

# **Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite sous culture et sous une savane arbustive soudanienne du nord de la Côte d'Ivoire (Korhogo : 1967-75)**

Eric J. ROOSE

*Pédologue ORSTOM*

*Centre d'Adiopodoumé, B.P. V 51, Abidjan, Côte d'Ivoire  
Actuellement : Labo Géol. Appl. Université d'Orléans - 45045 Orléans Cedex*

## **RÉSUMÉ**

*L'auteur présente la synthèse de neuf années d'observations sur toute une série de dispositifs permettant de schématiser le bilan hydrique et les transports de matières par les précipitations, l'érosion, le drainage et les remontées biologiques sous une culture de maïs et une savane arbustive soudanaise de la zone dense de Korhogo. La dynamique actuelle est très active mais comporte des aspects observés en zone ferrallitique forestière et d'autres en zone ferrugineuse de savane. En effet, le climat est agressif et caractérisé par l'alternance d'une longue saison sèche (arrêt de l'évolution des matières organiques, feux de brousse, remontées capillaires et floculation au fond des micropores au sommet de la nappe d'argile bariolée) et d'une saison humide où l'ETP reste élevée (3,5 à 6 mm/jour) mais où les pluies sont très abondantes durant trois mois (200 à 500 mm/mois = risques d'érosion, de lixiviation des solubles et de lessivage des colloïdes). Sous savane, le bilan géochimique est à peu près équilibré, mais les feux de brousse trop fréquents empêchent la constitution de stocks importants d'éléments mobilisables pour les plantes. Les eaux de surface sont influencées par la dynamique des matières organiques vivantes et mortes, tandis que les eaux de nappe sont en relation avec les constituants minéraux des altérations. Sous culture, l'équilibre est rompu par les exportations et l'augmentation des pertes (surtout érosion) : si on souhaite instaurer une agriculture permanente, il est indispensable de restituer le maximum de matières organiques, d'apporter sous forme fractionnée les principaux nutriments et de prévoir de petits aménagements conservatoires de l'eau et des fractions fines du sol. En effet, les horizons superficiels de ces sols gravillonnaires ont tendance à s'appauvrir en particules fines et à devenir squelettiques sous culture, suite au lessivage des colloïdes et surtout à l'érosion sélective combinée à l'action de divers agents d'homogénéisation (mésofaune et techniques culturales).*

## **SUMMARY**

**ACTUAL DYNAMICS OF A GRANITE DERIVED GRAVELLY FERRALLITIC SOILS UNDER CULTIVATION AND UNDER BUSH SAVANNAH IN NORTHERN IVORY COAST**

*The author proposes the synthesis of nine years experimentations on many devices allowing to value water balance and substances transfer by rainfall, erosion, leaching and biological activity under corn field or sudanese*

bush savanna into the dense populated area of Korhogo. Actual pedogenesis is very active but remember partly what we observed in the forested ferrallitic area and partly in the ferruginous savanna area. Indeed, the climate is very aggressive and characterised by alternance of a long dry season (bush fire, organic matter evolution stopped, ascending of matter by capillarity, flocculation into micropores on the top of the mottled clay horizon) and a rain season where P.E.T. remains high (3,5 to 6 mm/day) but where the rainfalls are very abundant during 3 months (200 to 500 mm/month = high potentiality of erosion and leaching of colloids). Under savanna, chemical balance is about equilibrated but annual bush fire prevent the establishment of substantial reserve of nutrients mobilisable for plants. Superficial water are equilibrated with living and dead organic matter since underground water are in relation with mineral constituents of weathered materials. Under crops, the equilibrium is broken by increasing losses (exportation and erosion) : so it is necessary to restitute maximum of organic matter, to bring nutrients in fractionnated doses and to organise little water and soil fine particules conservation management. Without management, the upper horizons of these gravelly soils become skeletal by colloids leaching and principally by selective sheet erosion combined with homogenisation action of man (cultural techniques) and mesofauna (termites, worms, and so on...).

## INTRODUCTION

Dès 1964, l'ORSTOM a lancé avec la collaboration des Instituts du Gerdat, un programme d'étude de la dynamique des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux sous végétation naturelle ou cultivée entre Abidjan et Ouagadougou. Entre les stations d'observation établies sous forêt en zone subéquatoriale et celles de la savane soudano-sahélienne, deux stations ont été choisies sous savane en milieu tropical de transition : l'une à Bouaké (station IRAT) dans la zone guinéenne à deux saisons des pluies et l'autre près de

Korhogo dans une zone de savane arbustive soudanienne dégradée abondamment arrosée pendant six mois de l'année.

