (fortes intensités mais hauteur moyenne). Près de 50 % du total des précipitations tombent en mai-juin-juillet. Août est un mois gris, nuageux mais ne reçoit que de faibles crachins. De septembre à mars la pluviosité est faible : la petite saison des pluies centrée sur octobre est très irrégulière. Il peut cependant survenir des averses importantes.

En pleine saison (juin-juillet) la pluie peut tomber durant des heures avec des intensités relativement fortes. On a enregistré le 3 juillet 1966 une pluie de 110 mm en 24 heures. Les pluies exceptionnelles sont particulièrement intéressantes à étudier pour leur action érosive et le drainage vertical et oblique auxquels elles donnent naissance. Il semble que des intensités instantanées de plus de 2,5 mm/min. soient très rares mais il est fréquent d'enregistrer des pluies de 1 à 1,5 mm/min. pendant plus d'une heure. Il pleut en moyenne 1 jour sur 3 dans l'année.

La température annuelle moyenne est de 25° 6. (ELDIN et DAUDET, 1967) : c'est en mars et avril qu'il peut faire le plus chaud tandis qu'il fait frais de juin à septembre.

L'humidité relative mensuelle (moyenne de 1962 à 1965) varie de 77 % en février à 88 % en juin : elle descend en dessous de 50 % lors des rares manifestations de l'harmattan en décembre-janvier.

(1) Moyenne de 15 années : 1951 à 1965.

L'évapotranspiration potentielle annuelle s'élève de 1330 mm (ELDIN et DAUDET, 1967) à 1530 et même 1600 mm suivant qu'on applique les formules de Turc, de THORNTHWAITE ou de BLANEY CRIDDLE : elle dépasse la pluviosité pendant 4 à 5 mois de l'année (voir figure 1) durant lesquels il est courant d'irriguer les plantations à raison de 20 mm tous les 10 jours.

1.3. Le sol.

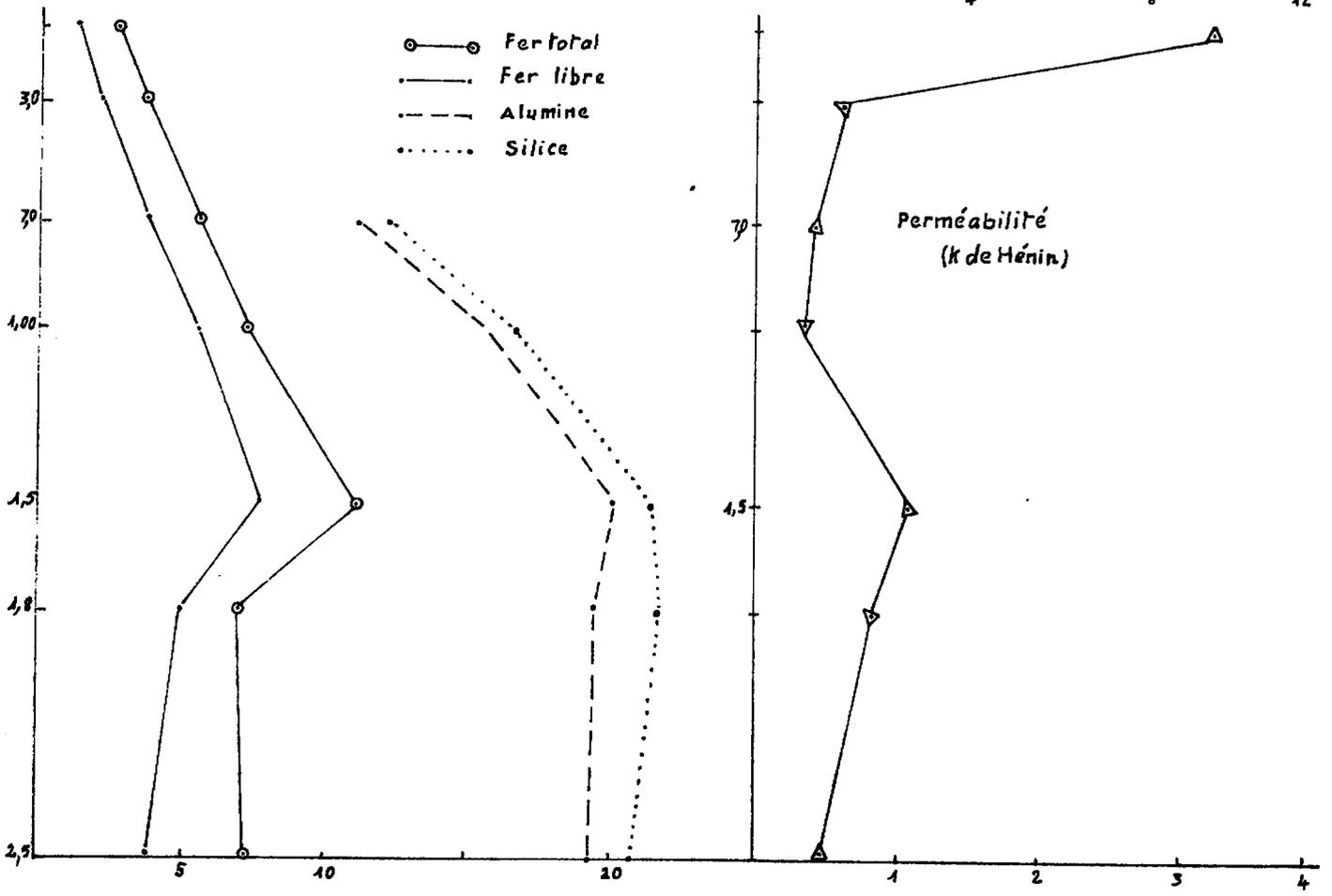
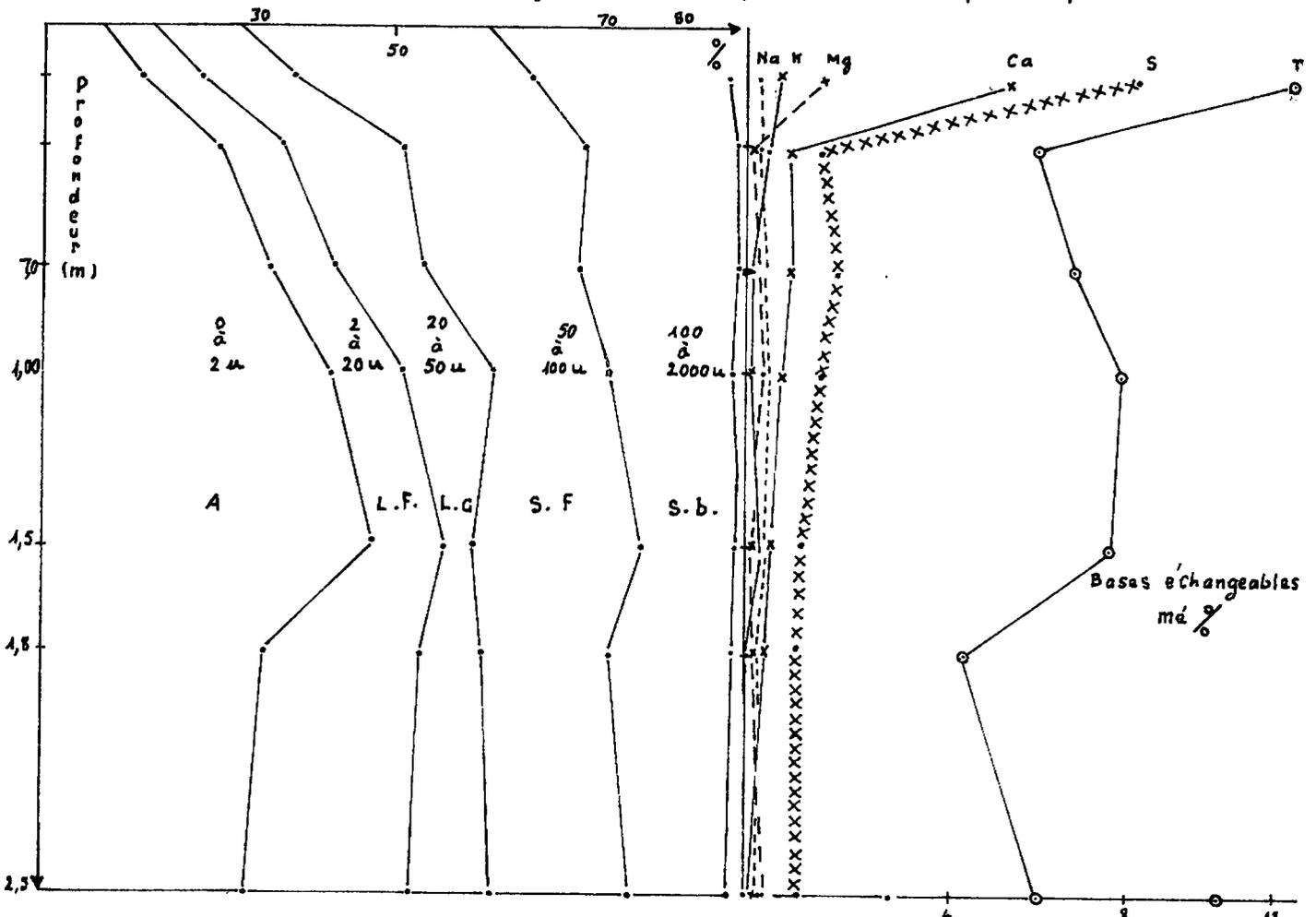
Il y a quinze ans que la station IFAC d'Azaguié a été installée sur la défriche d'une forêt dense semblable à celle du Téké : nous pourrions donc étudier l'influence de la culture bananière et de la forêt sur l'évolution des propriétés de ce type de sol.

La roche affleure dans les bas-fonds : il s'agit de schistes verts, métamorphiques, birrimiens, dont le pendage subvertical facilite l'infiltration profonde des eaux de pluie (MONNIER, 1955). Ces schistes chloriteux sont sillonnés de veinules et de filonets de quartz d'où proviendrait la nappe de gravat que l'on rencontre vers 10 à 40 cm de profondeur.

Le paysage est vigoureusement ondulé. Les collines présentent des flancs à pentes convexes qui peuvent dépasser 15 % ; elles sont séparées les unes des autres par des bas-fonds étroits ou au contraire évasés. Ils sont alors recherchés pour les cultures bananières.

Les sols de la région sont très évolués : ce sont des sols ferrallitiques très désaturés sur les collines (sur argile rouge vers le haut et jaune vers le bas des pentes) et des sols hydromorphes dans les bas-fonds. L'érosion en nappe est active dans la région : elle se traduit par une variation d'épaisseur de sol meuble au-dessus de la nappe de gravier, par l'apparition des cailloux en surface et par un colluvionnement plus ou moins important au bas des pentes. Localement on observe quelques rigoles.

Figure n° 6 quelques caractéristiques du profil.



Sous forêt le sol présente d'abord un mince (5 cm) horizon gris, humifère, riche en sable grossier (peu lié aux matières colloïdales), très poreux et très meuble, puis un horizon (30 cm) brun jaune de pénétration de la matière organique, sablo-argileux déjà beaucoup plus cohérent mais encore très poreux et dont la structure polyédrique est peu développée. Sous bananeraie, ces deux horizons ont été plus ou moins mélangés à la daba et sont intensément exploités par les racines des bananiers presque à l'exclusion de tous les horizons sous-jacents.

Puis vient une nappe (30 à 50 cm d'épaisseur) de graviers de quartz de tailles diverses (0,5 à 15 cm de diamètre) mal calibrés ferruginisés à arêtes émoussées, emballés dans une matrice argilo-sableuse ocre jaune. Seules les racines pivotantes arrivent à s'y frayer un passage et pourtant on y trouve de nombreuses canalicules ($\emptyset = 0,5$ à 2 cm) tapissées de matières argileuses et humifères et que l'on peut observer, jusqu'à plus de 2 mètres de profondeur. Cet horizon est beaucoup plus compact et dur à pénétrer avec les outils. On y décèle déjà vers sa limite inférieure des traces d'individualisation du fer (taches ocres et quelques concrétions lie de vin).

Enfin on observe un horizon d'argile tacheté rouge sur fond ocre en haut puis de plus en plus blanchâtre et limoneux à partir de 1,50 m. De nombreux amas concrétionnaires commencent à durcir vers le haut de cet horizon. La structure est polyédrique moyenne à fine et très bien développée. Quoique l'ensemble soit poreux en grand et parsemé de taches de pénétration de la matière organique l'absence de racines et l'individualisation très poussée du fer nous indique que le profil présente un engorgement temporaire à partir de 40 à 50 cm de profondeur. Peut être est-ce en partie pour cette raison qu'il y a si peu de racines sous forêt et sous bananeraie qui parviennent à percer la nappe de gravat et à se développer sous cet horizon.

Nous avons observé en effet de nombreux indices du rôle important joué par la nappe d'eau libre (nappe phréatique ou suspendue ?) sur les végétaux et l'évolution du sol lui-même malgré des pentes supérieures à 14 %. Tout d'abord la nappe est remontée jusqu'à 30 cm de la surface du sol pendant une quinzaine de jours en juillet 1965 ; de plus elle effectue des oscillations importantes lors des irrigations. Un niveau d'engorgement observé vers 40 cm favorise le développement d'un *Phytophthora* sur les racines de l'avocatier, et entraîne la mort de l'arbre. Enfin nous avons pu voir le long d'un drain une crevasse dans le sol tapissée de racines de bananier bien saines jusqu'à 1,75 m. Il y a donc des chances qu'une amélioration de la porosité et du drainage en profondeur amènerait les racines du bananier à exploiter un plus grand volume de sol alors qu'elles se cantonnent presque exclusivement dans les 40 premiers centimètres.

Sous bananeraie les teneurs en bases sont nettement améliorées par rapport aux teneurs sous forêt et le degré de saturation atteint 70 % en surface mais baisse rapidement à moins de 30 % dès l'horizon gravillonnaire. La capacité d'échange baisse de 10 me. % dans les 25 premiers cm à 5-7 mé % en profondeur. A l'époque du prélèvement il restait une certaine réserve minérale en chaux, magnésie et potasse à mettre probablement en liaison avec des épandages d'engrais antérieurs (dolomie) mais aussi avec la roche mère (potasse en profondeur) qui n'est jamais très éloignée.

Le pH est acide, voisin de 5,5. Les teneurs en phosphore total (0,9 à 0,3 ‰) et en azote total (1,4 à 0,3 ‰) sont moyennes en surface et médiocres en profondeur. Les teneurs en matières organiques sont faibles (3,3 % en surface ; 0,5 % vers 1,5 m et 0,1 % à partir de 2 m). Le rapport C/N baisse progressivement de 13 en surface à 3 au-delà de 2 m ce qui indique une bonne activité microbiologique.

Si on étudie la répartition des fractions granulométriques tout au long du profil, on met en évidence une accumulation très marquée d'argile vers 1 m - 1,5 m. On observera cependant que le ventre de la courbe s'efface si on considère la somme des fractions argile + limon (0 à 20 microns)⁽²⁾. S'agit-il d'un véritable lessivage vertical classique ou faut-il faire intervenir des phénomènes complexes d'érosion différentielle en nappe ou de lessivage oblique pour expliquer l'appauvrissement en particules fines des horizons supérieurs ? Toujours est-il que l'on constate à ce même niveau une nette accumulation de fer libre, de fer total et de phosphore et que les résultats analytiques montrent une nette discontinuité entre cet horizon et les horizons sous jacents (voir annexe 2).

L'origine de l'horizon graveleux nous pose aussi quelques problèmes. En effet s'il provient du fauchage des filons de quartz intercalés dans les bancs de schistes on devrait voir leur trace dans l'horizon d'argile tacheté. Ce qui n'est pas le cas dans les fosses et les tranchées observées (plus de 30 mètres). Peut-être faut-il faire intervenir plusieurs phases géomorphologiques telles que altération, érosion puis épandage de la nappe de gravat, enfin colluvionnement et dépôt de la couche de sable jaune ?

Suivant la dernière classification française (G. AUBERT et P. SEGALEN, 1967) on peut ranger ce sol dans la classe des sols ferrallitiques, sous-classe fortement désaturé groupe remanié, sous-groupe appauvri, famille sur matériau schisteux riche en filons quartzeux.

1.4. Description du dispositif expérimental.⁽¹⁾

Afin d'étudier les phénomènes d'érosion et de lessivage oblique dans les bananeraies de cette région nous avons choisi des conditions de pente et de sol très courantes en Côte d'Ivoire.

(1) Voir aussi la description détaillée à l'annexe n° 1.

(2) Peut-être suffirait-il de faire intervenir la présence de pseudo-sables dans les horizons riches en fer pour expliquer ce "pseudo-ventre".

On a donc délimité entre deux drains à ciel ouvert une parcelle de 22,2 m de long et 2,25 m de large ⁽¹⁾ sur une pente de l'ordre de 14 % par des plaques de plastique empêchant aussi bien l'entrée que la sortie des eaux ruisselantes. De plus le drain amont a été approfondi jusqu'à 2 mètres afin d'arrêter les apports des eaux de drainage provenant des plantations en amont. Au bas de cette parcelle, juste en amont des sols colluviaux, on a creusé une fosse ⁽²⁾ en vue de recueillir les eaux de ruissellement et intercepter le drainage oblique.

Un canal en béton dirige les eaux de ruissellement vers une cuve de stockage ⁽²⁾. Quant aux eaux qui circulent obliquement à l'intérieur du sol, elles sont recueillies par des gouttières disposées dans des fentes creusées sous les limites inférieures des horizons pédologiques et stockées dans des jerrycans en plastique. Le canal de ruissellement et la fosse sont protégés des pluies par un toit de tôle (voir figure 3) Pour éviter les inconvénients dus à une remontée de la nappe (jusqu'à 30 cm de la surface du sol durant les premières semaines de juillet 1965), on a ouvert un canal d'évacuation vers le réseau de drainage.

Un pluviographe à mouvement hebdomadaire enregistre la hauteur l'intensité et la durée des pluies et des irrigations.

1.5. Les mouvements de l'eau de gravité dans le sol.

Lorsqu'une pluie (P) tombe sur le sol, une part (R) va ruisseler en surface tandis que l'autre va s'infiltrer : c'est le drainage (DV) (voir figure 3).

Si un horizon du sol présente une perméabilité supérieure à celle de l'horizon sous-jacent, une fois satisfaite la capacité au champ, une partie de l'eau s'infiltrant verticalement dans cet horizon est libre d'entamer un mouvement

(1) A partir du 15-10-67 la parcelle a été agrandie jusqu'à atteindre 100 m² soit 16,67 m x 6 m.

(2) A partir du 15-10-67, une seconde fosse a été creusée afin de placer un partiteur et une deuxième cuve augmentant ainsi la capacité de stockage à 17 m³.

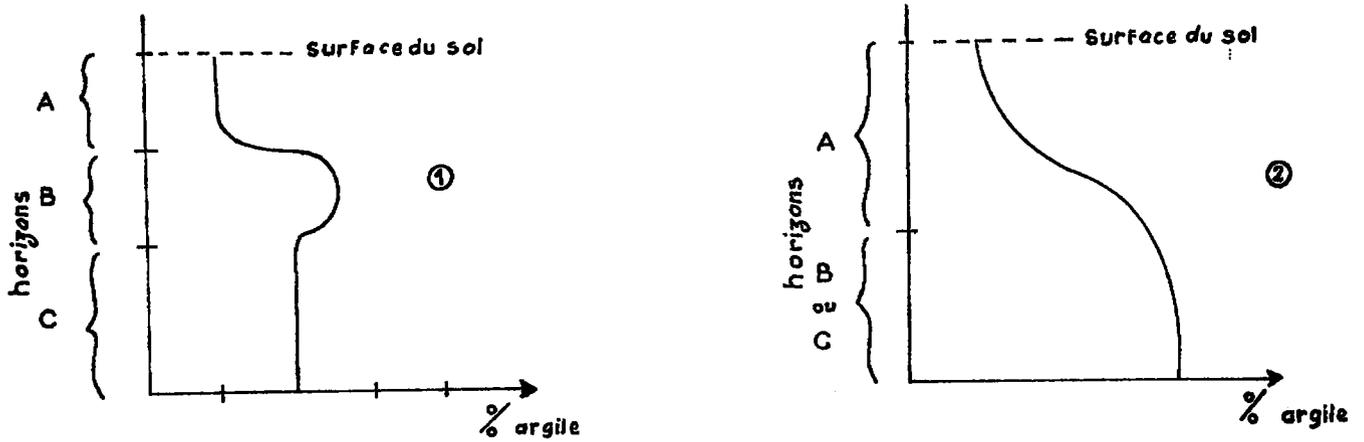


Figure n°2 Courbes de répartition de l'argile en fonction de la profondeur

① sol lessivé classique
"ventre," ou "bec" marqué

② sol "appauvri," en région équatoriale humide
"bec," peu marqué sur la courbe granulométrique.

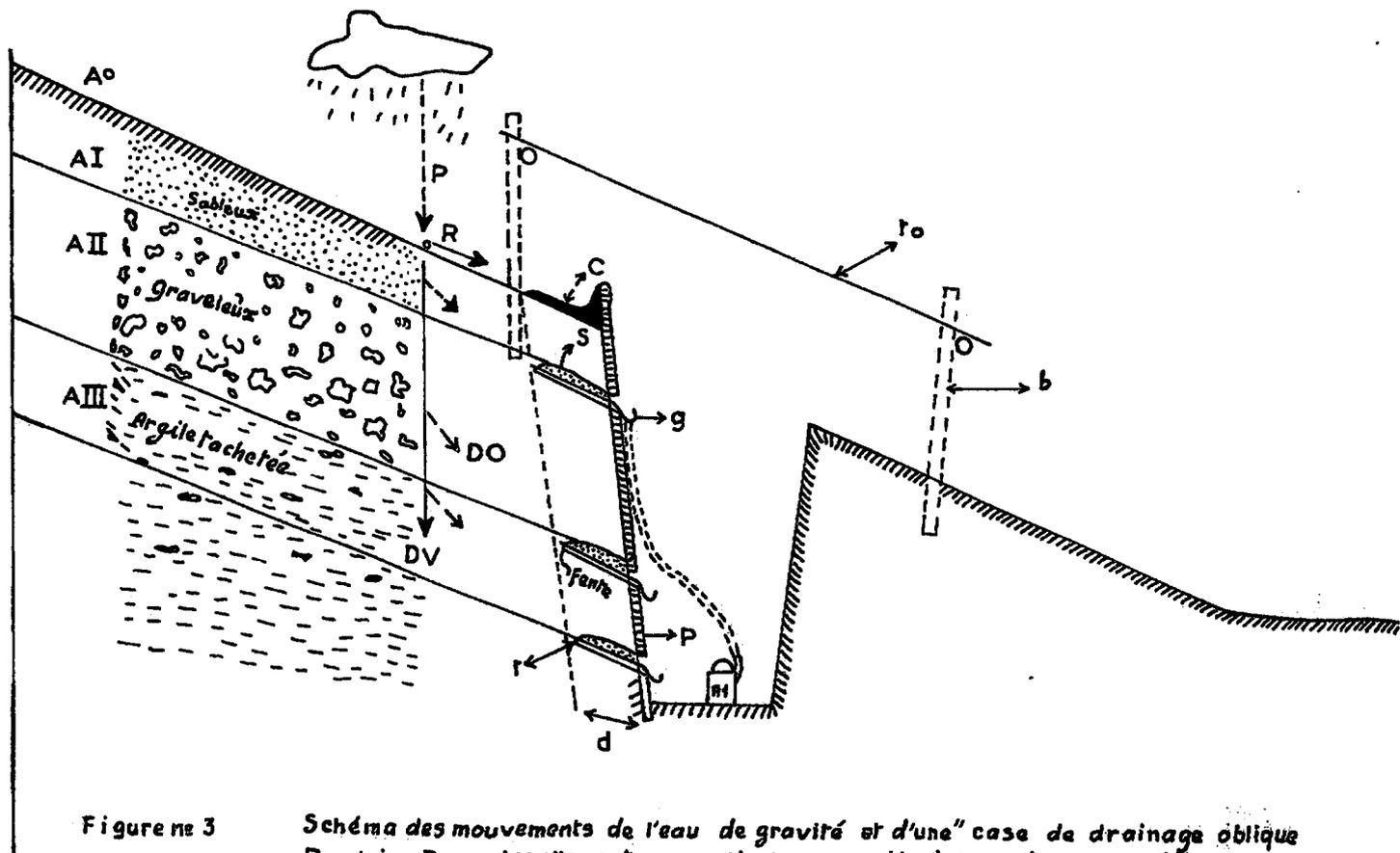


Figure n°3

Schéma des mouvements de l'eau de gravité et d'une "case de drainage oblique"
 P, pluie; R = ruissellement; DV = drainage vertical; DO = drainage oblique;
 AI, II, III, = Horizons pédologiques; C = canal de ruissellement; G = gouttière;
 T = rôle; F = fente; d = sable lavé; d = tranche de sol protégée par le canal C et la
 rôle ro; b = bâti qui soutient le toit ro; p = planches de soutènement.

oblique (DO) suivant la pente. C'est ainsi qu'il se forme souvent une nappe suspendue temporaire qui met quelques heures (ou quelques jours) à tarir après la fin de la pluie.

Remarquons qu'il existe en amont de la fosse de lessivage oblique une tranche de sol d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur protégée des eaux de pluie par le toit en tôle et du ruissellement par le canal. Il ne peut donc y avoir de drainage vertical dans cette tranche de terre et l'eau qu'on y récolte provient nécessairement d'un mouvement oblique imprimé aux eaux circulant librement en amont.

Chap. 2 - LES RESULTATS DE LA CAMPAGNE 1966.

2.1. La pluviosité, la végétation et les pratiques culturales. (voir tableaux 1 et 2).

La campagne 1966 a été plus sèche (total en 1966 : 1614 mm) qu'en moyenne. Cette sécheresse a encore été soulignée par une mauvaise répartition des pluies : il y eut en effet 7 mois secs tandis que 50 % des pluies sont tombées en juin-juillet. D'où la nécessité d'une irrigation régulière (dose théorique 20 mm tous les 8 à 10 jours) jusqu'à mi-mars puis en août-septembre et fin novembre jusqu'au début de la saison des pluies suivante soit un appoint d'environ 320 mm dans l'année. Cet apport d'eau aux époques les plus sèches de l'année a dû modifier sensiblement les conditions hydrodynamiques, physico-chimiques et microbiologiques du sol.

La plantation de la bananeraie (cultivar Poyo) eut lieu le 30 janvier à la densité de 2000 plants/ha (2,25 x 2,25m) On peut considérer qu'en juin les bananiers recouvrent déjà 80 à 90 % de la surface du sol, proportion qui se maintient durant les cycles successifs. De plus un paillage de 50 à 80 t/ha de branchages de brousse a assuré une couverture totale durant les quatre premiers mois. Ce n'est qu'en mai que les mauvaises herbes ont commencé à envahir le terrain et à participer à la couverture du sol : elles ont été maîtrisées de façon très inégale par un sarclage manuel et par des épandages d'herbicide (gramoxon).

Avant la plantation, 100 à 150 tonnes de matières vertes hachées (80 % d'eau) sont enfouies à 20-30 cm au moyen d'un trident laissant un sol motteux très irrégulier résistant au ruissellement et à l'érosion. Par la suite le terrain se tasse assez rapidement sous l'effet des pluies mais aussi des nombreux passages des travailleurs.

TABLEAU n°1 - Pluviosité et irrigation en 1966 sur la parcelle d'érosion et de lessivage oblique Azaguié, Plantation IFAC, carré 4.

Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-	32,0	-	-	4,0	<u>63,0</u>	21,0	-	-	3,0	-	<u>21,0</u>
2	-	-	14,0	-	-	-	8,0	1,0	-	<u>15,5</u>	-	-
3	-	-	-	-	-	-	<u>76,0</u>	-	-	3,6	-	-
4	-	-	-	-	-	<u>18,0</u>	<u>47,0</u>	-	-	3,2	-	-
5	-	-	-	-	-	-	1,0	-	-	4,2	-	-
6	-	-	17,0	-	-	3,0	<u>65,0</u>	-	<u>19,0</u>	-	-	-
7	-	-	-	-	-	8,0	3,0	-	<u>2,0</u>	-	-	-
8	-	-	-	-	-	<u>77,0</u>	0,5	-	-	6,0	3,0	<u>5,0</u>
9	-	-	-	-	-	<u>17,0</u>	-	-	-	2,3	22,0	-
10	-	-	-	-	-	<u>38,0</u>	-	-	-	10,0	9,0	-
11	-	-	-	-	-	8,0	4,0	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	1,0	-	5,0	2,0	-	-	-	-
13	-	-	-	-	2,0	8,0	1,0	-	-	3,0	-	2,0
14	-	-	27,0	<u>30,0 (1)</u>	6,0	<u>87,0</u>	6,0	1,0	-	12,0	-	-
15	-	-	-	-	14,0	<u>20,0</u>	2,0	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	1,0	-	[20]	-	-	-
17	-	-	-	9,0	1,0	2,0	<u>44,0</u>	[20,0]	-	-	-	-
18	18,0	-	6,0	-	13,0	2,0	-	-	-	10,0	4,0	-
19	-	-	-	26,0	15,3	9,0	2,0	1,5	-	2,0	6,0	[22,0]
20	-	-	-	-	-	<u>40,0</u>	<u>15,0</u>	-	-	-	-	-
21	-	20,0	-	<u>46,0</u>	10,2	0,5	-	-	8,0	6,0	-	-
22	-	-	-	-	<u>21,3</u>	4,0	-	-	-	3,0	18,5	-
23	-	-	4,0	-	-	7,0	-	-	-	-	-	-
24	-	-	-	3,2	-	-	7,0	-	13,0	[20,0]	-	-
25	-	-	4,0	-	-	6,0	5,0	-	7,0	-	-	-
26	-	-	10,0	-	-	<u>43,0</u>	-	1,5	4,0	6,0	-	-
27	-	-	-	2,2	-	<u>34,0</u>	-	0,5	-	14,0	1,0	-
28	-	-	-	-	-	<u>19,0</u>	-	2,5	2,0	<u>34,8</u>	-	-
29	-	-	7,0	-	6,6	-	-	-	0,5	<u>13,0</u>	[60,0]	<u>16,0</u>
30	-	-	-	44,0	-	11,0	2,0	[20,0]	-	-	-	<u>5,0</u>
31	-	-	12,0	-	-	-	-	-	-	-	-	[15,0]
Total	18,0	52,0	101,0	160,4	94,4	524,5	315,5	10,0	55,5	153,7	63,5	65,0
Irrigation	60,0(2)	60,0(2)	20,0(2)	0	0	0	0	40,0(3)	20(3)	20(3)	60(3)	37,0(3)

Notes (1) Les pluies soulignées dans le tabl. sont celles qui ont entraîné soit de l'érosion soit du drainage oblique.

(2) Jusqu'au 12 mars les irrigations ont été théoriquement de 20 mm tous les 8 à 10 jours.

(3) A partir d'août les irrigations ont eu lieu aux dates indiquées et ont été enregistrées par le pluviographe (valeurs entre parenthèses), d'où les irrégularités par rapport aux doses théoriques de 20mm

TABLEAU n° 2 - Travaux culturaux sur la parcelle d'érosion carré 4, Azaguié.

- Janvier 1966 . abattage de la bananeraie
- . enfouissement de la matière végétale (100 à 150 t/ha. de matière verte à 80 % d'humidité) et labour au trident sur 20 à 30 cm de profondeur.
- 30/ 1 . plantation (2,25 x 2,25 m) de 2000 bananiers (cultivar Poyo)
- . enfouissement de 1,5 t/ha de dolomie.
 - . traitement au Némagon et HCH.
 - . paillage de 50 à 80 t/ha de branchages de brousse.
- 15/ 2 . 50 g d'urée et 200 g de 10-10-20 par pied.
- 16/ 3 . idem.
- 27/ 4 . oeilletonnage et épandage 100 g de sulfate d'ammoniaque par pied.
- 13/ 5 . épandage herbicide Gramoxone (dose 1/250).
- 18/ 5 . traitement Némagon (20 l/ha) et HCH 25 g par pied.
- 23/ 5 . épandage 100 g d'urée et 100 g KCl par pied.
- 17/ 6 . épandage 100 g d'urée et 50 g K₂SO₄ par pied.
- 29/ 6 . épandage 50 g d'urée et 100 g K₂SO₄ par pied.
- 13/ 7 . desherbage manuel (daba).
- 27/ 7 . épandage 50 g d'urée et 100 g K₂SO₄ par pied.
- 15/12 . enfouissement au trident de 500 g/pied de dolomie à l'occasion d'un labour superficiel.
- 22/12 . épandage de 100 g/pied de sulfate d'ammoniaque.

Irrigations par doses de 20 à 25 mm tous les 8 à 10 jours jusqu'au 12 mars - puis les 17 et 30 août, le 16 septembre, 29 novembre, les 19 et 31 décembre. La répartition de l'eau d'irrigation par aspersion et les erreurs de durée sont telles que les doses mesurées à un pluviographe varient de 15 à 60 mm.

Ces observations ont été confirmées en 1967. Les bananiers ont été coupés à proximité du pluviographe de façon à ce que les feuilles ne fassent pas entonnoir.

Si à ce moment le sol n'est pas couvert de paillis, il se forme une croûte peu perméable qui augmente les risques d'érosion sur les coteaux. Il faut souligner cependant que même sans paillage le sol d'une bananeraie n'est jamais totalement nu étant donné l'oeilletonnage, l'abattage continu des vieilles feuilles et des stipes après production et l'apparition d'un tapis clairsemé de plantes adventives.

2.2. L'érosion, le ruissellement le drainage oblique et l'irrigation.

Il nous faut d'abord signaler que la parcelle de mesure de l'érosion n'a été entourée de tôle qu'au mois de novembre 1966 et d'autre part que tous les résultats ont été sousestimés suite au débordement des eaux de ruissellement et de drainage oblique hors de leur récipient de stockage. Ces résultats ne sont donc qu'une première approche donnant l'ordre de grandeur des phénomènes observés.

2.2.1. L'érosion

La quantité de matériaux solides arrachés par l'érosion durant la première année de culture est dix fois plus élevée ($E = 1,5$ à 2 t/ha) que celle qu'on a pu mesurer sous forêt à Adiopodoumé sur des pentes légèrement plus fortes. Pourtant elle n'est pas du tout catastrophique puisqu'elle est de l'ordre de grandeur de l'érosion sous une plante de couverture de densité moyenne et très nettement inférieure à l'érosion sous une culture sarclée (maïs et manioc, $E = 15$ à 80 t/ha) en basse Côte d'Ivoire (ROOSE, avril 1967).

Ensuite, il faut remarquer que la moitié des terres de fond (T) a été récoltée après la mise en place de la bordure de la parcelle à une époque où il est rare de constater de tels transports. Ceci peut signifier

- soit que la mise en place de la bordure a entraîné une augmentation artificielle de l'érosion (effet bordure : concentration des écoulements en nappe le long des tôles);
- soit qu'une partie de l'érosion de la parcelle s'écoulait à côté du canal de réception des eaux de ruissellement avant la pose des tôles.

Il faudra donc attendre les résultats de 1967 pour préciser ce chiffre.

On peut cependant observer à la surface du sol l'apparition des galets de quartz de l'horizon sous jacent : "les cailloux poussent". Ceci incite à croire à la nécessité du paillage dans les bananeraies sur coteau non seulement à la plantation mais aussi durant les cycles successifs de culture.

L'influence bénéfique du paillage pour protéger la structure du sol apparaît encore plus clairement dans le tableau 1 si on note que l'érosion se déclenche lors de pluies de moins en moins importantes du début (30 mm en avril) à la fin de l'année (15 mm en juillet et 5 mm en décembre). Le recouvrement du sol par les bananiers a été croissant mais, la couverture assurée au niveau du sol par le paillis, puis par les vieilles feuilles, les vieux stipes et les mauvaises herbes a décliné depuis la plantation.

De plus, le tassement du sol et la perte de perméabilité constatés depuis le labour de plantation nous portent à attirer l'attention sur les points suivants :

- limiter le nombre de passage du personnel sur les plantations (équilibre difficile à garder entre cette exigence et les techniques culturales telles que fractionnement des épandages, irrigation etc.)
- prévoir un labour au moins après chaque cycle ;
- réduire les doses d'irrigation sans nécessairement en augmenter la fréquence (voir surtout § 2.2.4.).

TABLEAU 3 - Erosion, ruissellement et drainage oblique sous bana-
neraie - Azaguié, résumé de la campagne 1966.