De nombreuses études hydrologiques, sédimentologiques et pédologiques ont été publiées sur cette région très peuplée à vocation agricole; le but de cette note est de présenter une synthèse de neuf années d'observations sur la dynamique actuelle du sol étudié en parcelle expérimentale en milieu naturel ou cultivé. Des bilans hydriques, géochimiques et de migration de matières sont présentés, non pas tellement pour expliquer la morphologie des sols ferrallitiques ocres

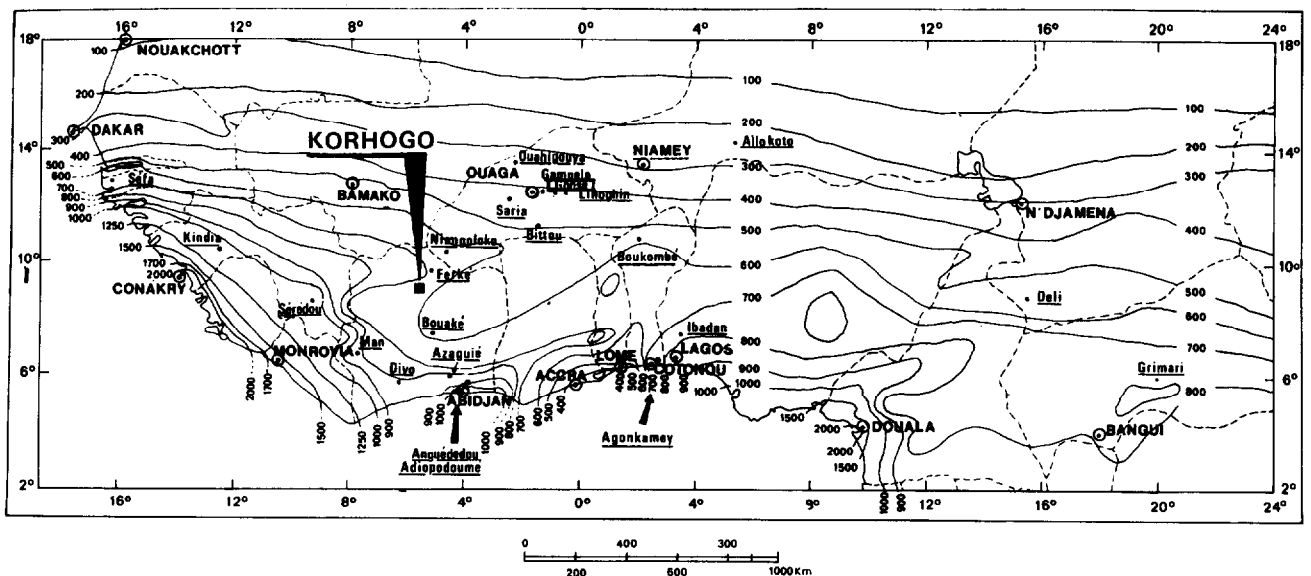


FIG. 1. — Esquisse de la répartition de l'indice d'agressivité climatique annuel moyen (Rusa de WISCHMEIER) en Afrique de l'ouest et du centre.

Situation des parcelles d'érosion. (D'après les données pluviométriques rassemblées par le Service Hydrologique de l'ORSTOM et arrêtées en 1975).

gravillonnaires, laquelle dépend pour une large part d'un héritage géomorphologique ancien, mais surtout pour faire ressortir l'évolution de ces sols pauvres en fonction des options de mise en valeur.

### 1. LE MILIEU

Le bassin de Korhogo, représentatif des arènes granitiques très cultivées du Nord de la Côte d'Ivoire où a été implanté l'ensemble du dispositif de mesure, est situé à 5 km de l'agglomération de Korhogo (9°25' lat. N.; 5°39' long. W.; 390 m alt.) à proximité des villages de Waraniene et Doka.

La végétation naturelle est une savane arbustive à *Butyrospermum parkii*, *Parkia biglobosa*, *Combretum*, *Daniella oliveri*, *Baobab*, *Isobertinia doka*, *Parinari curatellifolia*, et diverses pyrophyllles.

La strate herbacée est formée de touffes d'Andropogon ou d'un tapis plus modeste de *Hyparrhenia diplandra*, *Ctenium*, *Cyperus*, *Indigofera tinctoria* et diverses annuelles (SPICHTER, communication personnelle 1975). Cependant la flore est modifiée par les feux de brousse, les techniques culturales traditionnelles et le défrichement sélectif (respect du Karité, du Nere et plantation de manguiers, tecks, anacardier et divers exotiques).

Le climat est du type tropical de transition à une seule saison des pluies. Les précipitations annuelles varient de 1.000 à 1.700 mm autour d'une moyenne de l'ordre de 1.350 mm. Elles sont réparties en 4 mois très secs (novembre à février moins de 25 mm), quatre mois intermédiaires et quatre mois très humides (150 à 320 mm de juin à septembre). En août et septembre, les pluies mensuelles peuvent dépasser 400 mm si bien qu'on observe un fort drainage et une brusque

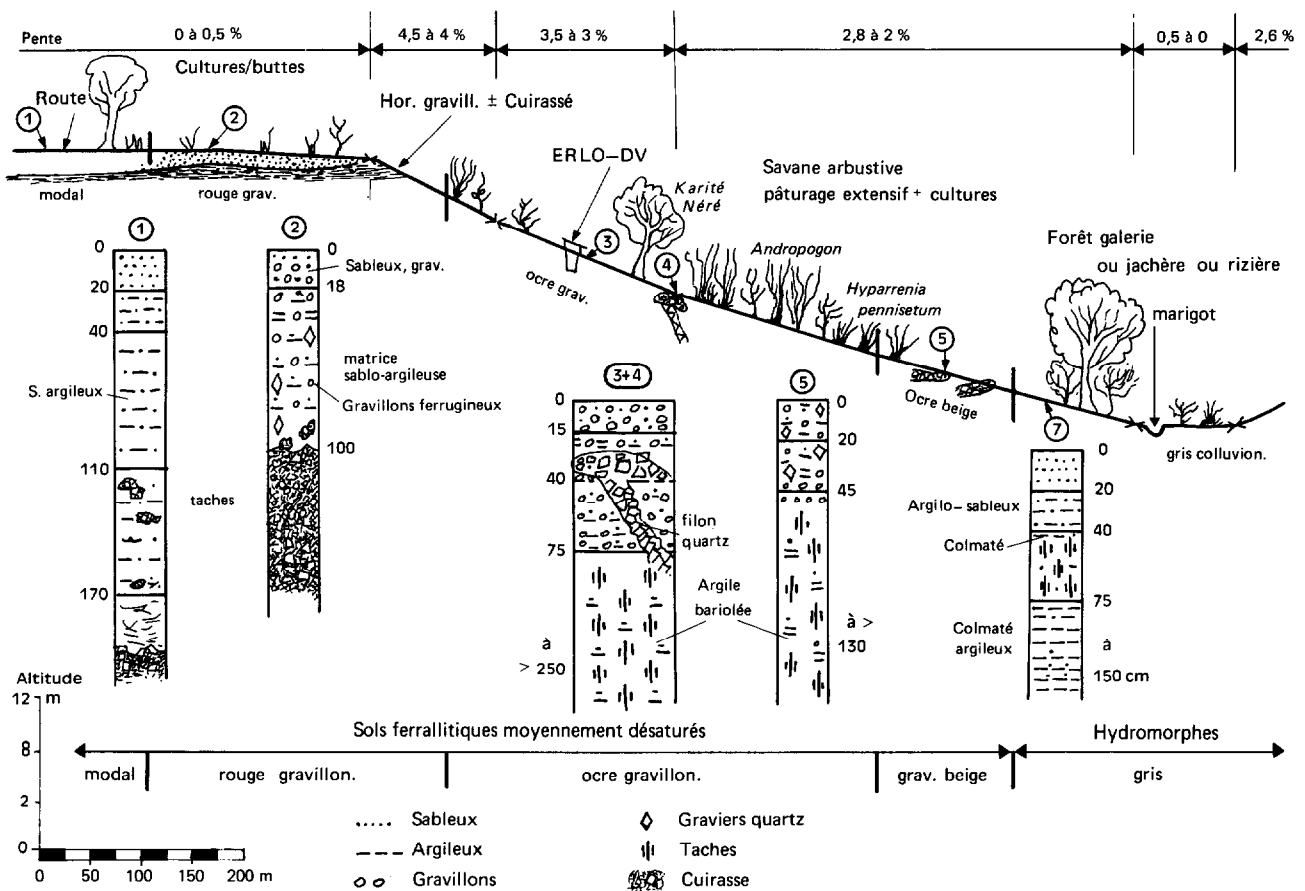


FIG. 2. — Schéma de la toposéquence « Case Erlo - DV » de Waraniéne (Korhogo : nord Côte d'Ivoire).

remontée de la nappe. La température annuelle moyenne est de 27 °C; les températures maximales diminuent de 36 °C en saison sèche à 29 °C en août. L'humidité de l'air varie de 80 % durant les pluies à moins de 50 % en saison sèche. L'E.T.P. (TURC) est de l'ordre de 1.620 mm/an; (1) elle passe de 6 mm/jour en saison sèche à 3,4 mm durant la saison des pluies. Le pouvoir évaporant de l'air reste donc élevé toute l'année.