Pluviosité totale	mm		1614	
Irrigation	mm		317	
Total	mm		1931	
Pluies et irrigations érosives	mm		772 + 117	
			mesuré	corrigé *
Ruissellement total	mm	>	39,7	> 56,1
% dû aux pluies	%		78,3	84,7
Coefficient de ruissellement moyen	%	>	2,1	2,9
" " lors des irrigations	%	>	2,7	-
" " lors des pluies	%	>	1,9	2,9
" " max.	%		18,5	-
Suspensions totales (S) **	kg/ha	>	975,3	1.485,2
% dû aux pluies	%		87,4	91,7
Terres de fond totales (T)	kg/ha		532,0	532,0
% dû aux pluies	%		80,5	80,5
Erosion totale (E)	kg/ha	>	1.507,3	2.017,2
% dû aux pluies	%		84,9	88,7
Rapport S/E				
{ moyen	%		65	74
{ pluies	%		67	76
{ irrigation	%		54	54
Drainage oblique			observé	à l'hectare
de 0 à 30 cm				
{ total	litres	>	284,3	> 64.024
{ % dû aux pluies	%		92,4	-
de 30 à 90cm				
{ total	litres	>	379,3	> 85.418
{ % dû aux pluies	%		90,8	-
de 90 à 150cm				
{ total	litres	>	755,0	> 170.026
{ % dû aux pluies	%		94,1	-
total				
{ pluie + irrigation	litres	>	1.418,6	> 319.469
{ % dû aux pluies	%		92,9	-
Coefficient de drainage oblique global moyen%	%	>	1,65	-
Coefficient de drainage oblique max.	%	>	16,92	-

Notes

* On a compté empiriquement un ruissellement de 10 % lorsque les eaux de ruissellement ont débordé la cuve de stockage ce qui est loin d'être exceptionnel lors des fortes pluies.

** Dans les expériences en case d'érosion les matériaux érodés sont recueillis sous forme de Suspension (S) dans les eaux et sous forme de terre (T) déposée au fond de la cuve. L'érosion totale comprend la somme des deux (E = S + T).

Notons enfin l'importance des éléments fins transportés en suspension par rapport à la masse totale de terre érodée. Elle atteint 65 à 75 % ; cette proportion est donc beaucoup plus proche de celle qu'on trouve sous forêt (90 à 100 % ; ROOSE, avril 1967, BOULANGE 1967) que de celles qu'on enregistre sous culture (5 à 30 %, ROOSE avril 1967) Cette proportion est encore plus élevée au début de l'année jusqu'en juillet. Cela signifie que le ruissellement donne généralement naissance à une érosion en nappe caractéristique des sols bien couverts. Les eaux de ruissellement n'ont guère l'occasion de se concentrer (influence du paillage et autre couverture à la surface du sol) en filets (érosion en rigole) où elles pourraient prendre de la vitesse, de l'énergie cinétique et élever ainsi leur compétence et leur capacité de transport ⁽¹⁾.

Nous ne croyons pas nécessaire de faire intervenir la présence de recouvrements anciens de sables tertiaires pour expliquer l'origine de l'horizon sableux plus ou moins épais qui recouvre la nappe gravillonnaire (BONNIER, 1953). Cet horizon se retrouve très généralement sur les sols formés sur le socle précambrien de basse Côte d'Ivoire et tire son origine de cette forme d'érosion différentielle qui aboutit à une fonte du sol en place laissant un squelette de sable grossier.

Il peut être utile de faire remarquer que la plantation des bananiers se fait en lignes ne tenant aucun compte de la topographie. Alors que la plantation en courbe de niveau nous semble indispensable pour la protection des sols sous hévéas elle ne paraît pas utile dans la culture du bananier

(1) La compétence d'un fluide en mouvement est la taille maximale des matériaux qu'il peut déplacer.

La capacité est la quantité totale de matériaux qu'il peut charrier. Elle est fonction de la vitesse du fluide et donc de son énergie cinétique.

ni d'ailleurs du palmier à huile. Nous pourrions généraliser cette remarque en disant que là où le sol est entièrement couvert, l'orientation des lignes de plantation importe peu du point de vue de la conservation du sol ; par contre, chaque fois qu'une zone continue reste non couverte (la ligne de plantation des hévéas par exemple) il faut faire intervenir des méthodes mécaniques de protection comme la culture en ligne isohypse, l'implantation sur des petites terrasses isohypse, en légère contre pente (voir ROOSE, août 1967). C'est le cas pour les plantations d'hévéas, de caféiers, d'ananas, souvent des citrus et autres fruitiers, etc...

2.2.2. Le ruissellement

Par rapport aux précipitations atmosphériques annuelles, le ruissellement est très faible (2 à 3 %). La capacité des cuves de stockage étant trop petite nous n'avons pu mesurer le coefficient de ruissellement maximum durant les plus fortes pluies (1) : on peut cependant prévoir qu'il dépasse 20 % comme ce fut le cas le 29 octobre lors d'une pluie de 13 mm tombant sur un sol détrempe.

Après le labour et tant que le sol est couvert (paillage) le ruissellement est négligeable. Ce n'est qu'à partir de juin lorsque le sol commence à être tassé qu'il n'arrive plus à absorber la totalité des eaux. L'horizon superficiel comprenant une teneur non négligeable en sable fin et en limon il se crée facilement une croûte sur les sols sur schistes. Le paillage de ces sols joue un grand rôle dans l'évolution de la porosité de l'horizon superficiel et par conséquent du drainage interne du profil.

En pratique le ruissellement ne devient sérieux que pour des pluies supérieures à 50 mm, mais il peut démarrer à partir de 20 mm et même moins si le sol est déjà détrempe par une pluie ou une irrigation antérieure.

(1) Une installation beaucoup plus importante a été posée en octobre 1967. Voir § 1.4.

2.2.3. Le drainage oblique

Il faut d'abord remarquer que si on peut aisément limiter les phénomènes de ruissellement et d'érosion à une parcelle convenablement délimitée par des tôles, il est pratiquement impossible de définir la surface correspondant aux échantillons d'eau de drainage oblique recueillis. Cependant la parcelle a été établie en contre bas d'un drain (approfondi début 1967 jusqu'à 2 mètres) ce qui limite les apports d'eau de drainage des parcelles sises en amont. Faute d'une meilleure précision nous avons considéré la surface drainée comme étant égale à $2 \times 22,2 \text{ m}$ (soit $44,4 \text{ m}^2$) pour nous faire une idée approximative des volumes écoulés à l'hectare dans cette tranche de sol épaisse de 1,50 m.

Le drainage oblique est beaucoup plus important que dans les sols sur sable tertiaire. Le coefficient de drainage oblique qui se définit comme la partie des eaux de pluie qui circule obliquement dans une tranche de sol considérée (ici 1,50 m) durant une période donnée a atteint 1,7 % en moyenne annuelle et 17 % le 29 octobre. Il a dépassé couramment 4 à 12 % pour des pluies de l'ordre de 15 à 30 mm mais rarement 2 % pour les plus fortes pluies : ceci met en évidence l'importance quantitative des débordements hors des jerrycans de stockage lors des fortes pluies. C'est dire si les valeurs mesurées et consignées au tableau 3 sont inférieures à la réalité. En prenant pour base un coefficient de drainage oblique de 10 % pour chaque pluie où l'eau a débordé des jerrycans on obtient un coefficient de drainage oblique annuel moyen de 5 % pour la tranche de sol considérée (1,50 m).

Le drainage oblique est plus élevé dans l'horizon riche en cailloux de quartz que dans l'horizon de pénétration de la matière organique. Cependant plus de 50 % du total ont été recueillis entre 1 et 1,5 m de profondeur. C'est là aussi que les débordements ont été les plus nombreux (35 sur 50 au total) et les écoulements les plus longs à tarir.

Déjà en juillet 1965 nous avons constaté qu'une nappe d'eau pouvait engorger le sol jusqu'à 30 cm de la surface durant une quinzaine de jours malgré une pente de 14 % et la présence de drains à ciel ouvert tous les 30 mètres environ. L'observation attentive du profil montre d'ailleurs des signes d'engorgement temporaire (taches rouges) jusqu'à la base du niveau graveleux. Nous pensions donc que la majeure partie du drainage oblique avait lieu à la faveur de la remontée du niveau de la nappe phréatique. Vers la fin de la grande saison des pluies. Cette explication ne nous satisfait plus car elle ne peut justifier l'observation de drainage oblique intense sur tout le profil lors de petites pluies vers la fin octobre ni surtout lors de certaines irrigations (le 29 novembre en particulier). Nous serions tenté de faire intervenir la formation de nappe suspendue temporaire s'écoulant dans un horizon poreux au-dessus d'un niveau relativement moins perméable. Les eaux de gravité rejoindraient rapidement cet horizon peu perméable par les macroporosités (horizon graveleux très poreux), s'y accumuleraient avant d'engorger successivement les horizons sus-jacents.

Le drainage oblique ne se fait pas avec la même intensité ni à tous les étages durant toute la saison des pluies. On pourrait schématiser les relations sol-eau de gravité de la façon suivante :

1 - Les premières pluies de la saison sont brutales mais relativement peu importantes (tornade de 20 à 30 mm). Le sol est gorgé d'air qui encombre des macroporosités et les écoulements resteront très superficiels ; on n'observera que du ruissellement et un drainage oblique peu abondant et limité aux deux premiers horizons du sol (= ruissellement hypodermique).

2 - Vient ensuite une période où l'eau pénètre à l'intérieur du sol et est absorbée très activement dans les microporosités. On n'observera que très peu d'écoulements latéraux d'eau libre car celle-ci est fixée dans les agrégats (peu de ruissellement et de drainage oblique).

3 - Enfin lorsque le sol est pratiquement en permanence à la capacité au champ (fin juin) l'eau libre s'infiltré dans les macropores et pénètre en profondeur jusqu'à atteindre un horizon relativement moins perméable. L'eau sature alors l'horizon susjacent et y circule latéralement en formant une petite nappe suspendue temporaire. Les pluies à cette époque peuvent dépasser 100 mm mais les coefficients de ruissellement seront relativement faibles étant donné l'établissement d'un fort drainage. Par contre le drainage oblique sera beaucoup plus abondant surtout en profondeur.

4 - Ces phénomènes se reproduisent à la petite saison des pluies mais de façon moins nette étant donnée la distribution plus lâche des pluies.

Ce schéma est beaucoup moins fidèle à la réalité sous bananeraie irriguée à Azaguié qu'à Anguédedou et Adiopodoumé où les conditions naturelles de climat et de végétation sont mieux respectées. Les résultats qu'on obtiendra sur la parcelle établie sous la forêt du Téké toute proche nous permettront de distinguer la part liée à l'irrigation et aux techniques culturales de celle qui est due au climat (les deux saisons des pluies sont moins inégales) et au type de sol et de roche mère.

2.2.4. L'irrigation

Un appoint de 320 mm a été nécessaire pour assurer à la bananeraie un haut niveau de production durant toute l'année. Des doses de 20 à 25 mm ont été apportées par aspersion tous les 8 à 10 jours durant les périodes sèches. Les

irrigations (16 % du total des précipitations) ont provoqué 10 % du drainage oblique observé 22 % du ruissellement et 15 % de l'érosion totale dont 20 % des éléments grossiers. Or les 2/3 ont été appliqués avant la fin septembre et n'ont donné lieu à aucune manifestation de ruissellement ni de drainage oblique (sur 1,5 m).

Le ruissellement et l'érosion provoqués par l'irrigation, une fois le paillis consommé par les microorganismes, sont donc proportionnellement supérieurs à ceux qu'on a observés sous les pluies naturelles de cette année. Les matériaux transportés sont plus grossiers et la turbidité des eaux plus élevée : l'érosion a donc tendance à prendre la forme d'une érosion en rigole. Ceci s'explique aisément par l'hétérogénéité dans la répartition et par la taille des gouttes d'eau projetées par le canon d'irrigation (irrigation par aspersion). C'est ainsi que pour des doses théoriques semblables mais pour des emplacements du canon différents nous avons enregistré au pluviographe une irrigation de 15 mm le 31/12/66 et de 60 mm le 29/11. C'est aux endroits où les gouttes tombent avec une fréquence et une énergie cinétique (diamètre) plus élevée que démarrent des phénomènes de ruissellement et d'érosion plus vigoureux que durant les pluies naturelles. L'irrigation étant indispensable nous trouvons ici un argument supplémentaire au paillage durant toute la durée des différents cycles (soit environ deux paillages par an).

Par ailleurs l'observation d'un drainage oblique abondant à certaines époques de l'année (30/8, 16/9, 24/10, 29/11, 19 et 31/12) nous amène à conclure que les doses d'irrigation ont été trop élevées dans la seconde moitié de l'année. En effet la majeure partie de l'eau (sauf celle qui remonte par capillarité) qui descend dans le profil en-dessous de la zone d'exploitation des racines et la totalité de l'eau de drainage oblique est inutile à la plante et même inopportune puisqu'elle entraîne des matières fertilisantes en solution.

Théoriquement la dose d'irrigation se calcule au départ des caractéristiques hydrodynamiques du sol : volume d'eau à capacité au champ moins volume d'eau au point de flétrissement (pF 4,2) et cela sur l'épaisseur de terre exploitée par les racines et compte tenu des graviers.

En fait d'après les travaux de SHMUELLI et MORELLO (J. CHAMPION, 1960) on considère que pour le bananier l'eau facilement utilisable correspond au tiers de l'eau utile (capacité au champ moins pF 4,2).

De plus à Azaguié on ne tient pas compte des précipitations atmosphériques durant l'application du plan d'irrigation. Il s'en suit que, localement la couche arable reçoit plus d'eau qu'elle n'en peut retenir : l'excès se perd par drainage vertical et oblique.

Peut-être faut-il aussi en chercher la cause dans les nombreuses canalicules qui sillonnent tout le profil et dans la faible capacité de rétention de l'horizon graveleux. En effet, dans les mesures des pF au laboratoire on ne tient jamais compte de la masse inerte des graviers qui constitue cependant 50 % de cet horizon.

En principe, la capacité au champ d'un sol est le volume d'eau qu'il retient à des pF variant de 2,5 à 3 unités.

D'après nos observations (GODEFROY, 1966) sur des profils hydriques établis sur la moyenne de trois sondages (tarière de 8 cm de diamètre) jusqu'à 1,20 m tous les 2 ou 3 jours après des pluies qui ont saturé le sol, l'humidité à la capacité au champ du sol de la parcelle se situe entre les pF 2,2 et 2,5 (21 à 25 % d'humidité pondérale) pour les horizons supérieurs (0 à 40 cm) et voisine du pF 3 (24 à 28 % d'humidité pondérale) pour les horizons profonds plus riches en argile.

Durant les mois très pluvieux (juin et juillet) l'humidité du sol est légèrement plus élevée : 27 à 30 % d'humidité pour les horizons supérieurs (= pF 2,0). A cette époque le sol

TABLEAU n° 4 - Résultats des mesures d'humidité du sol -
Carré 4 Azaguié.

Résultats exprimés en % du poids: Toutes les observations sont faites à 8h. du matin.

Profondeur cm	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	OBSERVATIONS
pF 1,5	38,4	36,6	37,2	38,3	42,4	47,8	
pF 2,0	27,0	28,0	28,0	30,2	32,8	36,0	
pF 2,2	24,0	25,9	25,5	28,0	30,5	33,8	
pF 2,5	21,4	22,8	23,2	25,5	28,4	31,5	Les valeurs des pF 2,0 et 2,5 ont été calculées sur la courbe des
pF 3	19,4	20,6	21,8	23,7	27,2	30,4	pF.
pF 4,2	16,2	17,0	19,2	22,4	25,1	26,4	
	13,4	14,6	16,3	13,7	22,0	24,3	
<u>Date des mesures d'humidité</u>							
10-12-66	26,0	23,4	22,6	23,3	21,8	24,1	Dernières pluies:
12-12-66	24,6	23,0	19,9	20,8	25,8	30,6	le 1-12 = 21 m/m et
17-12-66	25,5	25,4	24,8	23,8	22,5		le 8-12 = 5 m/m
19-12-66	23,2	20,1	19,8	22,4	25,9	29,4	Terrain labouré le 19
22-12-66	20,9	18,6	19,5	25,5	27,6	27,9	à 10h. Irrigation
23-12-66	26,1	25,8	22,6	21,2	26,0	26,8	21 mm dans l'après
24-12-66	24,3	23,6	20,0	20,0	18,5	17,3	midi pluie de 16 mm à
27-12-66	23,8	20,6	19,1	20,9	22,4	24,9	19h.
28-12-66	25,0	22,9	23,2	23,8	25,4	28,5	Irrigation 15 mm le 31
2- 1-67	25,0	24,0	22,7	21,6	26,1	33,5	
15- 2-67	22,7	20,1	19,8	20,8	22,4	21,4	Avant irrigation
15- 2-67	26,5	21,0	21,0	21,3	21,9	22,6	Après irrigation 76mm
16- 2-67	26,1	21,2	21,8	21,9	23,3	24,5	Expérimentale de 76 mm
18- 2-67	25,2	21,1	20,9	21,4	23,4	23,7	

Note

Toutes les mesures de pF indiquées dans ce tableau ont été exécutées à Azaguié sur des échantillons moyens et fraîchement récoltés. Les mesures de pF que nous trouverons en annexe dans le tableau analytique du sol ont été réalisées à Adiopodoumé sur des échantillons prélevés dans la fosse en 1965 et conservés durant deux ans secs à l'air.

n'arrive donc pas à se ressuyer complètement et on peut penser que les remontées d'eau de la nappe par capillarité dans les horizons superficiels sont supérieures à l'évapotranspiration.

Dans le tableau n°4 sont consignés les résultats des mesures d'humidité effectuées au cours de la saison sèche 1966/67. Bien que l'ensemble des résultats soit assez cohérent, on note quelques aberrances dues aux difficultés de l'échantillonnage dans ces sols très graveleux.

Lors de l'irrigation expérimentale du 15/2/67 (76 mm) il semble que seuls les horizons superficiels et les plus profonds se soient réhumectés ! En-dessous de 0-20 cm, le sol n'a guère profité des eaux de drainage qui ont de suite percolé vers les horizons profonds plus argileux (100-120). On retrouve ici l'effet de la nappe graveleuse qui garde très peu d'eau. Il serait donc utile de préciser l'évolution des caractéristiques hydrodynamiques du sol en fonction de la saison. On pourrait, chaque mois, soumettre le sol à une dose d'irrigation suffisante pour assurer la saturation en eau et prélever à échéances successives des carottes par sondage pour établir l'évolution des courbes d'équilibre du sol après drainage des excès (possibilité d'usage de la sonde à neutron).