**La toposéquence de Korhogo** est schématisée sur la figure 2 : nous nous bornerons à décrire brièvement le profil de sol ferrallitique ocre gravillonnaire observé près des parcelles ERLO et DV et de présenter au tableau les résultats analytiques (2). Le paysage comprend : un plateau tabulaire cuirassé (sols rouges profonds au centre et gravillonnaires ou cuirassés sur le pourtour), un long glacis concave dont la pente décroît de 4,5 à 2 % (sols rouges gravillonnaires sous la corniche, ocre à 100 m et beige à 400 m) et une petite plaine colluviale (sols gris hydromorphes) très cultivée où s'enfoncé à peine le marigot. L'ensemble de la toposéquence s'étend sur 1 à 1,5 km pour une dénivelée de 30 m : actuellement l'érosion en nappe, rigole et ravine, se manifeste assez vigoureusement dans les champs et là où se rassemblent les hommes ou le bétail (nombreuses pistes).

La surface du sol de la parcelle choisie se présente comme celle d'une vieille jachère qui n'a pas été cultivée depuis plus de 10 ans mais qui est parcourue par le bétail et exploitée par les villageois (paille pour les toits, bois de chauffe et termites pour la volaille). Le feu y passe chaque année entre décembre et mars; il maintient une végétation herbacée en touffes et quelques buissons d'espèces pyrophiles. Le sol est recouvert d'un mulch de gravier ou d'une pellicule de battance et présente une succession de petites dépressions reliées quelquefois par les sentiers qu'empruntent les animaux et les gens. Ces irrégularités ont une grande importance pour expliquer la faible charge solide des eaux du ruissellement.

Sous cette croûte se développe un mince horizon humifère (15 cm) brun gris (5YR-3/3) sableux contenant 20 à 70 % de petits nodules ferrugineux arrondis et quelques quartz  $\pm$  anguleux : sa structure est polyédrique fine mais peu développée. L'horizon est meuble, poreux et bien colonisé par les racines : les traces de l'activité biologique y sont abondantes. La limite est nette mais ondulée, et reflète encore probablement les techniques culturales d'un cycle antérieur (billonnage). Vient ensuite de 15 à 40 cm un

horizon brun rougeâtre (5YR-4/6) de pénétration de la matière organique, argilo-sableux gravillonnaire (30 à 60 %), à structure massive et débit polyédrique moyen moyennement développé. A la masse des petits gravillons roulés se mêlent quelques pseudo-concrétions brunes ( $\phi = 2$  à 3 cm) et quelques quartz saccharoïdes ou ferruginisés. L'horizon est plus cohérent, plus compact, mais on y trouve encore quelques racines fines et moyennes et quelques alvéoles tapissées de revêtements argileux. La limite est nette mais ondulante de 34 à 68 cm.

De 40 à 120 cm, apparaît un horizon d'argile rouge (5YR-4/6) tachetée de brun, ocre ou beige, argilo-limoneux, contenant encore quelques nodules ferrugineux ou quartzeux jusqu'à 80 cm. La structure est massive à débit polyédrique moyen bien développé. L'horizon est compact et collant mais traversé de mégapores (jusqu'à 10 mm de diamètre). On passe ensuite à un horizon d'argile bariolée rouge brunâtre (2,5YR-4/6) à traînées grises et blanches dont la fréquence augmente vers le bas du profil (120 cm à plus de 350 cm). La texture est argilo-limoneuse et la structure massive à débit polyédrique grossier bien développé. On observe de fines radicelles et des poches alvéolaires jusqu'en bas du profil. L'horizon est cohérent, compact, à faible macroporosité mais traversé de mégapores (0,5 à 1 cm) colonisés de radicelles et tapissés de revêtements argileux blanchâtres. De minces filons de quartz traversent tout le profil jusque vers 50 cm et s'étalent ensuite en un chapeau dissymétrique dont les éclats les plus grossiers sont déportés vers le bas de la toposéquence (voir profil 3, fig. 2). Aux alentours, les matériaux sont nettement plus sableux, plus cohérents et plus secs. Le sol est donc en place au moins jusqu'à la base de l'horizon gravillonnaire. D'après PERRAUD et CHEROUX (1963), ce niveau d'argile bariolée se prolonge en profondeur jusqu'à une arène sableuse et un granite migmatique leucocrate à grain fin vers 10 à 30 m de profondeur selon les sondages du BRGM. Le niveau de la nappe phréatique varie considérablement selon la position topographique et la saison : après les fortes averses d'août-septembre, elle peut remonter à moins de 2 m en bas de pente et 6 m à hauteur de la parcelle expérimentale.

D'après les résultats analytiques (tabl. I), les teneurs en matières organiques sont faibles en surface (1 à 2 % de M.O.) et diminuent très progressivement en profondeur (0,5 % vers 1 m). Le taux de carbone humifié atteint 15 à 30 % en surface. Le rapport acide fulvique/acide humique est voisin de 2

(1) ELDIN et FRANQUIN, communications personnelles en janvier 1979.

(2) Un rapport détaillé a été rédigé par l'auteur qui l'enverra à qui s'intéresse aux données de base.

TABLEAU I  
Fiche analytique du profil 3 case Erlo Waraniene (mars 1967)

HORIZONS	0	20	60	130	190	240
Profondeur mini (cm)	0	20	60	130	190	240
maxi (cm)	15	35	80	140	200	250
<b>GRANULOMÉTRIE</b>						
Argile %	15.5	44.6	52.7	32.3	26.7	24.1
Limon fin %	8.8	5.3	8.3	1.8	8.8	11.3
Limon grossier %	5.9	3.9	4.7	3.2	5.2	7.8
Sable fin %	23.2	11.5	8.1	11.7	18.0	24.4
Sable grossier %	45.4	33.9	25.3	50.8	41.0	32.3
Refus %	69.1	63.8	46.0	15.2	0	0
SF/SG %	0.51	0.34	0.32	0.23	0.44	0.76
<b>MATIÈRES ORGANIQUES <sup>0/00</sup></b>						
Carbone	15.93	9.71	2.86	1.19	1.11	1.03
Azote	0.86	0.62	0.39	0.29	0.26	0.22
C/N	18.5	15.6	7.4	4.1	4.3	4.6
Acides humiques	1.17	0.93				
fulviques	1.08	1.69				
Taux Carb. humifié %	14	27				
AF/AH	0.9	1.8				
<b>CATIONS ÉCHANGEABLES</b>						
Ca mé/100 g	2.31	1.01	0.86	0.64	0.55	1.11
Mg	2.53	0.88	0.48	0.46	0.44	0.48
K	0.18	0.06	0.04	0.11	0.08	0.02
Na	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.02
C.E.C.	8.81	8.30	7.72	6.77	7.00	7.06
Saturation %	57 %	24 %	19 %	19 %	16 %	23 %
pH eau	6,5	5,5	5,6	5,9	5,3	5,7
<b>ÉLÉMENTS TOTAUX (triacide)</b>						
Perte au feu %	8.66	10.55	11.98	12.61	11.81	11.21
Résidus insolubles	59.38	37.06	17.11	14.83	17.29	20.77
Silice combinée	13.52	23.58	31.98	31.85	30.43	31.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> combinée	12.55	22.33	30.48	30.61	30.19	28.86
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total	4.30	4.95	6.65	8.95	7.10	7.20
libre	1.54	1.54	1.65	1.64	1.63	1.65
TiO <sub>2</sub>	0.75	1.04	0.96	1.01	0.96	0.73
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total <sup>0/00</sup>	0.12	0.16	0.14	0.35	0.35	0.34
<b>Olsen</b>						
Ca en mé/100 g	3.38	1.57	1.03	0.67	0.67	1.25
Mg	5.95	8.67	5.92	3.83	2.50	3.92
K	0.85	1.32	1.00	0.70	0.60	0.58
Na	0.35	0.75	0.42	0.67	0.62	0.27
SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.83	1.79	1.78	1.76	1.71	1.83
<b>CARACTÈRES PHYSIQUES</b>						
pF - 2,5	15.34	18.64	24.88	24.51	25.32	25.33
- 2,7	12.18	16.89	22.67	21.64	22.05	21.94
- 3	11.92	13.93	21.67	21.26	21.52	21.01
- 4,2	4.65	7.59	10.26	7.63	7.07	6.83
Indice perméabilité K cm/h	3.18	18.8	10.00	5.9	6.5	5.2

dès 20 cm de profondeur et augmente rapidement. Les teneurs en azote (0,8 à 0,3 ‰) sont médiocres dès la surface. Le rapport C/N passe de 18-21 en surface à 7 vers 60 cm : il souligne la carence azotée fréquente sous savane brûlée chaque année. Le phosphore total est moyennement abondant (0,2 à 0,5 ‰) mais le phosphore assimilable (OLSEN) est très réduit. La capacité d'échange de cations (C.E.C.) diminue progressivement de 9 à 7 milliéquivalents par 100 g de terre fine. La C.E.C. de la fraction argileuse passe de 57 mé/100 g dans l'horizon humifère à 15 mé/100 g dans les horizons gravillonnaires et 26-30 mé/100 g dans l'argile bariolée : la kaolinite est donc mélangée à un autre type d'argile (probablement illite) et à un peu de gibbsite (car le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  reste inférieur à 1,6-1,8). Le taux de saturation en bases varie beaucoup en surface mais atteint 20 à 40 % dès 25 cm de profondeur. Le pH eau diminue de 5,5-6,5 dans l'horizon humifère à 5,1-4,5 en profondeur. Calcium et magnésium échangeables sont les mieux représentés (2,5 à 0,3 mé/100 g); par contre, le potassium échangeable est aussi peu abondant que le sodium (0,1 à 0,01 mé/100 g). Les réserves minérales sont faibles en calcium mais assez importantes en magnésium potassium et sodium. L'attaque triacide montre que les résidus quartzeux sont abondants en surface (60 %) puis diminuent rapidement dans la nappe d'argile tachetée (15-20 %). Inversement, la silice combinée et l'alumine passent de 12-14 % dans l'horizon humifère à 25-30 % dans l'argile tachetée. De même, le titane augmente de 0,7 à 1 %. Le manganèse est présent sous forme de traces (0,01 à 0,1 % de MnO). Selon les analyses, le fer total augmente de 4-10 % en surface à 7-9 % vers 120 cm pour rediminuer un peu au niveau de l'argile bariolée de blanc (hydromorphie temporaire). Le fer libre atteint 20 à 30 % du fer total de la terre fine.