Etant donné qu'il est difficile d'augmenter la vitesse de rotation des canons d'irrigations sur la plantation (transport des canalisations) on ne peut que préconiser une diminution de la dose d'irrigation en fonction de l'humidité initiale du sol, de la pluviosité en cours d'irrigation et du pédoclimat (variations saisonnières des caractéristiques hydrodynamiques). Il ne s'agit donc pas d'arrêter l'irrigation mais de calculer la dose ou plus juste puisqu'il manque d'eau à la fin de la saison sèche.

2.3. Résultats d'analyse et discussion

Tous les résultats d'observations et d'analyses des eaux et des terres ont été consignés sur fiches par pluies individuelles. Nous ne pourrions en présenter ici qu'un bref résumé ⁽¹⁾. Les méthodes analytiques utilisées sont classiques et seront décrites en détail dans un fascicule à paraître. Signalons seulement que toutes les eaux ont été filtrées au filtre rapide (filtres plissés PRAT-DUMAS n° 4) en vue d'écartier les impuretés (sable, poussière, insectes, etc..) étrangères au phénomène étudié et que les analyses ont été réalisées dans les meilleurs délais compatibles avec les méthodes d'analyse en série (généralement en moins d'un mois).

Les résultats présentés au tableau 5 donnent les moyennes annuelles pondérées (2) pour chaque étage et le rapport moyenne pondérée sur moyenne arithmétique ⁽²⁾ multiplié par 100. Ce rapport met en évidence l'influence du volume des échantillons sur les teneurs en éléments chimiques. En effet si les concentrations sont plus faibles lorsque les volumes écoulés sont forts, le rapport sera inférieur à 100. Si par contre ce rapport est supérieur à 100 cela signifie que la concentration en l'élément considéré augmente avec le volume écoulé.

Si ce rapport est voisin de 100, volume des écoulements et concentration des échantillons sont indépendants ou encore leur dépendance est complexe et fait intervenir d'autres facteurs.

(1) Il existe trois jeux complets de ces fiches qui peuvent être consultés aux stations de l'I.F.A.C. et de l'O.R.S.T.O. en Côte d'Ivoire.

(2) La moyenne pondérée (mp), est la somme des produits des teneurs de chaque échantillon par son volume, divisée par le volume total des échantillons.

La moyenne arithmétique (ma) est le quotient de la somme des teneurs de chaque échantillon par le nombre d'échantillons.

$$mp = \frac{\sum (x. v.x)}{\sum vx.} \qquad ma = \frac{\sum x}{n.x}$$

TABLEAU n° 5- Résumé des résultats analytiques des eaux de ruissellement et de drainage. Azaguié, bananeraie, 1966 -

Moyennes pondérées (mp) et rapport moyenne pondérée/moyenne arithmétique.

	Eaux de ruissellement	Eaux de drainage oblique				Moyenne générale
		0-30 cm	30-90cm	90-150cm	Moyenne	
Volumes totaux l/ha	398.340	64.024	85.418	170.026	total- 319.469	
pH mp	7,29	7,00	6,76	5,80	6,27	6,41
pH mp/ma %	99	97	99	100	99	96
résistivité mp	5.420	3.690	3.870	3.220	3.480	4.590
" mp/ma %	99	109	99	101	86	117
Ca O mp	31,9	43,2	36,9	41,6	40,5	35,8
mp/ma %	101	102	97	100	100	93
Mg O mp	12,2	15,8	17,0	20,5	18,7	15,0
mp/ma %	100	91	94	99	96	86
K ₂ O mp	43,6	69,7	59,5	46,9	54,5	48,6
mp/ma %	126	96	96	87	91	89
Na ₂ O mp	3,69	4,14	4,07	5,50	4,86	4,20
mp/ma %	111	97	93	100	98	92
M.O. mp	28,2	35,4	31,0	27,3	29,8	29,0
mp/ma %	93	98	96	99	98	94
N. total mp	16,06	29,09	31,80	32,49	31,69	22,99
mp/ma %	72	98	100	101	100	78
N- NH ₄ mp	1,06	1,07	1,10	0,62	0,83	0,97
mp/ma %	136	113	115	98	106	120
N- NO ₃ mp	5,95	13,35	11,81	16,00	14,37	9,62
mp/ma %	155	112	96	105	104	84
P ₂ O ₅ mp	1,05	1,33	0,80	0,37	0,66	0,89
mp/ma %	130	105	113	100	106	127
Fe ₂ O ₃ mp	1,53	1,41	1,82	0,55	1,05	1,33
mp/ma %	111	105	102	98	101	114
Al ₂ O ₃ mp	0,76	0,90	1,11	0,87	0,94	0,84
mp/ma %	84	101	106	99	101	90
SiO ₂ mp	13,79	12,89	11,32	9,49	10,60	12,40
mp/ma %	129	103	136	99	112	124

Note - Le pH est exprimé en unité pH, la résistivité en ohm.cm et les autres valeurs en mgr/litre.

2.3.1. La température, le pH et la résistivité.

Température et pH sont des données de bases relatives à la solubilité des différents corps chimiques qui nous intéressent.

Les mesures de température ayant été réalisées un temps plus ou moins long (quelques heures à quelques jours) après la fin des écoulements sont faussées par excès si l'échantillon est resté à l'air ambiant ou par défaut si l'échantillon a été conservé en salle climatisée. En première approximation on peut considérer malgré toutes les imperfections des mesures qu'elles varient rarement au-delà de 21 à 26° centigrades.

Le pH varie très rapidement dans des milieux peu tamponnés comme ces eaux qui sont peu chargées. Or le pH est mesuré 1 à 3 jours après la fin de la pluie. Dans ce laps de temps les équilibres des gaz dissous dans les eaux peuvent varier dans une large mesure et en particulier le gaz carbonique. Des expériences préliminaires ont montré que le pH augmente toujours avec le temps et peut même augmenter de une unité pH en 48 heures dans un récipient en verre ordinaire (solubilisation des impuretés) non bouché et peu rempli (forts échanges avec l'air).

Le pH a varié entre 8,7 et 4,8 (extrêmes 11 et 3,5) unités mais ces chiffres sont probablement trop élevés. Il semble que le pH a tendance à baisser à la fin de la première saison des pluies (juillet) pour remonter en octobre. Il est évident que l'enfouissement de dolomie en janvier aura perturbé l'équilibre naturel et relevé le pH qui est plus élevé en moyenne que sous forêt à Adiopodoumé et Anguédédou. Par ailleurs on constate une chute très nette du pH dans les eaux depuis la surface (ruissellement : mp = 7,3) jusqu'en profondeur (drainage à 1,5 m, mp = 5,8). Il semble que le pH dépende en majeure partie de la somme des bases et de la matière organique.

La résistivité est une mesure physique qui, étant en corrélation assez étroite avec la somme des cations et des anions en solution dans l'eau permet de vérifier rapidement l'ordre de grandeur des résultats analytiques et de suivre la richesse minérale globale des eaux au cours de l'année. Elle a varié en 1966 de 1000 à 17.000 ohms.cm. Cette résistivité va en augmentant jusqu'en juillet mais c'est dans les eaux de ruissellement en octobre que l'on observe les plus fortes résistivités (lixiviation des bases au cours des pluies). La résistivité est toujours plus faible dans les eaux de drainage que dans les eaux de ruissellement : en général (sauf s'il y a un épandage d'engrais) ; elle baisse avec la profondeur. Ceci indique qu'une part non négligeable des éléments minéraux est emportée par les eaux de drainage en tout cas beaucoup plus que par érosion ou ruissellement. L'effet dû aux engrais épandus sur le sol se marque par une résistivité moyenne (mp = 4.600 ohms.cm) beaucoup plus faible qu'à Anguédédou et Adiopodoumé.

2.3.2. Les bases : calcium, magnésium, potassium, sodium.

Les teneurs en bases des eaux sont élevées par rapport à la pauvreté du sol en ces éléments. Les teneurs en soude (moyenne annuelle pondérée en mgr/l) (mp = 4,2) sont toujours nettement plus faibles que les autres ; puis viennent la magnésie (mp = 10,0), la chaux (mp = 35,8) et la potasse (mp = 48,6). L'ordre est le même qu'à Anguédédou mais les valeurs sont doubles ou triples. C'est là une influence de l'usage d'engrais (dolomie, Kcl et K_2SO_4) mais peut être aussi du type de sol et de roche mère : ceci pourra se voir sur la parcelle sous forêt.

La richesse en bases va en s'atténuant au fil des saisons des pluies et à mesure qu'on s'éloigne des épandages d'engrais. Fin juillet les teneurs en bases sont tombées à la moitié ou au tiers de celles qu'on observe lors des premières pluies (avril-mai) mais c'est fin octobre que l'on atteint les teneurs les plus faibles (1/3 à 1/4) ; à la fin de chaque

saison sèche on observe une remontée des valeurs due probablement à un ralentissement de la lixiviation des produits de la minéralisation des déchets de culture.

Trois facteurs interviennent à la fois dans l'évolution des teneurs dans les échantillons d'eau : la saison, les volumes écoulés et la profondeur de l'écoulement. Comme les volumes écoulés et la profondeur de l'écoulement varient en fonction de la saison, il faut donc être prudent dans l'interprétation des résultats. De plus les épandages d'engrais bouleversent profondément pendant un certain temps les équilibres naturels des solutions du sol.

En général les eaux de ruissellement qui sont restées moins longtemps en contact avec le sol sont moins riches en bases que les eaux de drainage. Les phénomènes de lixiviation relative et d'accumulation à l'intérieur du sol sont difficiles à mettre en évidence à cause des épandages d'engrais. On peut cependant les observer assez correctement lors des pluies entraînant de forts écoulements vers la fin des saisons des pluies (cf. tableau 6 : les pluies du 4 et 6/7, du 28 et 29/10, et d'autres non citées) alors qu'il s'est écoulé un laps de temps suffisant pour ne plus trop ressentir les effets des engrais. On remarque alors que contrairement au calcium, magnésium et sodium, seul le potassium voit ses teneurs baisser très régulièrement en profondeur. Cela peut s'expliquer par la fréquence des épandages d'engrais potassiques en surface tout au long de l'année (alors que la dolomie est enfouie au labour de plantation en janvier). On pourrait aussi faire intervenir la rétrogradation du potassium ⁽¹⁾ dans le réseau des argiles ; ces dernières en effet ne sont pas exclusivement kaolinitiques en profondeur (présence de talc

(1) Des essais en laboratoire n'ont pas réussi à mettre en évidence de rétrogradation importante du potassium ; ce qui ne veut pas dire qu'il n'y en a pas dans la nature.

TABLEAU n° 6 - Evolution des teneurs en bases en fonction de la profondeur d'écoulement et des saisons - Azaguié, 1966.

	A	le 21/ 4 46mm	10/ 6 38mm	27/ 6 34mm	4/ 7 14mm	6/ 7 65mm	24/10 20mm	28/10 35	29/10 13	mp annuel
Ca O	0	43,4	20,2	19,0	25,8	21,3	30,8	11,9	16,8	31,9
	1	67,1	60,9	45,5	38,6	28,7	23,7	17,5	18,9	43,2
	2	73,4	44,8	30,4	39,3	34,0	21,8	20,3	21,0	36,9
	3	77,4	51,8	41,1	42,2	37,7	29,7	23,1	27,3	41,6
Mg O	0	23,3	5,1	2,4	14,4	15,7	9,1	4,0	4,3	12,2
	1	46,2	7,7	22,4	15,8	18,4	10,7	8,3	9,1	15,8
	2	40,4	17,8	15,2	21,6	25,8	10,7	9,1	9,1	17,0
	3	47,9	20,5	23,4	23,0	28,4	13,9	9,9	11,6	20,5
K ₂ O	0	46,7	28,5	22,1	27,4	32,4	26,1	13,5	13,5	43,6
	1	246,0	83,6	71,6	55,2	45,0	32,0	35,7	35,7	69,7
	2	178,4	82,7	49,2	52,2	44,3	33,7	33,2	30,1	59,5
	3	94,7	42,1	49,7	46,1	42,2	33,2	29,3	28,3	46,9
Na ₂ O	0	-	5,4	1,9	2,0	1	6,1	2,0	1,9	3,7
	1	-	5,3	3,0	2,5	1,8	6,2	3,2	3,4	4,1
	2	-	5,7	1,6	3,1	2,9	5,9	3,5	3,9	4,1
	3	-	7,0	5,1	4,8	4,1	5,5	4,0	4,7	5,5

Notes

Apports de 1,5 t/ha de dolomie en janvier.

Apport de 100 g/pied de KCl le 22/5.

Apport de 50g/pied de K₂SO₄ le 17/6 et 100 g/pied le 29/6.

et de chlorite, cf. § 2.3.7.). Les teneurs en sodium, qui n'ont été influencées qu'indirectement par les apports d'engrais, augmentent très sensiblement au niveau de l'argile tachetée ; ceci confirme les observations selon lesquelles le sodium est évacué au niveau d'altération de la roche.

Il est intéressant de noter l'influence du débit des écoulements sur les concentrations relatives en chacun des cations. En effet, les cations les moins solidement fixés au complexe absorbant du sol seront évacués les premiers par les eaux lixiviantes. Lorsque, vers la fin de la saison des pluies, les écoulements des eaux de drainage sont nettement plus importants la proportion des cations solidement absorbés par le complexe va augmenter par rapport aux autres cations. Il en résulte que, plus les cations sont solidement fixés au complexe absorbant du sol moins ils sont sensibles à "l'effet diluant" des forts écoulements.

Or, les rapports des moyennes pondérées aux moyennes arithmétiques, qui donnent une idée de l'effet diluant (voir 2.3.) s'établissent comme suit :

$$\text{Ca (93 \%)} > \text{Na (92 \%)} > \text{K (89 \%)} > \text{Mg (86 \%)}$$

On peut en conclure que tous les cations voient leur concentration dans les eaux de drainage baisser si le drainage augmente. Cette tendance est en fait plus marquée que ci-dessus, puisqu'il faut tenir compte du débordement hors des cuves de stockage.

L'ordre de classement est bien différent de celui auquel on s'attendrait puisque l'énergie de fixation des cations bivalents est supérieure à celle des monovalents. L'usage des engrais modifierait donc les équilibres qui s'établissent sous végétation naturelle.

Signalons enfin que l'apport d'un cation sur le sol entraîne non seulement l'augmentation de la teneur de l'eau en ce cation mais aussi des teneurs des autres cations. Ceci s'explique par une rupture des équilibres cationiques au niveau du complexe absorbant et des solutions du sol.

2.3.3. Les matières organiques : carbone et azote.

Une culture de bananiers bien menée apporte au sol des quantités considérables de matières organiques. On peut compter 100 à 150 tonnes/ha de matières vertes ($H_2O = \pm 80 \%$) enfouies lorsqu'on retourne le champ pour préparer une nouvelle culture bananière. A cela s'ajoutent 50 à 80 t/ha de branchages de brousse appliqués en paillis après la plantation et 100 à 150 t/ha de matières vertes qui retournent au sol chaque année (vieilles feuilles, oeilletonnage, recépage et abattage des vieux stipes). Il n'est d'ailleurs pas rare de constater une amélioration du taux de matière organique du sol sous bananeraie. Il est donc aussi normal que les pertes en matière organique par les eaux de ruissellement et de drainage soient importantes (mp annuel = 29 mgr/l.). Les teneurs varient de 30/40 mgr/litre en fin de saison sèche à 15/30 mgr/litre en juillet ; puis on constate une remontée dès le mois de septembre. Les eaux de ruissellement sont moins riches (mp annuel = 28,2) que les eaux de drainage des horizons de pénétration de l'humus (mp annuel 0-30 = 35,4 et 30-90 = 31,0 mgr/l). Les teneurs baissent en profondeur mais sont encore vers 1,50 m du même ordre de grandeur que celles des eaux de ruissellement. Il y a donc un véritable lessivage des matières organiques ; ceci pourrait provenir du fait que le paillis ne fournit pratiquement lors de sa humification que des acides fulviques très solubles. L'effet de dilution lié aux volumes d'eau écoulés est peu important ou masqué du fait des débordements des eaux hors des cuves de stockage très fréquents en profondeur.

Les teneurs en azote total sont plus élevées dans les eaux de drainage (mp annuel = 31,7 mgr/l.) que dans les eaux de ruissellement (mp annuel = 16,1 mgr/l.) et tendent à croître en profondeur. Il semble donc qu'une bonne partie de l'azote soluble soit rapidement entraînée en profondeur par les eaux de drainage. Le système racinaire du bananier étant très superficiel (pas de pivot) cet azote soluble lui échappe.

Notons que les rapports $\frac{mp}{ma} \times 100$ du carbone et de l'azote sont voisins de 100 ce qui indique que les teneurs ne sont pas influencées uniquement par les volumes d'eau écoulés (sauf pour le ruissellement) mais aussi par l'activité microbologique et les engrais ; il se perd donc beaucoup de carbone et surtout d'azote à l'époque où le sol est très humide (juin-juillet et octobre-novembre).

Cet azote total peut être fractionné en azote minéralisé ($-NO_3$ et $-NH_4$) et en azote organique (obtenu par différence). La fraction minéralisée est d'environ 50 % quelque soit la profondeur des écoulements ce qui laisserait penser qu'une bonne part de l'azote est solubilisée et perdue pour les plantes avant même de leur être assimilable.

Les pertes en azote ammoniacal sont extrêmement réduites (1/5 à 1/20 de l'azote nitrique). Les rapports $\frac{mp}{ma} \%$ sont nettement supérieurs à 100 ce qui montrerait une augmentation des doses d'ammoniaque lors des forts drainages. En tout cas d'autres facteurs que le volume des écoulements entrent en jeu : la capacité d'absorption des colloïdes (HAQUE, I. et IBRAHIM, M. ; 1965), les épandages d'engrais ($(NH_4)_2 SO_4$) et l'activité microbologique fonction elle-même des conditions pédoclimatiques (humidité, pH et température). Ces phénomènes sont complexes mais on peut déjà confirmer l'hypothèse des microbiologistes (DOMMERGUES, 1962) qui affirment que les ammonificateurs restent plus longtemps actifs que les nitrificateurs dans les sols en voie de dessèchement. Ceci se traduit par des rapports $\frac{NH_4}{NO_3}$ plus élevés en fin des deux saisons sèches que durant les grosses pluies.