**Les propriétés physiques** sont relativement peu favorables au développement des plantes. L'indice d'instabilité structurale (Is Henin) est moyen à médiocre en surface (1 à 1,5). Le sol est perméable ( $K = 3$  à 30 cm/heure) mais sensible à la battance, ce qui réduit considérablement l'infiltration en fin de saison des pluies sur cultures et jachères peu couvertes. Par contre, la charge gravillonnaire assure une bonne armature à la masse du sol qui reste poreux et résiste bien à l'érosion en nappe (formation d'un mulch de gravillons). La réserve hydrique est très faible dans un horizon gravillonnaire (moins de 1 mm d'eau par centimètre de sol) mais considérable dans les niveaux d'argile tachetée ou bariolée. Aussi observe-t-on que les graminées se dessèchent 1 à 2 mois après la dernière pluie utile tandis que les arbustes dont les racines plongent en profondeur peuvent rester verts toute l'année s'ils échappent aux feux. L'analyse granulométrique a mis en évidence la présence de pseudo-

particules, un appauvrissement en argile et limons fins sur 15 à 40 cm, un enrichissement en sables fins de la couche superficielle (5 cm) et un enrichissement en gravillons et en sables dans l'horizon humifère (15 cm).

A part la couche superficielle (0-2 cm) qui a été remaniée par les termites et du fait de l'érosion, nous n'avons pas d'indice montrant clairement que le niveau gravillonnaire est d'origine allochtone. L'observation des filonnets de quartz semble au contraire montrer que le sol a fondu sur place sans déplacement notable de matériaux. ESCHENBRENNER (12.2.72, communication orale) a cependant observé quelques petits gravillons noirs caractéristiques de haut glacis, au milieu des gravillons ocres typiques du moyen glacis et des pseudo-concrétions se ferruginisant actuellement. Une analyse plus fine du matériau le long de la toposéquence serait nécessaire pour trancher entre les deux interprétations, mais celle-ci sort de notre sujet. Il faut d'ailleurs noter une forte hétérogénéité du matériau à faible distance rendant difficile l'interprétation des résultats d'analyse des échantillons prélevés à des époques successives.

Ce type de sol est classé parmi les sols ferrallitiques moyennement désaturés, remaniés modaux sur granite, facies appauvri (AUBERT, SEGALEN, 1966, de BOISSEZON, 1969).

## LE DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

La description détaillée du dispositif expérimental a déjà fait l'objet de publications (ROOSE, 1968 et 1978; ROOSE, des Tureaux, 1970, ROOSE, 1979). Il se compose :

- (1) d'un pluviomètre standard et d'un pluviographe à auget basculant à mouvement journalier (PE3);
- (2) de deux bacs en plastique recueillant les eaux de pluies pour l'analyse, l'un au-dessous et l'autre en dessous du couvert herbacé (PKO et PKH);
- (3) d'une case de lessivage oblique (ERLO) de 5 x 50 m<sup>2</sup> de surface, sur pente de 3 %, sous végétation naturelle (savane arbustive dégradée), permettant de recueillir et mesurer l'érosion, le ruissellement et les eaux libres dans le sol vers 18 - 45 - 105 et 170 cm de profondeur;
- (4) de deux parcelles d'érosion (KE 1 et 2) traitées comme une jachère nue travaillée (= référence de WISCHMEIER), de 5 x 20 m<sup>2</sup> de surface, 2,9 % de pente et fonctionnant depuis août 1972; les cases ERLO et KE 2 ont servi de base pour deux séries de tests au simulateur de pluies après l'arrêt des observations sous pluie naturelle (avril 1976).
- (5) de quatre cases de drainage vertical (KDV 1 à 4)