Quant à l'azote nitrique, très soluble, il s'en perd de fortes quantités dans les eaux de profondeur. Les teneurs dans les eaux de drainage sont 2 fois plus élevées que dans les eaux de ruissellement et représentent presque la totalité de l'azote minéralisé.

Les pertes en matières organiques carbonées et azotées (minéralisées ou non) semblent donc beaucoup plus indépendantes de l'effet diluant que des influences de la profondeur d'écoulement des épandages d'engrais et de la saison (aspect qualitatif).

L'entraînement des engrais azotés (urée) par les eaux de drainage est facile à suivre au départ des analyses d'azote total (voir tableau 6 § 2.3.8.).

2.3.4. Phosphore, fer, alumine, silice.

Il est important de noter qu'aucun de ces corps chimiques n'a fait l'objet d'apport sous forme d'engrais : ceci ne veut pas dire que leur comportement ne sera pas influencé par les traitements culturaux (paillage, apport de matière organique et de bases qui relèvent le pH).

Les teneurs en phosphore sont faibles (2 à 0,1 mgr/l.) et varient peu au cours de l'année ; elles sont semblables à celles enregistrées sous forêt à Adiopodoumé. Le phosphore semble solidement fixé (matière organique, fer, alumine) et lentement mis en solution dans l'eau du sol.

Les analyses du sol montrent que les teneurs en phosphore total sont médiocres (0,3 à 0,9 ‰) et la fraction assimilable négligeable en l'absence d'apport d'engrais phosphaté. Pourtant, il n'a pas paru jusqu'ici utile d'utiliser des engrais phosphatés pour maintenir le haut niveau de production de la bananeraie.

Les teneurs en phosphore des eaux baissent très nettement dans l'horizon humifère puis se stabilisent en profondeur. Les phénomènes de solubilisation et d'insolubilisation du phosphore seraient liés à la minéralisation des matières organiques dans les horizons de surface. En fait, il semble qu'à Azaguié une part notable du phosphore soit insolubilisé dans l'horizon d'accumulation du fer et de l'argile

vers 1,5 m puisqu'on y trouve un maximum de teneur en phosphore. Ce phosphore solubilisé est soit réassimilé soit insolubilisé sur place ou en profondeur (fer, alumine) soit encore emporté par les eaux de drainage jusqu'à la nappe phréatique et aux cours d'eau (MANGIN et coll. : teneur faible en phosphate de la charge soluble mais relativement importante en comparaison avec les teneurs des granites du bassin du Bandama).

Les teneurs en fer et en alumine sont peu élevées relativement à la silice (1/4 à 1/7) ce qui concorde bien avec le type de pédogénèse (ferrallitisation) du sol étudié. Les concentrations en fer et en silice sont plus élevées dans les eaux de ruissellement que dans les eaux de drainage.

Il semble que le fer, l'alumine et surtout la silice aient tendance à être plus concentrés lors des forts écoulements d'eau de drainage (rapports $\frac{mp}{ma}$ % voisin ou même supérieur à 100). Ce fait a également été relevé par des sédimentologues travaillant sur des marigots à Tiassalé et Korhogo⁽¹⁾. L'explication de ce phénomène fait probablement intervenir des variations d'humectation des colloïdes du sol mais aussi de solubilité en fonction du pH.

Sauf pour la silice dont les teneurs décroissent en profondeur, l'influence de la profondeur des écoulements est peu nette, probablement à cause de l'intervention en sens contraire de différents facteurs. Il faut noter en tout cas que les teneurs en phosphore, fer, alumine et silice baissent notablement entre le niveau graveleux et l'argile tachetée (vers 1,50 m), ce qui correspond à un maximum d'argile, de phosphore et de fer (libre et total) dans le profil. Cette baisse s'expliquerait donc par une précipitation du phosphore et du fer ainsi qu'une floculation ou une néoformation d'argile (sol lessivé en fer et argile sur 1 mètre). Le rapport de lessivage $\frac{(0-25 \text{ cm})}{150 \text{ cm}}$ est de 2,8 pour l'argile et de 4,7 pour le fer. Reste encore à savoir s'il s'agit bien du même matériel original (analyse des sables).

(1) BOULANGE (B.) - Adiopodoumé, communication personnelle et orale le 3 août 1967.

2.3.5. Les éléments traces.

Ils ont été analysés sur 7 échantillons d'eau au laboratoire de spectrographie de l'O.R.S.T.O.M. à Bondy. Les teneurs en bismuth, zinc, césium, molybdène, étain, vanadium nickel, cobalt, titane, chrome et lithium sont toujours inférieures à 0,010 mgr/litre. Plomb et rubidium peuvent atteindre 0,005 à 0,030 mgr/litre tandis que les teneurs en strontium, baryum, manganèse, cuivre et aluminium varient de 0,020 à 0,350 mgr/litre ; le fer peut même atteindre des teneurs de 0,6 mgr/litre. Notons que les résultats d'analyse du fer et de l'alumine sont systématiquement plus faibles à Bondy qu'à Adiopodoumé, probablement à cause des méthodes d'analyse et aussi des transformations, floculations ou précipitations qui interviennent au cours du transport et du stockage.

Ces résultats concordent bien avec ceux qu'on a obtenu à Anguédédou excepté pour le cuivre nettement plus abondant à Azaguié. Cela s'explique aisément par l'usage de fongicides cupriques pour lutter contre le "bleu du bananier". Sauf l'aluminium, le cuivre, le fer et l'étain pour lequel c'est moins net, tous les éléments traces sont plus abondants dans les eaux de drainage que dans les eaux de ruissellement.

Enfin le cuivre, le titane et le chrome sont plus abondants dans les échantillons recueillis fin juin que dans les échantillons de fin novembre : pour les autres le phénomène n'est pas net (Mn Mo ; Sn ; V ; Ni ; Sr; Ba; Al) ou se manifeste en sens contraire (Pb; Fe ; Co ; Li ; Rb).

TABLEAU n° 7 - Analyse d'oligo-éléments sur l'horizon superficiel (0-25 cm) Extraction à l'acide acétique (2,5 %).
Résultats communiqués par l'I.F.A.C. (en p p m).

Plantations I.F.A.C.	Manganèse	Fer	Cuivre	Bore
Anguédédou ; sol sur sables 3 aires	4	37	2,2	0,15
Azaguié ; sol sur schistes	40	22	2,0	0,12

2.3.6. Lessivage oblique et érosion en nappe.

Un des buts de cette expérience est d'étudier les mouvements des colloïdes à l'intérieur du sol afin de savoir s'ils suffisent à expliquer l'appauvrissement en argile constaté dans les horizons superficiels de nombreux sols tropicaux.

Pour ce faire nous avons laissé reposer durant quatre mois 5 échantillons de 16 à 20 litres d'eau filtrée (au filtre rapide) en provenance de la case de lessivage oblique. Puis après avoir constaté des dépôts sur les parois des récipients nous les avons transvasés dans des bombonnes en verre et hâté leur floculation (1).

Cette dernière méthode a toujours donné des poids de floculat inférieurs à la première probablement à cause des facultés dissolvantes de l'acide chlorhydrique.

Les floculats présentent une couleur brun-jaune d'autant plus sombre qu'ils proviennent d'horizons humifères. Les teneurs passent de 50 à 125 mgr/litre depuis la surface jusqu'à 1 mètre puis redescendent brutalement à 13 mg/litre. Cette brusque chute de la teneur en pseudo-solution coïncide avec une augmentation très nette de la teneur en argile et en fer du sol : on constate donc un lessivage vertical du sol typique caractérisé par un horizon éluvial (0-30 cm) et un horizon illuvial vers 1-1,5 m sur un même profil. Mais ceci n'exclut pas la présence d'autres phénomènes d'appauvrissement des horizons superficiels.

(1) Floculation : soit au sulfate d'alumine : 1cc/litre d'une solution à 5 %
: soit à l'acide chlorhydrique fumant : 1cc/l.

TABLEAU n° 8 - Comparaison des granulométries des terres érodées lessivées et du sol en place (0 - 25 cm).
Azaguié, 1966, bananeraie irriguée.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Terre de fond		Suspension		Lessivage oblique	Départ total		Sol en place 0-25	Rapport 7/8
	%	total* kg	%**	total kg	total*** kg	kg	%	%	
Argile	33,1	176,1	53,3	519,8	18,7	714,6	50,1	14,6	3,43
Limon fin	24,0	127,7	18,0	175,6	0	303,3	21,2	7,8	2,72
Limon grossier	23,9	127,1	10,7	104,4	0	231,5	16,2	14,3	1,13
Sable fin	10,6	56,4	7,9	77,1	0	133,5	9,5	33,3	0,33
Sable grossier	8,4	44,7	0,0	-	0	44,7	3,1	27,8	0,11

Notes

- * Les calculs ne tiennent compte que des observations et non des chiffres "corrigés" empiriquement, ce qui ne ferait qu'accentuer le phénomène d'érosion différentielle et de lessivage oblique.
- ** Repris de "quelques exemples des effets de l'érosion sur les cultures" ROOSE, avril 1967.
- *** Floculat total sur les deux premiers horizons à raison de 125 mg./litre. En effet les teneurs en floculats tombent à des valeurs négligeables dans l'horizon illuvial.

Signalons surtout qu'on n'a pu jusqu'ici chiffrer le lessivage vertical étant donné l'absence de mesure directe du drainage vertical. Celui-ci semble pourtant jouer un rôle primordial dans ce type de sol.

Le tableau 8 (colonne 9) met bien en évidence l'entraînement différentiel des particules fines par les phénomènes d'érosion et aussi de lessivage oblique. On constate ainsi que seuls les sables fins et grossiers s'accumulent (relativement) sur place alors que les fractions granulométriques plus fines (0 à 50 microns) se déplacent en proportions élevées.

Le lessivage oblique d'après ce tableau ne participerait à cette fonte du sol en place que à raison de 3 % des éléments les plus fins (colloïdes) ; tout le reste serait attribuable à l'érosion en nappe et au lessivage vertical. Il convient cependant de souligner que la part qui devrait revenir au lessivage vertical est probablement la plus importante à voir les analyses granulométriques du sol en place. N'ayant fait aucune mesure du drainage vertical dans le sol en place nous n'avons pas voulu inscrire de chiffre dans le tableau 8. A titre indicatif, en nous basant sur 10.000 m³ de drainage vertical (voir l'essai de bilan hydrique présenté plus loin § 2.4.2.) et sur une moyenne de 100 mgr/litre de floculat déposés avant 1,5 m de profondeur nous obtenons un déplacement de 1000 kg/ha an de colloïdes soit 140 ... % du transport annuel d'argile par érosion et drainage oblique.

Nous nous garderons de tirer des conclusions hâtives de ces premiers résultats qui devront être précisés et confirmés au cours des six années à venir. Il semble cependant difficile d'expliquer l'appauvrissement en éléments fins dans les horizons superficiels de ce type de sol par le seul lessivage oblique.

Celui-ci interviendrait à côté de l'érosion en nappe et du lessivage vertical pour une part plus ou moins importante suivant les sols.

2.3.7. Nature des colloïdes floculés.

L'analyse cristallographique aux rayons X des colloïdes contenus dans quatre échantillons d'eau de drainage oblique (floculés au sulfate d'alumine ou à l'acide chlorhydrique après filtration rapide) a été effectuée aux laboratoires de spectrographie de l'O.R.S.T.O.M. à Bondy.

Dans les flocculats provenant des eaux de drainage oblique des sables tertiaires on n'a rien trouvé d'autre que de la kaolinite et de la goethite, minéraux, qui, avec le quartz, forment la totalité des minéraux du sol. Par contre à Azaguié on a mis en évidence la présence de talc, de chlorite, de traces d'illite et probablement de kaolinite dans les flocculats provenant des eaux de drainage coulant vers 1 m de profondeur ; ceci peut se comprendre puisque les sols d'Azaguié sont relativement peu profonds et développés sur schistes.

Comme par ailleurs le mode de flocculation (sulfate d'alumine ou acide chlorhydrique) ne semble pas avoir eu d'influence qualitative mais seulement quantitative sur les minéraux mis en évidence nous croyons pouvoir espérer qu'il existe une relation entre la formation, l'évolution du sol et la nature des flocculats récoltés.

2.3.8. Les engrais

Nous avons déjà eu à plusieurs reprises (§ 2.3.2. etc) l'occasion de souligner l'influence des engrais sur différents phénomènes pédologiques. En effet, les constituants des eaux de drainage sont en équilibre avec ceux des solutions du sol. Ces solutions, à leur tour, reflètent l'état du complexe absorbant et des ions absorbés.

Lorsqu'on répand un engrais à la surface du sol il se dissout petit à petit dans les eaux de surface, enrichit les solutions du sol et est entraîné de plus en plus bas par les eaux de drainage. Dans un premier stade les poudres et granules disparaissent en se dissolvant. Par les solutions du sol (eau capillaire et eau d'adsorption) l'engrais ionisé entre en contact avec le complexe absorbant.

Un échange a lieu entre la solution du sol riche en un ou plusieurs cations apportés par l'engrais et le complexe absorbant plus ou moins désaturé : ce dernier fixe une certaine quantité des cations apportés (au max. jusqu'à atteindre la

capacité d'échange) en rejetant des ions H^+ ou d'autres cations moins solidement fixés ou plus concentrés sur le complexe que dans l'engrais en solution. Les solutions du sol vont donc s'appauvrir en cations présents dans l'engrais et s'enrichir en cations présents sur le complexe absorbant (H^+ ou autres).

Les engrais cationiques (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , NH_4^+) sont donc en partie fixés sur le complexe absorbant. Les engrais phosphatés sont plus solidement fixés encore par les matières organiques, par les hydroxydes de fer et d'alumine avec lesquels le phosphore forme des corps peu solubles et par le complexe absorbant au moyen de doubles ponts calciques. Les nitrates, chlorures et sulfates diffusent dans les solutions du sol sans y être particulièrement fixés.

Imaginons alors une succession de pluies (ou d'irrigations) entraînant un drainage abondant. A chaque passage d'eau libre (pauvre en cation) dans les macroporosités les solutions du sol perdent par diffusion une partie de leurs constituants ; ce qui entraîne un nouvel équilibre "solution du sol - complexe absorbant" au détriment de ce dernier. Les eaux de drainage par contre étant relativement plus riches que les solutions du sol des horizons sous-jacents vont augmenter la richesse en cations de l'engrais des solutions et par là du complexe absorbant.

L'épandage d'un engrais en saison des pluies va donc se traduire successivement dans chacun des horizons et avec un certain décalage du point de vue temps et concentration, par un accroissement brusque des teneurs de l'élément apporté (engrais) dans les solutions de sol et les eaux de drainage puis par une décroissance plus ou moins rapide jusqu'au niveau de base naturel à cette époque.

On constate également une augmentation de la teneur dans les cations autres que celui qui a été apporté par l'engrais ; il s'agit des cations chassés du complexe absorbant par le

Si donc on recueille les eaux de drainage (vertical ou oblique) à diverses profondeurs dans le sol on pourra en déduire le cheminement de l'engrais à l'intérieur de celui-ci et en particulier le temps qui s'écoule entre l'épandage et le moment où l'engrais est hors de portée du système racinaire de la plante cultivée.

TABLEAU 9 - Evolution des teneurs en azote total (mgr/l.) des eaux de ruissellement et de drainage oblique après un apport d'engrais azoté le 16/6/66 (100 gr. d'urée par pied de bananier).

Profondeur	14/6	20/6	26/6	27/6	28/6	mp annuel
Surface	13,2	94,6	10,4	18,5	14,3	16,1
0 - 30	20,2	26,0	30,0	25,2	-	29,1
30 - 90	20,7	50,7	23,8	42,6	27,2	31,8
90 -150	29,1	52,6	24,1	48,4	39,2	32,5

Nos observations en 1966 nous ont montré qu'en pleine saison des pluies un engrais potassique (K_2SO_4) et un engrais azoté (urée) (voir tableau 9) disparaissent en dix jours après des chutes atmosphériques s'élevant à 190 mm. Le calcium et le magnésium (dolomie) sont également sujets à lixiviation rapide : à plus forte raison les nitrates et l'azote organique. Seules les teneurs en ammoniacque et en phosphore dans les eaux de drainage et dans le sol varient peu et les engrais qui les contiennent ont une action soutenue. Des prélèvements agronomiques de sol sur les trente premiers centimètres ont été effectués quinze jours après l'épandage d'engrais divers. Les résultats des analyses montrent qu'au bout de 15 jours on ne trouve plus aucune trace d'engrais sauf d'engrais phosphatés : ceci confirme pleinement nos observations.

L'entraînement des engrais ne se fait évidemment pas à la même vitesse durant toute l'année étant donnée la répartition hétérogène des pluies en deux saisons humides (drainage) et deux saisons sèches (remontées capillaires). Ainsi les apports en début d'année de dolomie, d'urée, d'engrais complets se sont fait sentir pratiquement jusqu'au 1er juin. Par contre en juin-juillet et octobre-novembre la lixiviation des engrais est extrêmement rapide.

Il s'en suit une rentabilité très différente des engrais mis à la disposition des plantes suivant la pluviosité de l'époque d'épandage. Il faudra donc en tenir compte pour fractionner les doses et choisir des formes de présentation (assimilabilité, solubilité, état granulé ou aggloméré, etc..) adoptées à l'intensité des phénomènes de lixiviation aux diverses dates d'épandage.

Seul le phosphore peut être réellement donné en fumure de fond. Le calcium, le magnésium (dolomie) et peut être l'azote ($-NH_4$) pourraient être appliqués à dose moyenne en saison sèche sous forme peu soluble en "fumure de demi-fond". En saison des pluies, les bases et l'azote seront épandus en doses très fractionnées sous forme granulée directement assimilable.

L'azote ammoniacal présente peut être un avantage par rapport à l'azote nitrique ou à l'urée, celui d'être fixé par le complexe absorbant et le réseau cristallin des argiles (rétrogradation ?). L'ammoniaque sera restituée aux solutions du sol de façon progressive laissant aux nitrificateurs le temps de rendre cet azote assimilable par les plantes. Il n'est d'ailleurs pas exclu que celles-ci ne puissent assimiler directement l'azote sous forme ammoniacale. Des expériences agronomiques devront confirmer cette théorie mais on peut déjà remarquer l'extension de l'usage de l'ammoniaque liquide pour la fumure azotée des cultures en Europe.

Fig. 4 Schéma de l'évolution des teneurs en bases, des eaux de ruissellement et de drainage au cours de l'année sans apport d'engrais
 — AZAGUIE, bananeraie, carré 4, 1966 —

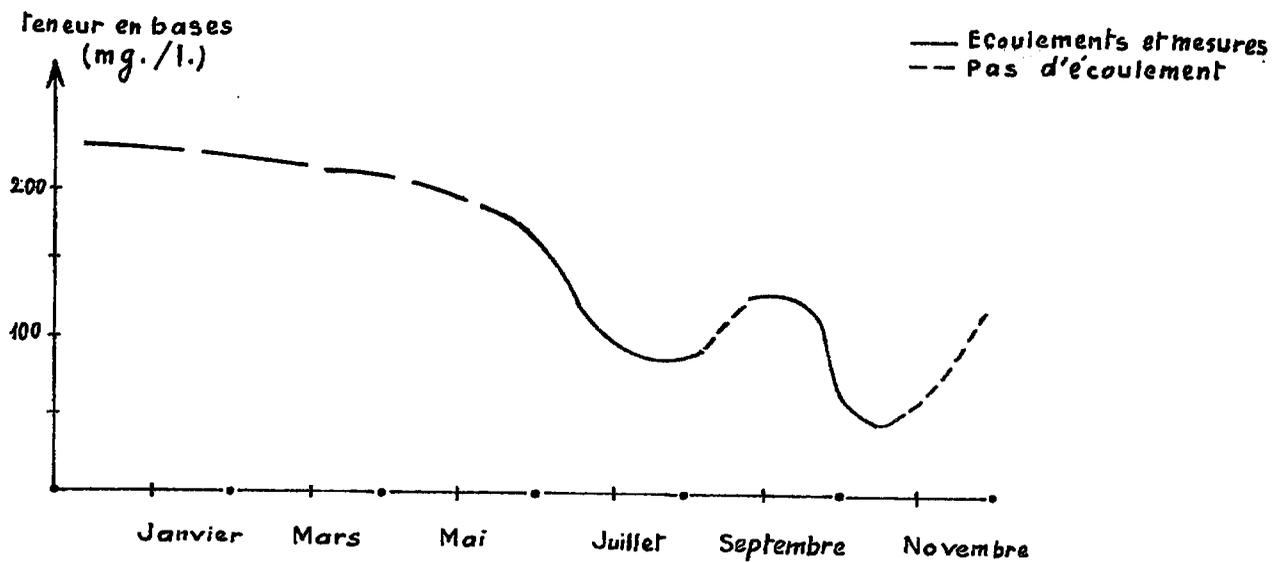
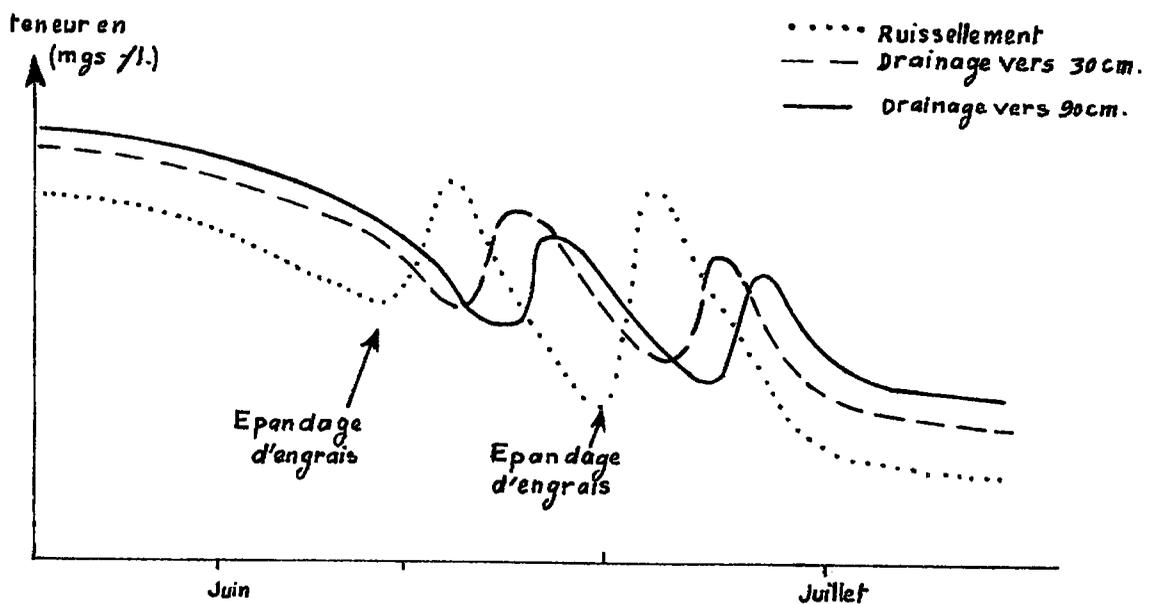


Fig. 5 Schéma théorique de l'influence d'un engrais sur les teneurs en ce même élément dans les eaux de ruissellement et de drainage oblique en pleine saison des pluies



Enfin il peut être utile de rappeler le rôle important de la matière organique dans la fixation des bases et du phosphore. Le paillage à ce point de vue peut jouer un rôle important. D'une part, il libère des matières organiques mais celles-ci seraient peu stables et entraînées dans les eaux de drainage.

D'autre part, en s'opposant efficacement au ruissellement le paillage favorise le drainage ce qui est utile en saison relativement sèche mais peut favoriser la lixiviation et le lessivage en pleine saison des pluies.

En fait, les essais agronomiques ont prouvé l'effet global favorable du paillage sur les rendements des cultures et sur la conservation de la fertilité des sols.

2.4. Conclusions

Le but final de cette expérimentation en case de mesure de l'érosion et du lessivage oblique est l'établissement des pertes physiques (terre, eau) et chimiques.

2.4.1. Les pertes en terre

Lorsqu'elle est bien menée la culture du bananier couvre bien le sol et les pertes en terre sont peu importantes. On peut cependant constater qu'elles aboutissent à des changements qualitatifs de la surface du sol (appauvrissement en argile et apparition des cailloux) suite au type d'érosion différentielle qui se développe.

2.4.2. Essais de bilan hydrique.

Nous sommes loin de posséder les éléments nécessaires à l'établissement d'un bilan hydrique de la parcelle. Celui-ci serait pourtant très intéressant car il nous permettrait de chiffrer approximativement les pertes annuelles en éléments fertilisants au départ des teneurs moyennes de l'eau du sol constatées aux différentes profondeurs au cours de l'année. Nous voudrions donc ici esquisser un 1er bilan hy-

drique, fut-il très grossier, pour indiquer l'ordre de grandeur et l'importance des différents facteurs et pour mettre en évidence les mesures qui nous manquent.

Nous pourrions partir du schéma suivant :

$$P = R + (D.o + D.v.) + ETR + D H \%$$

où P = : pluviosité annuelle en m³/ha (plus irrigation)
1931 mm en 1966 soit 19.310 m³/ha.

R = : ruissellement annuel en m³/ha
: 2,5 % de P soit ± 400 m³/ha en 1966

D.o. = drainage oblique
1,65 % de P soit 320 m³/ha en 1966.

D.v. = drainage vertical (non mesuré).

ETR = évapotranspiration réelle (non mesurée)

On pourrait l'évaluer au départ de l'E.T. potentiel
(ETP = 1400 mm)

. en établissant un coefficient correctif qui varierait de 1 durant les mois où il n'y a pas de déficit hydrique à 0,2 durant les mois les plus secs.

. ou encore au départ d'un coefficient global (à définir) qui varie probablement entre 0,4 et 0,7.

$$\text{soit ETR} \begin{cases} = 14.000 \times 0,4 = 5.600 \text{ m}^3 \\ = 14.000 \times 0,7 = 9.800 \text{ m}^3 \end{cases}$$

D H % = différence d'humidité du sol entre le début et la fin de la période considérée. (non mesuré).

- on peut la négliger si on considère de nombreuses années ou si on démarre le bilan au moment où le sol est à humidité équivalente (juin-juillet) ⁽¹⁾ pour le finir à la même époque.

On pourra donc grossièrement évaluer le drainage vertical à l'hectare :

$$D.V. = P - (R+D.o+ETR) \begin{cases} = 19.310 - (400+320+5.600) = 12.990 \text{ m}^3 \\ = 19.310 - (400+320+9.800) = 8.790 \text{ m}^3 \end{cases}$$

(1) ELDIN ; communication orale 3 août 1967 à Adiopodoumé.

Remarquons que cette estimation du drainage vertical concorde bien avec le "drainage calculé" de HENIN et AUBERT (1) qui varie de 960 à 1280 mm suivant qu'on adopte un coefficient de texture $b = 1$ ou 2 (pluviosité de 1,93 mètres et $T = 26^{\circ}\text{C}$).

Nous voyons donc que les éléments les plus importants (et qui nous échappent) sont le drainage vertical qui intervient principalement en saison des pluies et l'évapotranspiration réelle qui se manifestent surtout en saison sèche.

Nous espérons pouvoir mettre au point une méthode de mesure du drainage du sol en place à différentes profondeurs et nous baser sur les travaux de Mr. ELDIN et LESPINAT sur l'évapotranspiration réelle et potentielle à Adiopodoumé (en cours de dépouillement).

Nous pourrions ainsi mieux définir le milieu écologique dans lequel vivent les bananiers de notre parcelle.

2.4.3. Pertes chimiques.

Le tableau 10 donne la répartition des pertes minérales et organiques par érosion, ruissellement et lessivage oblique. On voit que les pertes en calcium, magnésium, potassium, carbone, azote organique et nitrate sont loin d'être négligeables. Cependant elles sont compensées partiellement par les remontées biologiques et surtout par les apports d'engrais. C'est ainsi que les pertes en matières fertilisantes sous bananiers fumés sont 8 à 12 fois supérieures à celles constatées sous forêt sur les sables tertiaires.

(1) Drainage calculé de HENIN et AUBERT

$$D = \frac{P^3 j}{1 + j p^2} \quad \text{avec} \quad j = \frac{b}{0,15 T - 0,13}$$

où D = drainage calculé

P = pluviosité annuelle en mètre

b = coefficient fonction de la texture varie de 1 (argile) à 2 (sable).

T = température moyenne annuelle.

Les matières organiques, le phosphore, le fer, la silice et l'alumine circulent en majeure partie sous forme solide (terre érodée) tandis que les bases et l'azote se perdent principalement en solution dans les eaux de ruissellement et de drainage.

Ceci est confirmé par l'essai d'évaluation du drainage vertical : les pertes en bases et en azote sont 10 à 16 fois supérieures aux pertes par érosion, ruissellement et drainage oblique alors qu'elles ne sont plus que 0,07 à 2,41 fois supérieures pour les autres corps (8,9 pour le carbone).

C'est donc l'entraînement par les eaux de drainage qui semble la cause des plus grandes pertes de matières fertilisantes. Il va de soi qu'il faudra en tenir compte afin de ne pas donner de trop fortes doses d'irrigation.

2.4.4. Essais de bilan chimique de la parcelle.

Nous sommes loin d'avoir tous les éléments nécessaires à l'ébauche d'un bilan des apports et des pertes chimiques de la parcelle étudiée. Nous voudrions cependant par des approximations successives mettre en évidence les principales causes des pertes de substances nutritives dans le sol.

TABLEAU n°11 - Apports d'engrais en 1966 en kg/ha.

N	430 kg (urée = 270; sulfate = 80 ; 10-10-20 = 80)
K ₂ O	436 kg (chlorure=180; sulfate= 96 ; 10-10-20=160)
P ₂ O ₅	80 kg (10-10-20)
CaO	785 kg (dolomie dont 314 kg épandus le 15 décembre)
MgO	500 kg (dolomie dont 200 kg épandus le 15 décembre)

TABLEAU n° 12 - Essais de bilan chimique en 1966 (kg/ha).

	P E R T E S			APPORTS	
	Erosion, ruissellement drainage oblique	Drainage vertical	Exportation récolte: 25t/ha	TOTAL	Engrais
1	2	3	4	5	6
N	21	318	50	389	430
P ₂ O ₅	3	8	13	25	80
Ca O	34	364	6	409	471
Mg O	14	170	7	191	300
K ₂ O	38	594	150	782	436

Notes

- Les pertes par érosion, ruissellement et drainage oblique sont celles calculées au départ des échantillons réellement observés : en réalité elles devraient être plus élevées puisqu'on a constaté des débordements importants hors des cuves de stockage du ruissellement et du drainage oblique.
- Les pertes par drainage verticale ont été estimées au départ d'un drainage de 10.000 m³ et des teneurs observées au niveau 1 mètre (tableau 3).
- Les exportations par une récolte de 25 t/ha sont celles qui ont été estimées par Mr. MARTIN PREVEL en 1962.
- Pour CaO et MgO on n'a pas tenu compte de l'épandage de dolomie effectué le 15 décembre qui n'aura pas eu le temps de disparaître.

TABLEAU n° 10 - Pertes en matières minérales et organiques suite aux phénomènes d'érosion et de drainage oblique et vertical.
- % du total exprimé en kg/ha.

1	2	3	4	5	6
	Perte totale (3+4+5) kg/ha	Erosion %	Ruissel- lement %	Drainage oblique %	Drainage ver- tical % à ajouter au total
Ca O	34,197	25	37	38	1079 (3)
Mg O	14,072	23	34	43	1208
K ₂ O	38,245	9	45	46	1556
Na ₂ O	3,258	7	45	48	1249
M O	89,610	77	12	11	896
N total	21,000	22	30	48	1514
N - NH ₄	0,686	-	61	39	1603
N - NO ₃	6,953	-	34	66	1697
P ₂ O ₅	3,322	80	13	7	241
Fe ₂ O ₃	75,942	98,7(2)	0,8	0,4	24
Al ₂ O ₃	150,602	99,6(2)	0,2	0,2	7
SiO ₂	173,861	94,9(2)	3,1	1,9	65

Notes

- 1) Les pertes totales (colonne 2) ne comprennent pas les pertes par drainage vertical dont l'estimation est empirique. Les volumes sont ceux qui figurent au tableau 3 et les teneurs au tableau 5 et fiche des terres érodées.
- 2) Les concentrations en silice, alumine et fer sont celles qu'on trouve dans le sol en place (analyse au triacide sur 0 à 25 cm).
- 3) On a pris un volume de 10.000 m³ d'eau de drainage vertical annuel par ha et les teneurs moyennes (mp) observées vers 1 mètre de profondeur.

La bananeraie ayant été abattue et replantée en janvier 1966, on a considéré que les apports minéraux dus aux feuilles, stipes, etc... correspondaient aux immobilisations des bananiers en place en décembre 1966. De même on n'a pas tenu compte des apports minéraux par le paillage, n'ayant pas les éléments pour les calculer.

Ce bilan est donc très grossier mais si on compare le total des pertes (colonne 5 tableau 12) aux apports minéraux par les engrais (colonne 6) on constate que les résultats sont assez cohérents à l'exception du bilan "potasse" dont les pertes totales semblent surestimées (à moins que le paillage ne soit riche en potasse).

Une fois de plus on constate l'importance de l'entraînement par les eaux de la potasse, de l'azote et même de la chaux (et de la magnésie dans une moindre mesure). Seul le phosphore reste en majorité à la disposition des plantes (à plus ou moins longue échéance) dans le sol. Cet entraînement par les eaux de pluie (érosion, ruissellement, drainage) concerne presque la totalité de la potasse apportée par les engrais, 79 % de l'azote, 86 % de la chaux, 61 % de la magnésie et seulement 14 % du phosphore.

Par contre on ne retrouve dans l'exportation par la récolte de 25 tonnes de bananes à l'hectare (P. MARTIN PREVEL, 1962) que 34 % de la potasse, 16 % du phosphore, 12 % de l'azote, 2 % de la magnésie et 1 % de la chaux donnés sous forme d'engrais. La couche arable du sol perd donc respectivement 4, 7, 20 et 60 fois plus de potasse, d'azote, de magnésie et de chaux par entraînement par les eaux de pluie que par exportation dans une bonne récolte de banane.

Chap. 3 - CONCLUSIONS GENERALES.

En vue d'étudier différents aspects de la pédogénèse (érosion en nappe et lessivage oblique) et de la conservation de la fertilité (drainage et entraînements des matières fertilisantes) de sols ferrallitiques désaturés sur schiste très couramment mis en valeur par la culture bananière, l'I.F.A.C. et l'O.R.S.T.O.M. ont conclu un protocole d'accord pour l'exploitation en commun d'une case de mesure expérimentale de l'érosion et du lessivage oblique.

Une parcelle d'une cinquantaine de mètres carrés a été délimitée sur une plantation de banane de l'I.F.A.C. à Azaguié sur une pente voisine de 14 %. Au bas de celle-ci ont été installés deux dispositifs : l'un, classique, permettant de mesurer le ruissellement et l'érosion, l'autre, de conception originale, en vue de recueillir le drainage oblique.

Les résultats de cette campagne devront être confirmés dans les années à venir et précisés grâce à un meilleur aménagement du dispositif. Cependant on peut déjà les résumer comme suit :

1. L'érosion (1 à 2 t/ha/an) et le ruissellement (2 à 3 % des 1931 mm d'eau de pluie et d'irrigation) sont dix fois supérieurs à ceux qu'on pourrait trouver sous forêt mais très acceptables par rapport à ceux qu'on constate généralement sous une culture sarclée. (maïs et manioc E = 15 à 80 t/ha/an). Il s'agit d'une érosion en nappe qui se manifeste par la fonte de la couche arable et l'apparition des graviers de quartz à la surface du sol. Erosion et ruissellement ne se manifestent que sur un sol tassé et en l'absence d'un paillage. La bananeraie recouvre généralement bien le sol à partir du cinquième mois.

2. Le drainage oblique sur la tranche de sol étudiée (1,5 m) est loin d'être négligeable (2 à 5 % des précipitations annuelles) ; il atteint couramment des coefficients de 10 et 15 % lors des grosses averses de juillet et octobre. Il prend

toute son ampleur lorsque la nappe engorge le profil jusqu'à 30 cm de la surface (15 jours au début de juillet et soumet le sol à une véritable érosion scuterraine. Un réseau serré de drains est indispensable malgré les fortes pentes (14 %) des coteaux sur lesquels sont cultivés les bananiers.