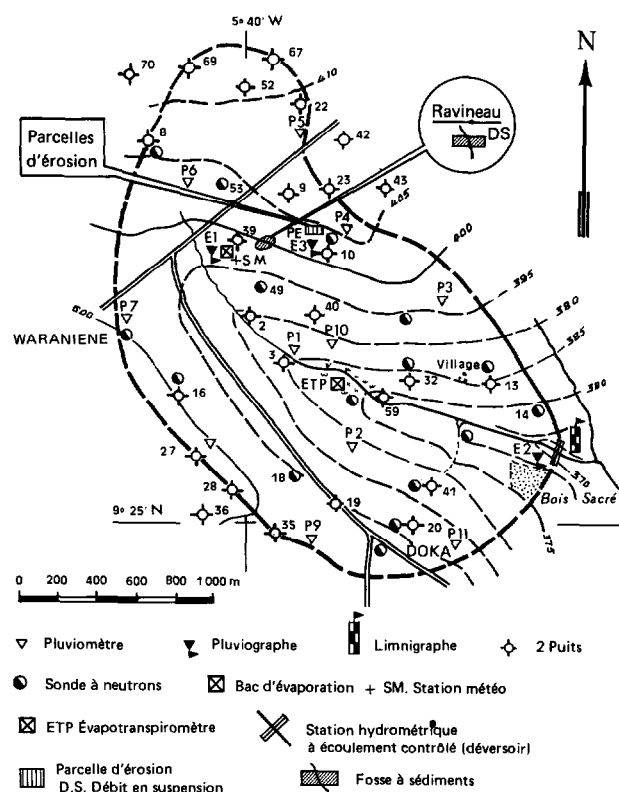


FIG. 3. — Bassin représentatif de Korhogo. Carte topographique et d'équipement.

sous savane herbacée (*Andropogon* et divers), monolithes cylindriques de sol non remanié de 63 cm de diamètre et 40 - 80 - 130 et 180 cm de profondeur (depuis août 1970);

(6) de quatre cases de drainage vertical (KDV 5 à 8) de même taille (63 cm de diamètre et 130 cm de profondeur) cultivés en maïs, et fertilisés de façon à compenser les exportations de 30 quintaux d'épis et 45 quintaux de paille, ou le double de cette dose 1 (depuis août 1972).

Dose 1 Azote 50 + 40 kg/ha/an en sulfate d'ammoniaque à 21 % de N

Phosphore 20 + 0 kg/ha/an en phosphate super triple à 45 % de  $P_2O_5$

Potassium 30 + 40 kg/ha/an en chlorure de potassium à 60 % de K

Calcium et Magnésium 30 kg/ha/an en dolomie à 35 % CaO et 20 % MgO

Dans une parcelle adjacente comprenant 11 rangs de 13 m le long espacés de 70 cm, cultivée et fertilisée de la même façon que les lysimètres, ont été mesurés les rendements de la culture et l'évolution des stocks de nutriments du sol.

(7) de huit parcelles de 4 m<sup>2</sup> sur lesquelles a été mesurée la productivité de la savane en 1973 et 1975.

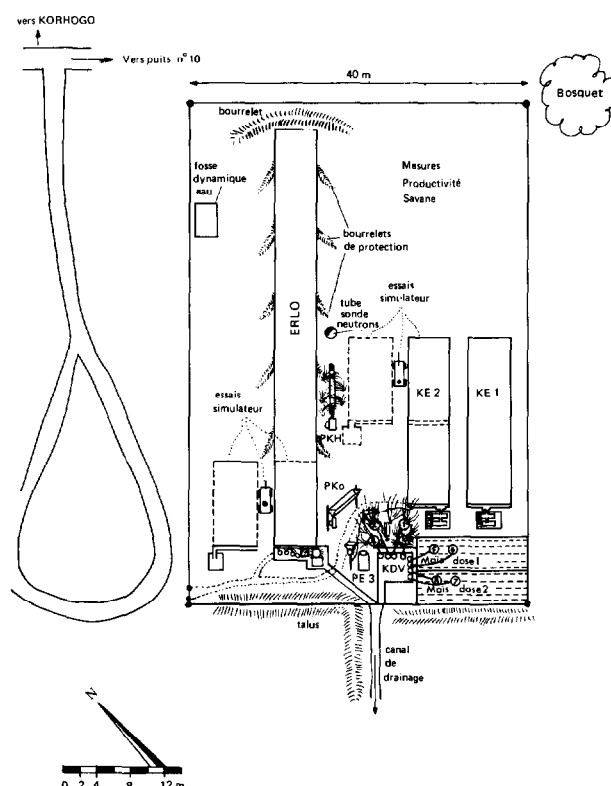


FIG. 4. — Schéma du dispositif de Waraniéne.

L'activité de la mésofaune a été estimée sur cinq parcelles de 1 m<sup>2</sup> en extrayant de la surface du sol tous les éléments arrondis, transportés ou digérés par la mésofaune (termites, fourmis, vers de terre, mille pattes, etc.). L'ensemble du dispositif énuméré est situé sur une parcelle de 40 x 60 m entourée d'une triple rangée de ronces de fer, à moins de 500 m du ravineau étudié par l'équipe de sédimentologues du professeur MANGIN et du parc météorologique des hydrologues de l'ORSTOM étudiant ce bassin représentatif depuis 1963. La figure 4 permet de situer le dispositif (P.E.) et le ravineau (S.M.) dans l'ensemble du bassin versant et par rapport aux villages de Waraniene et Doka.