3. L'irrigation est indispensable pour maintenir le rythme de production de la bananeraie pendant quatre à cinq mois de saison sèche et servir d'appoint aux moments de sécheresse critiques. Elle a néanmoins causé 10 % du drainage observé, 22 % du ruissellement et 15 % de l'érosion. On aura donc intérêt d'une part à calculer au plus juste les doses d'irrigation et d'autre part à garder le sol continuellement couvert (appoint de paillage).

4. Des nombreuses analyses des échantillons de terre et d'eau il ressort l'importance des pertes en bases et en azote organique et nitrique en solution dans les eaux de ruissellement et de drainage. Les pertes en azote ammoniacal et en phosphore sont négligeables. La majorité du phosphore et une bonne par une bonne partie des matières organiques restent liés aux matériaux solides érodés.

5. L'influence des engrais s'est marquée par des teneurs généralement plus élevées (en particulier pour la chaux, la magnésie, la potasse, l'azote et la silice) dans les écoulements recueillis sous bananeraie à Azaguié que sous forêt à Adiopodoumé. L'épandage d'un engrais en saison des pluies va se traduire successivement dans chacun des horizons et avec un certain décalage de temps et de concentration, par un brusque accroissement des teneurs de l'élément apporté (engrais) puis par une décroissance plus ou moins rapide jusqu'au niveau de base naturel à cette époque. Ainsi un apport d'urée n'a plus laissé de trace après dix jours totalisant 190 mm de précipitation.

La rentabilité des engrais est donc très différente suivant qu'ils sont répandus en saison sèche ou humide. Durant les pluies, les bases et l'azote seront apportés en doses très fractionnées sous forme granulée directement assimilable. Seul le phosphore, solidement fixé aux particules du sol, peut faire l'objet d'une fumure de fond sans courir le risque de voir la plus grosse partie des engrais entraînée par les eaux de drainage hors de portée des racines. Il nous semble donc que, pour les pays tropicaux humides, il faille tendre à fractionner d'autant plus les doses d'engrais que le sol est saturé et les précipitations fréquentes et élevées.

Notons encore que la composition chimique des eaux de drainage recueillies à chaque horizon pédologique reflète celle des solutions de sol à ces niveaux. On pourra donc envisager de dresser un bilan chimique global des pertes subies par la parcelle dès qu'on aura établi le bilan hydrique et en particulier le drainage vertical au-dessous de la zone exploitée par les racines.

Enfin signalons les liens étroits qui existent entre les phénomènes observés au niveau des eaux de drainage et la pédogénèse des sols. Ainsi on constate dans les eaux de drainage de ce sol ferrallitique désaturé des teneurs élevées en bases et matières organiques et, dix fois plus de silice que de fer et d'alumine. De même les colloïdes en pseudo-solution (talc, chlorite, illite et kaolinite) reflètent bien la nature de la roche mère. Nous espérons donc qu'au cours des prochaines années cette étude contribuera à la connaissance de la pédogénèse des sols tropicaux.

Remerciements

Nous sommes très reconnaissant à Mr. AUBERT, Chef de la Section de Pédologie de l'ORSTOM, et à Mr. FOURNIER, Directeur Scientifique de E. ROOSE de nous avoir confié ce programme de recherche passionnant.

Nous remercions d'autre part la Direction de l'IFAC qui a compris l'intérêt d'une recherche fondamentale débouchant aussi directement sur des applications pratiques et qui a accepté la prise en charge des manipulations sur le terrain. Celle-ci fût assurée sous la surveillance patiente et minutieuse de Mme MULLER technicienne du laboratoire d'analyse des sols de l'IFAC à Azaguié.

La mise au point de l'analyse des échantillons d'eau et le soin apporté au travail de série sont particulièrement importants pour la réalisation d'un tel programme. Qu'il nous soit permis d'en remercier ici Mr. NALOVIC, Chef du laboratoire d'analyse du Centre O.R.S.T.O.M. d'Adiopodoumé, Mmes PERRAUD et GAVINELLI et Mr. PETARD techniciens-chimistes ainsi que toute l'équipe des techniciens africains sans lesquels cet imposant travail d'analyse n'aurait pu être réalisé.

Nous adressons aussi nos remerciements à Mr. PINTA, Chef du laboratoire de spectroscopie de l'O.R.S.T.O.M. à Bondy chez qui nous avons toujours trouvé une franche collaboration et qui a accepté d'effectuer le dosage des éléments traces présents dans les eaux de ruissellement et de drainage, et l'analyse aux rayons X des argiles flocculées.

Enfin nous voulons exprimer toute notre gratitude à Mr. de BOISSEZON qui nous a si souvent prodigué ses conseils judicieux et en particulier lors de la correction du manuscrit.

A N N E X E S

Annexe 1.

Description détaillée de la parcelle expérimentale de mesure de l'érosion, du ruissellement et du lessivage oblique.

En vue de mesurer le ruissellement et l'érosion nous avons choisi une parcelle d'une cinquantaine de m² (22,2 m x 2,25 m) dans le carré 4 de la bananeraie de l'IFAC à Azaguié sur un coteau de 14 % de pente. Ce n'est qu'en novembre 1966 que cette parcelle fut délimitée par des tôles en plastique.

Au bas de cette parcelle un canal en béton protégé par une tôle recueille les eaux de ruissellement et les terres qu'elles transportent.

En aval du canal on a creusé une fosse ⁽¹⁾ dont les bords sont verticaux et dont la profondeur (1,75) dépasse l'horizon argileux moins perméable.

Après avoir délimité, décrit les horizons pédologiques (voir annexe 2) et récolté les échantillons nécessaires, on étançonne soigneusement tout le profil à l'aide de planches ⁽²⁾ qui s'appuient sur deux chevrons ⁽³⁾ encastrés dans les bords de la fosse (voir figure n°3). Les bois sont choisis parmi les plus résistants à la pourriture et aux termites (MAKORE, IROKO ou AZOBE) et plastifiés à la résine.

On a pris soin de laisser un interstice de 3 cm entre les planches délimitant les horizons pédologiques. Au moyen d'un outil tranchant (matchette, long couteau) et en dérangeant le moins possible la structure on découpe une tranche "f" de sol ⁽⁴⁾ dont la pente épouse celle du terrain ⁽⁵⁾.

(1) Fosse : largeur 1,5 m, longueur 2,1 m

(2) Planches : largeur 20 à 30 cm ; longueur 2,2m; épaisseur 27mm

(3) Chevrons : longueur 2 m ; épaisseur 6 x 6 cm.

(4) Fente : longueur 210cm; profondeur légèrement inférieure à la largeur de la tôle rattachée à la gouttière soit 19 cm; épaisseur moins de 2 cm.

(5) Ces deux opérations sont les plus délicates et décisives pour l'obtention des échantillons d'eau.

On y introduit une tôle "t" (6) que l'on force à pénétrer au-delà du fond de la fente et dont le rebord extérieur se termine par une gouttière ordinaire (pente longitudinale max. de la gouttière = 1 %). On bourre avec soin ⁽⁵⁾ la fente "f" de sable grossier lavé "s" en vue de plaquer la tôle "t" contre la lèvre inférieure de "f" et de percer les capillaires qui risquent de contourner la lèvre supérieure (effet de lissage). Sans ces précautions l'eau suit ces capillaires "retroussés" et n'est pas captée par la tôle "t".

Des tuyaux en plastique canalisent l'eau de drainage oblique coulant dans les gouttières "g" vers des récipients en polyéthylène posés au fond de la fosse. Les gouttières ont été placées à 30, 90 et 150 cm de la surface du sol ⁽⁷⁾.

Les eaux de ruissellement sont recueillies dans un canal ⁽⁷⁾ en béton large de 20 cm (recouvert de FLINT KOT) qui les dirige vers un piège à sédiments puis un fût de stockage de 200 litres ⁽⁷⁾. Un canal assure l'évacuation des eaux des fosses de ruissellement et de drainage oblique. Un pluviographe à auget basculeur (type météo nationale n° R 208 A : CERF) à mouvement hebdomadaire permet de mesurer l'intensité et la hauteur des pluies et d'évaluer leur énergie cinétique.

Un bâti "b" en tube d'acier soutient un toit "to" de tôle dont l'extrémité supérieure empêche l'eau de pluie de tomber dans le canal de ruissellement. Les bords de la fosse sont stabilisés par un crépis de ciment.

Un drain profond de 2 mètres limite les mouvements des eaux de nappe provenant des champs en amont de la parcelle.

(6) Tôle rattachée à la gouttière en fer galvanisé ou mieux en zinc : longueur 2 m, largeur 20 cm ; épaisseur 1 mm.

(7) En novembre 1967 nous avons procédé aux transformations suivantes :

1. Approfondissement de la fosse de drainage jusqu'à 2 m et placement d'une 4ème gouttière à 1,80 m de profondeur ;
2. Renouvellement des boiseries ;
3. Placement de 4 fûts en plastique de 60 litres pour stocker les eaux de drainage oblique (au lieu de 22 litres) ;
4. Ouverture d'une nouvelle fosse (1,2 m de long, 2 m de large et 1,50 m de profondeur) et placement d'un partiteur conçu par Mr. ROOSE et d'une deuxième cuve de 1 m³ permettant de mesurer des écoulements de 17,2 m³ soit un ruissellement de plus de 60 % pour une pluie de 250 mm sur une parcelle de 100 m² (6 x 16,66m) ;
5. Elargissement et agrandissement de la parcelle en vue de diminuer les effets de bordure.

Annexe 2.

Description du profil de la case d'érosion et de lessivage oblique installée dans le carré 4 de la bananeraie de l'IFAC à Azaguié.

Topographie : pente 14 % ; 2/3 bas de la pente juste avant les colluvions ; colline à profil convexe entaillé obliquement par des drains (profonds de 1 mètre) distants de 30 mètres environ. Paysage largement ondulé typique des zones schisteuses à pentes moyennes à fortes (10-20 %)

Erosion : en nappe; se traduit par la fonte de l'horizon arable et la remontée des cailloux de la nappe graveleuse. Tendance du sol à se tasser et à former une croûte superficielle.

Végétation : bananeraie (2000 pieds/ha) sur vieille défriche (vers 1950) de forêt pélohygrophile à Diospiros et Mapania. Peu de mauvaises herbes combattues efficacement par des sarclages à la daba ou aux herbicides (GRAMOXON). Plantation des bananiers cultivar Poyo fin janvier 1966. Paillage après plantation (50 tonnes de branchages de forêt).

Description :

0 - 17 cm horizon gris brun, sableux, humifère, structure fondue à polyédrique moyenne peu développée, quelques racines de bananier, quelques charbons de bois; horizon poreux, friable: épaisseur variant de 2 à 12 cm. Passage tranché mais irrégulier (labour).

7 - 30 cm horizon brun jaune, sableux à structure polyédrique moyenne peu développée; nombreuses traces d'activité de la microfaune; les derniers charbons de bois; nombreuses racines de bananier; horizon poreux, peu collant et friable dont l'épaisseur peut varier de 13 à 33 cm et qui est plus ou moins mélangé aux horizons

voisins (humifère et graveleux) ce qui explique la présence de quelques cailloux quartzeux remontés jusqu'en surface et de mottes de terre humifère vers 10 à 30 cm.

Passage tranché et ondulé.

30 à 75 cm horizon ocre jaune, très graveleux à matrice sablo-argileuse, graviers et cailloux de quartz plus ou moins ferruginisés de 0,5 à 15 cm de diamètre très mal triés ; les plus petits sont arrondis les autres à arêtes usées ; vers le bas on observe les premières taches ferrugineuses ocres et des amas concrétionnaires, couleur lie de vin ; structure polyédrique moyenne mieux développée ; nombreuses taches de pénétration de la matière organique quelques rares racines ; nombreuses canalicules tapissées d'un matériau beige argilo-humifère que l'on peut observer jusqu'au delà de 2 m dans l'horizon d'argile tachetée ; horizon très poreux (en grand) collant et très difficile à pénétrer aux instruments. Passage progressif.

0,75 à 2,8 m
et plus horizon d'argile tachetée, rouge foncé sur fond brun ocre ; encore quelques petits gravillons vers le haut ; nombreux amas concrétionnaires en voie de durcissement ; structure polyédrique moyenne à fine très bien développée ; nombreuses canalicules (diamètre 0,4 à 2 cm) subverticales et fentes tapissées de racines, peu de racine dans la masse du sol ; à partir de 1,5 m la couleur du sol est plus claire (rouge sur fond blanc), la texture plus limoneuse et les amas concrétionnaires plus rares ; horizon ferme à sec poreux (en grand), collant, plastique humide, les taches rouges disparaissent vers 2,5 où le sol est bariolé jaune, gris, beige.

TABLEAU n° 13 - Résultats analytiques du profil de la case d'érosion et de lessivage oblique du carré 4 de la bananeraie I.F.A.C. à Azaguié.

Profondeur	0-25	30-40	60-80	100-120	140-160	180-200	230-250
<u>Bases échangeables</u>							
Ca meq. %	5,05	0,82	0,90	0,69	0,46	0,34	0,26
Mg meq.	1,41	0,13	0,27	0,28	0,18	0,20	0,41
K "	0,71	0,22	0,25	0,22	0,22	0,10	0,10
Na "	0,26	0,28	0,36	0,31	0,28	0,44	0,36
S meq. %	7,43	1,45	1,78	1,50	1,14	1,08	1,13
T meq	10,6	5,58	6,25	7,17	7,06	4,25	5,60
V %	70,09	25,98	28,50	20,92	16,10	25,41	20,2
pH	5,4	5,5	5,1	5,0	5,5	5,5	5,3
<u>Bases totales</u>							
Ca meq. %	7,91	1,05	1,21	0,72	0,80	0,50	0,69
Mg meq	2,70	1,40	1,60	1,50	1,52	2,08	2,60
K "	1,35	1,25	1,05	1,20	1,12	0,85	0,66
Na "	0,61	0,72	0,62	0,64	0,69	1,02	0,95
P ₂ O ₅ total %	0,93	0,28	0,37	0,43	0,51	0,36	0,37
C %	19,10	4,56	4,66	4,20	2,43	0,73	0,81
M.O. %	33,0	7,86	8,03	7,20	4,19	1,26	1,40
N %	1,38	0,56	0,64	0,69	0,45	0,29	0,31
C/N	13,4	8,1	7,3	6,1	5,3	2,5	2,6
<u>Triacide</u>							
SiO ₂	-	-	14,0	18,0	23,0	23,3	21,9
Al ₂ O ₃	-	-	12,5	16,1	20,8	19,6	19,1
Fe ₂ O ₃ total	2,35	3,90	5,05	7,25	11,0	6,85	7,05
Fe ₂ O ₃ libre	1,39	2,43	3,90	5,52	7,65	4,78	3,82
TiO ₂	-	-	0,70	0,76	1,00	0,88	0,82
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	-	-	1,89	1,90	1,88	2,02	1,95
<u>Granulométrie</u>							
argile %	14,6	25,4	32,9	41,2	47,2	31,8	29,7
limon fin %	7,8	9,1	8,2	10,2	9,9	22,2	23,7
limon grossier %	14,3	17,4	13,6	12,7	4,6	9,1	11,1
sable fin %	33,3	26,2	21,9	17,0	23,9	18,0	19,4
" grossier %	27,8	20,8	23,1	18,4	13,9	18,8	14,7
refus %	5,0	48,1	38,8	7,4	2,5	2,5	0
perméabilité: K cm/heure	3,98	0,62	0,43	0,37	1,19	0,84	0,57
instabilité struct: I _s	1,22	5,13	7,69	4,51	2,54	7,36	6,56
pF 4,2	7,47	10,85	13,93	17,08	19,24	14,90	15,36
pF 3	12,99	17,34	21,37	23,27	25,77	27,22	27,50
pF 2,7	16,59	19,34	22,59	29,48	34,28	33,40	33,49
pF 2,5	17,84	21,59	26,42	31,69	35,99	37,01	41,09
pF 2,2	24,00	26,33	30,22	37,22	41,84	41,48	44,91

- L'observation du profil ainsi que des écoulements des eaux de drainage aux différents niveaux dans la fosse de lessivage oblique montre que la nappe oscille très régulièrement jusqu'à 1,50 m de profondeur et peut même remonter durant quelques semaines jusqu'au milieu de l'horizon gravillonnaire (premières taches ocres) malgré une pente de 14 % et la présence des drains.

- L'appréciation de la texture sur le terrain semblait montrer une augmentation de la teneur en argile jusque vers 1 mètre : puis le matériau semblait dominé par la présence du limon. L'analyse a montré qu'il existe un net maximum d'argile jusque vers 1,5 m. Cependant si on fait la courbe "argile + limon" on retrouve bien l'appauvrissement en surface jusque vers 0,7 m mais plus le ventre caractéristique des sols lessivés classiques. Il s'agit peut être de phénomènes dus à la présence du fer en forte quantité à ce niveau (pseudo-limon)? L'observation sur le terrain des dépôts beiges de matériaux humifères et argileux et la constatation au laboratoire d'une chute brutale des colloïdes en pseudo-solution des eaux de drainage de 100-125 mgr/l vers 0,9 m de profondeur à 8-13 mgr/l vers 1,50 m semblent bien indiquer que le sol est soumis à un véritable lessivage vertical : ceci n'exclut pas l'action simultanée d'autres processus tels que lessivage oblique et érosion différentielle en nappe.

TABLEAU n° 14 - Analyses des éléments érodés sur la
parcelle d'étude de l'érosion :
Azaguié, carré 4,

		juin-juillet 1966	octobre-novembre 1966	décembre 1966	janvier 1967
Ca échangeable	meq %	15,31	16,06	13,56	13,11
Mg		3,78	5,40	5,42	5,52
K		0,90	0,93	0,62	1,06
Na		1,08	0,12	0,05	0,09
S	meq %	21,07	22,51	19,65	19,78
T	meq %	15,14	24,23	21,25	20,94
V	%	100	92,9	92,4	94,4
pH	1/2,5	7,8	6,8	6,4	6,4
Ca total	meq %	27,23	25,00	19,73	18,98
Mg		9,75	14,58	10,25	15,67
K		3,42	5,37	5,25	2,92
Na		1,80	0,28	0,27	0,20
M.O.	%	66,9	112,6	74,1	58,3
C	%	38,78	65,26	42,97	33,77
N	%	2,709	3,540	2,912	3,010
C/N		14,3	17,9	14,7	11,2
P ₂ O ₅ total	%	1,685	2,140	1,740	1,835
Argile		18,2	41,5	31,5	36,7
Limon fin		15,3	31,0	22,1	27,9
Limon grossier		20,0	9,6	26,0	23,3
Sable fin		20,1	7,1	8,3	5,7
Sable grossier		21,7	3,6	5,8	3,1

Annexe 3.

BIBLIOGRAPHIE GENERALE

a - Pédologie, climatologie, botanique, agronomie, etc..

- 1 - AUBERT (G.) et SEGALIN (P.) 1966. - Projet de classification des sols ferrallitiques.
Cahier ORSTOM série Pédologie Vol. 4 n°4 p. 97-112.
- 2 - CHAMPION (J.) 1960. - Quelques indications sur les besoins en eau du bananier "nain".
Fruits, 15, 9, 1960, p. 387-400.
- 3 - ELDIN (M.) et DAUDET (A.) 1967. - Notice des cartes climatologiques de Côte d'Ivoire.
1. Déficits hydriques cumulés et durée de la saison sèche
2. Données pluviométriques.
Rapport multigr. O.R.S.T.O.M. Adiopodoumé 9 pages.
- 4 - GAISER (R.N.) 1952. - "Root channels and roots in forest soils"
Proc. Soil Sci. Soc. Amer., 16, p. 62-65.
- 5 - GORYUNOV (N.S.) 1966. - Influence of irrigation methods on some soil properties.
Soviet. Soil. Sci. (Washington) janvier 1966 1, 14-19.
- 6 - HURSH (C.R.) and HOOVER (M.D.) 1941.- "Soil profile characteristics pertinent to hydrologic studies in the Southern Appalachians".
Proc. Soil. Sci. Soc. Amer., 6:414-422.
- 7 - LATHAM (M.) 1966. - Etude des sols de la zone de contact entre le socle birrimien et les formations sédimentaires de Côte d'Ivoire.
Rapport multigr. ORSTOM 87p., 16 réf., nombreuses fig.
Rapport de stage.
- 8 - LENEUF (N.) 1966. - Exposé introductif sur le processus de lessivage dans les sols ferrallitiques.
Cahier ORSTOM, série Pédologie Vol. 4 n°4 p.25-29, 2 réf.

- 9 - LEVINE (G.) 1952. - Effects of irrigation droplet size on infiltration and aggregate breakdown.
Ag. Eng. 33 p.559.
- 10 - Mc INTYRE (D.S.) 1958. - "Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impact".
Soil Sci. n°85 p. 261-266.
- 11 - MANGENOT (G.) 1955. - "Etude sur les forêts des plaines et des plateaux de Côte d'Ivoire".
Etudes Eburnéennes n°4, 1955, p. 5-61.
- 12 - MARTIN PREVEL (P.) 1962. - "Les éléments minéraux dans le bananier et dans son régime".
Fruits, 17, 3, 1962, p. 123-128.
- 13 - MONNIER (G.) 1955. - Etudes pédologiques à la station de l'I.F.A.C. à Azaguié.
Ann. IFAC 1955 n°10, 34p., carte 1/10.000.
- 14 - RIQUIER (J.) 1963. - "Formules d'évapotranspiration".
Cahier O.R.S.T.O.M. série Pédologie 1963 n°4, p. 33-57.
- 15 - RUELLAN (A.) et DELETANG (J.) 1967. - "Les phénomènes d'échange de cations et d'anions dans les sols".
Documentation technique ORSTOM, Paris, 123p.
- 16 - SEGALEN (P.) 1966. - Le processus de ferrallitisation et ses limites.
Cah. ORSTOM, sér. Pédol. Vol. 4 n°4 p. 15-21, 11 réf.

b - L'eau et les substances fertilisantes.

- 17 - AHMED (I.V.) 1964. - Placement of fertilizer capsules for corn in plots.
Pakist. J. Soil Sci. 1 n°1 p. 50-56.
- 18 - BEATER (B.E.); FRANKEL (E.) 1965. - Alterations in chemical composition during the progressive weathering of Dwyka tillite and dolerite in Natal.
Proc. (39th) Congr. S. Afr. Sug. Technol. Ass. p. 250-251.

- 19 - BLANCHARD (R.W.); CALDWELL (A.C.) 1966. - Phosphate-ammonium-moisture relationships in soils.
1. Ion concentrations in static fertilizer zones and effects on plants.
2. Ions concentrations in leached fertilizer zones and effects on plants.
Proc. Soil Sci., Soc. Amer., 30 p. 39-48.
- 20 - BROADBENT (F.E.), HILL (G.N.) and TYLER (K.B.) 1958. - Transformation and movement of urea in soils.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 22 p. 303-307, 1958.
- 21 - COURPRON (C.) 1966. - Etude de la mobilité de la potasse appliquée à un sol sablo-humifère des Landes de Gascogne.
C.R. Acad. Agric. fr. (Paris) Oct. 66, 52, 13, 958-963.
- 22 - DHAR (B.K.); SEN (M.K.) 1965. - Mineralization of a urea-formaldehyde compound in some Indian soils.
Technology, India 2, p. 162-165.
- 23 - DOMMERMUES (Y.) 1962. - "Contribution à l'étude de la dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et en zone tropicale sèche".
Thèse Fac. Sciences Paris série A n°3888 n° 4739.
- 24 - GHILDYAL (B.P.) 1963. - Influence of tropical seasons on carbon and nitrogen transformations, nitrite and nitrate formers and bacterial plate count.
Soil Sci. and Plant. Nutr. (Tokyo) 1963, 9, 2 p. 28-34.
- 25 - HAQUE (I.); IBRAHIM (M.) 1965. - The influence of source of nitrogen, texture of soil and depth of irrigation on the movement of fertilizer nitrogen.
Pakist. J. Soil Sci. 1 n°2 p. 1-13.
- 26 - KANEHIRO (Y.), NAGASAKO (L.K.) and HADANO (H.F.) 1960. - Leaching loss of nitrogen fertilizers.
Hawaiian Farm Sci. n°9, p. 6-7.
- 27 - KRAUSE (H.H.) 1965. - Effect of pH on leaching losses of potassium applied to forest nursery soil.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc n°29, p. 613-615.

- 28 - MANGIN (J.Ph;), LECOLLE (J.), MATHIEU (Ph.), MONNET (C.),
PINTA (M.) SIRCOULON (J.) 1966. - "Géochimie des eaux na-
turelles ; le transport en solution par un fleuve de
Côte d'Ivoire".
C.R. Acad. Sci. Paris tome 262 du 23/5/66 Série D, p.2204-06.
- 29 - MARTIN (M.) 1958. - "Relation entre la résistivité des eaux
et leur composition chimique".
Rev. Inst. Franç. du pétrole et ann. des combustibles li-
quides Vol. 13, p. 187-196.
- 30 - NÖMMIK (H.) 1966. - "Particle-size effect on the rate of
nitrification of nitrogen fertilizer materials, with
special reference to ammonium fixing soils".
Plant and Soil Vol. 24 n°2 p. 181-200. 30 réf.
- 31 - SMITH (F.W.) 1964. - "Fertilizer/water-use relationships".
Proc. (40th) a. Meet.Coun. Fertil. Applic. p. 48-57.
- 32 - WAGNER (G.H.) 1965. "Changes in nitrate - N in field plot
profiles as measured by the porous cup technique".
Soil Sci. n° 100 p. 397-402.
- 33 - WIKLANDER (L.) 1965. - [The composition and ecological impor-
tance of the soil solution.]
Grundförbättring, 18, p. 71-88.
- c - L'érosion et la conservation de la fertilité des sols.
- 34 - ADAMS (J.E.) 1966. - "Influence of mulches on runoff, erosion
and soil moisture depletion".
Proc. Soil. Sci. Soc. Amer. 30, 110-114.
- 35 - AREND (J.L.) and HORTON (R.E.) 1942. - "Some effects of rain
intensity, erosion and sedimentation on infiltration
capacity".
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 7, p. 82-89.
- 36 - COLMAN (E.A.) 1953. - "Vegetation and watershed management"
The Ronald Press 412 pp.

- 37 - BODEUX (A.) 1965. - Le bilan d'eau dans le bassin hydrographique de la Karuzi au Burundi.
Office de la Coop. au Dév. du Minist. des Affaires Etrangères de Belgique 102p. 156 réf.
- 38 - FOURNIER (F.) 1958. - "Les valeurs d'érosion du sol dans les territoires français d'Outre-Mer".
I.U.G.G., Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, publ. n°43 p. 76.
- 39 - FOURNIER (F.) 1957. - La recherche en érosion et conservation des sols dans le continent africain.
Sols Africains XII n° 1 p. 5-52.
- 40 - HOLY (M.) 1965. - Investigation of the relation between runoff and soil erosion in an experimental area.
Publ. int. Ass. Scient. Hydrol. 66, Symp. Budapest 116-121.
- 41 - HORTON (R.E.) 1939. - "Analysis of run-off plot experiments with varying infiltration capacity".
Trans. Am. Géophys. Union 20, p. 693-711.
- 42 - LOWDERMILK (W.C.) 1930. - Influence of forest litter on run-off percolation, and erosion.
J. For. 28 : 474-491.
- 43 - OSBORN (BEN) 1954. - Effectiveness of cover in reducing soil splash by raindrop impact.
J. Soil and Water cons. 9 p. 70.
- 44 - ROOSE (E.J.) 1967. - Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal".
Agron. Trop. 1967, p. 123-152.
- 45 - ROOSE (E.J.) 1967. - "Quelques exemples des effets de l'érosion hydrique sur les cultures".
Rapport ORSTOM multigr. 18p. 21 réf. 3 tableaux.
Communication au Congrès de Tananarive (novembre 1967).

- 46 - SWANSON (N.P.), DEDRICK (A.R.), WEAKLY (H.E.) and HAISE (H.R.)
1965. - Evaluation of mulches for Water-Erosion control.
Trans. of Amer. Soc of Agric. Eng., Vol.8 n°3 p. 438-440.
- 47 - WISCHMEIER (W.H.) and SMITH (D.D.) 1958. - Rainfall energy
and its relationship to soil-loss.
Trans. Amer. Geo. Un., 1958, 39, pp. 285-291.
- 48 - WISCHMEIER (W.H.) 1959. - A rainfall erosion index for a
universal soil-loss equation.
Soil Sci. Soc. Amer. Proceedings, 1959, t.23, pp. 246-249.
- 49 - ZINGS (A.W.) 1940. - "Degree and length of land slope as it
effects soil loss in runoff".
Agr. Eng. 21 (2), pp. 59-64.
- d - L'eau dans le sol.
=====
- 50 - CHAHAL (R.S.) 1964. - "Effect of temperature and trapped air
on the energy status of water in porous media".
Soil Sci., n° 98 p. 107-112.
- 51 - CHAHAL (R.S.) 1965. - Effect of temperature and trapped air on
Matric suction.
Soil Sci. Vol. 100 n°4 1965, p. 262-266.
- 52 - COLMAN (E.A.) and BODMAN (G.B.) 1945. - "Moisture and energy
conditions during downward entry of water into moist and
layered soils".
Soil Sci. Amer. Proc. 9, p. 3-11.
- 53 - DULEY (F.L.) 1939. - Surface factor affecting the rate of
intake of water by soils.
Soil Sci. Amer. Proc. n°4 p. 60-70.
- 54 - FEODOROFF (A.) 1965. - Etude expérimentale de l'infiltration
de l'eau non saturante.
Thèse Ann. Agro. (Paris) 1965, 16, 2 et 3.

- 55 - FEODOROFF (A.) 1964. - Remarques sur le mécanisme de l'infiltration de l'eau non saturante dans un sol initialement sec. C.R. Acad. Sci. (Paris), 9/12/64, 259, 23, 4320-4322. 4 réf.
- 56 - HANSEN (V.E.) 1955. - "Infiltration and soilwater movement during irrigation".
Soil Sci. 79, p. 93-105.
- 57 - HORTON (J.H.) and HAWKINS (R.H.) 1965. - "Flow path of rain from the soil surface to the water table".
Soil Sci. Vol. 100 n°6 1965, p. 377-383. 16 réf.
- 58 - KUNTZE (H.) 1966. - Die messung des geschlossenen und offenen kapillarsaumes in natürlich gelagerten böden.
[La mesure des capillaires ouverts et fermés dans les sols en place.]
Z. Pfl. Ernähr. Dung. Bodenk. (Weinheim) 1966, 113, 2, 97-106.
- 59-LIAKOPOULOS (A.C.) 1965. - "Retention and distribution of moisture in soil after infiltration has ceased".
Bull. AIHS (Gentbrugge) Juin 1965, 2, p. 58-59.
- 60 - LUTZ (J.F.), PINTO (R.A.), GARCIA-LAGOS (R.), HILTON (H.G.) 1966
Effedt of phosphorus on some physical properties of soils
II - Water retention.
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. (madison), juillet/août 1966,
30, 4, 433-437.
- 61 - MAERTENS (C.); COURAU (M.) 1966. - Quelques observations concernant les accidents attribués à l'asphyxie du pêcheur.
C.R. Acad. Agric. Fr. (Paris) juin 1966, 52, 12, p. 874-882.
- 62 - PECK (A.J.) 1965. - Moisture profile. Development and air compression during water uptake by bounded porous bodies :
2. Horizontal columns.
Soil Sci. Vol. 99 n° 5 p. 327-334.
- 63 - PECK (A.J.) 1965. - Moisture profile development and air compression during water uptake by bounded pcrous bodies : 3 vertical columns.
Soil Sci. Vol. 100 n° 1, p. 44-51, 8 réf.

- 64 - POWERS (W.L.) 1934. - "Soil water movement as affected by confined air".
J. Agr. Research 49, p. 1125-1133.
- 65 - SEGINER (I.) and LEVINE (G.) 1964. - Infiltration of water under pressure from a piezometer cavity into a homogeneous soil : 1. One-dimensional infiltration.
Soil Sci., Vol. 97 n°1, p. 48-57.
- 66 - SMITH (W.O.), OLSEN (H.W.), BAGNOLD (R.A.), RICE (J.C.) 1966. - Certain flows of air and water in sands during infiltration.
Soil Sci. (Baltimore) juin 1966, 101, 6, 441-449.
- 67 - WILSON (L.G.) and LUTHIN (J.N.) 1963. - "Effect of air flow ahead of the wetting front on infiltration".
Soil Sci., 96, p. 136-143.
- e - Drainage oblique.
=====
- 68 - BURYKIN (A.M.) 1957. "Seepage of water from soils in mountainous regions of the humid subtropics."
Soviet. Soil Sci. Pochvovedenie n° 12, p. 90-97.
- 69 - HEWLETT (J.D.) 1961. - "Soil moisture as a source of baseflow from steep mountain watersheds".
U.S. Dept. of Agric. Southeast Forest Expt. Sta. paper 132, 11pp.
- 70 - HOOVER (M.D.) 1962. - "Action et mouvement de l'eau dans la forêt". p. 38-91.
Extrait de "Influences exercées par la forêt sur son milieu"
F.A.O. Rome Etude des forêts et des produits forestiers n° 15 341pp.
- 71 - HURSH (C.R.) and HOOVE (M.D.) 1941. - "Soil profile characteristics pertinent to hydrologic studies in the southern Appalachians".
Proc. Soil Sci. Soc. Amer., 6, p. 414-422.

- 72 - HURSH (C.R.) and FLETCHER (P.W.) 1942. - "The soil profile as a natural reservoir."
Proc. Soil Sci. Soc. Amer., 7, p. 480-486.
- 73 - HURSH (C.R.) 1944. - "Chairman's report to sub-committee on subsurface flow".
Trans. Amer. Geophys. Union. Part V p. 743-746.
- 74 - KELLER (J.), ALFARO (J.F.) 1966. - "Effect of water application rate on leaching".
Soil Sci. (Baltimore) août 1966, 102, 2, 107-114.
- 75 - KIRKHAM (D.) 1947. - "Studies on hillside seepage in the lowan drift area."
Proc. Soil Sci. Soc. Amer., 12 p. 73-80.
- 76 - ROESSEL (B.W.P.) 1951. - "Hydrologic problems concerning the runoff in headwater regions".
Trans Amer. Geophys. Union 31, p. 431-442.
- 77 - ROOSE (E.J.) 1967. - "Un dispositif de mesure du lessivage oblique dans les sols en place".
Rapport ORSTOM multigr. 25p. 21 réf. 2 fig. 2 photos 2 tabl
- 78 - ROOSE (E.J.) 1967. - "Erosion, ruissellement et lessivage oblique sous une plantation d'hévéa en basse Côte d'Ivoire".
- I Milieu, dispositif et résultats en 1966.
Rapport IRCA - ORSTOM Abidjan 46p., 45 réf., 7 tabl., 5 fig
- 79 - ROOSE (E.J.) 1968. - "Erosion en nappe et lessivage oblique dans quelques sols ferrallitiques de Côte d'Ivoire".
Communication à la Sixième Conf. Biennale de la WASA/ASOA Abidjan, du 8 au 13 avril 1968 15p., 11 réf., 3 tableaux.
- 80 - SCHIFF (L.) and DREIBELBIS (F.R.) 1949. - Movement of water within the soil and surface runoff with reference to land use and soil properties.
Trans. Amer. Geophys. Un. 30, P. 401-411.

- 81 - SWARTZENDRUBER (D.) 1960. - "Water flow through a soil profile as affected by the least permeable layer".
J. Geophys. Research n°65, p. 4037-4042.
- 82 - TAYLOR (S.A.) and HEUSER (N.C.) 1953. - "Water entry and downward movement in undisturbed soil core".
Soil Sci. Soc. Amer. Proc. n° 17, p. 195-201.
- 83 - VAN DIJCK (D.C.) 1958. - Water seepage in relation to soil layering in the Canberra district".
CSIRO, Div. of Soils, Commonwealth of Austral. Rpt 5/58
13pp.
- 84 - VAN 't WOUDT (B.D.) 1954. - "On factors governing subsurface stormflow in volcanic ash soils".
N.Z. Trans. Amer. Geophys. Union, 35, p. 136-144.
- 85 - WHIPKEY (R.Z.) 1965. - "Measuring subsurface stormflow from simulated rainstorms - a plot technique".
U.S. Dept. of Agr. Forest Serv. Cent. States Forest Expt.
Sta. Res Note CS-29 6pp.
- 86 - WHIPKEY (R.Z.) 1965.- Subsurface stormflow from forested slopes.
Bull. Ass. Inter. d'Hydrologie Scient. juin 1965, p. 74-87.
-