### 3. LES RÉSULTATS CONCERNANT L'ÉROSION

Dans ce chapitre sont résumés les caractéristiques des pluies ainsi que le ruissellement et les transports solides observés à la surface du sol. Pour le détail des campagnes, le lecteur est invité à consulter le rapport de synthèse. (ROOSE, 1979).

### 3.1. Les précipitations

En moyenne, sur 29 ans (CAMUS *et al.*, 1976), il a plu à Korhogo 1.351 mm  $\pm$  86 par an, 1.004 mm en année décennale sèche et 1.698 mm en année décennale humide. Aux parcelles d'érosion (1967-75), les observations ont été effectuées pendant une année très humide (1969 : fréquence 1/10 à 1/20 ans), cinq années moyennes et trois années légèrement déficitaires (100 à 200 mm) par rapport à la normale. Trois

averses ont totalisé des hauteurs (103 à 123 mm) dont la fréquence de retour est de l'ordre de 5 à 10 ans, mais on n'a observé aucun événement très rare. Par contre, chaque année eurent lieu des séquences pluvieuses qui influencèrent les mouvements d'eau et de matières. Ces séries de pluies apparaissent à une époque (juillet à septembre) où les sols sont humides et la végétation bien couvrante; les bilans assez voisins d'une année à l'autre, montrent que le ruissellement et le drainage sont plus importants que l'érosion.

TABLEAU II

*Précipitations mensuelles et annuelles à la station ERLO de Korhogo comparées aux moyennes sur 29 ans du poste de Korhogo aviation. Précipitations maximales en 24 heures observées (ERLO 1967-75)*

	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
1967	0	13.2	70.5	145.1	142.5	115.5	210.5	258	283	96.7	0	31.7	1.367
1968	0	61.2	105.7	98	76.5	149	114.5	282.5	187.2	91.4	25	1.7	1.193
1969	0	40.5	89.5	34	93.5	192	421	331.5	202.5	161	157.5	0	1.723
1970	0	10.5	10.7	92.4	136	101.5	310.5	208.5	245.5	23.5	86.5	0	1.226
1971	0	34	77.5	56.5	141.5	67	176	330	286	46.5	2	35	1.252
1972	0	13	51	60.5	226	156.5	208.5	241	139.5	89.5	0	13.4	1.199
1973	0	0	18.5	133.5	142.5	89.5	294.5	336.5	178	42	5.5	0	1.241
1974	0	0	0	105.3	48	90	262.5	242	259.5	155	2.5	0	1.165
1975	0	0	77.5	88.5	123.6	57.5	235	220	301.5	44.5	7	0	1.155
Moyenne 29 ans	6	15	52	90	123	154	193	318	237	118	34	13	1.351
Pluie													
• jour max.	0	36	60	43	57	53	113	103	86	41	56	26	
RUSA													
• mens. moy.	0	7	23	35	74	45	178	139	114	22	19	2	658

De mars à novembre peuvent tomber des averses de plus de 40 mm en 24 h, mais les précipitations les plus agressives (hauteur, intensité x durée) ont lieu durant les trois mois les plus humides (juillet à septembre). Les intensités observées sont du même ordre de grandeur que celles publiées par CAMUS *et al.*, (1976) et par BRUNET-MORET (1967). Durant l'averse de fréquence annuelle, l'intensité maximale peut atteindre 120-150 mm/h pendant 5 mn, 75 mm/h pendant 30 mn, 50 mm/heure pendant 1 heure et 25 mm/h pendant 3 heures.

WISCHMEIER et SMITH (1958) ont défini empiriquement un indice d'agressivité climatique RUSA comme étant la somme des produits de l'énergie cinétique des

pluies unitaires, par leur intensité maximale en trente minutes. Calculé après le dépouillement de plus de 335 enregistrements pluviographiques d'averses de plus de 10 mm de hauteur (méthode CTFT, 1966), cet indice varie de 505 à 1.046 autour d'une moyenne de 658 unités pour des précipitations durant la même période de 1.280 mm. En moyenne, sur une longue période, il atteindrait 676 unités, valeur comparable à celles des climats les plus agressifs des USA.

L'indice d'érosivité des pluies de cette région soudanienne est nettement supérieur à celui qu'on trouve en zones méditerranéennes et sahéliennes (pourtant réputées agressives) mais moins élevé qu'en zone subéquatoriale où la hauteur et l'intensité sont plus fortes (voir fig. 1).



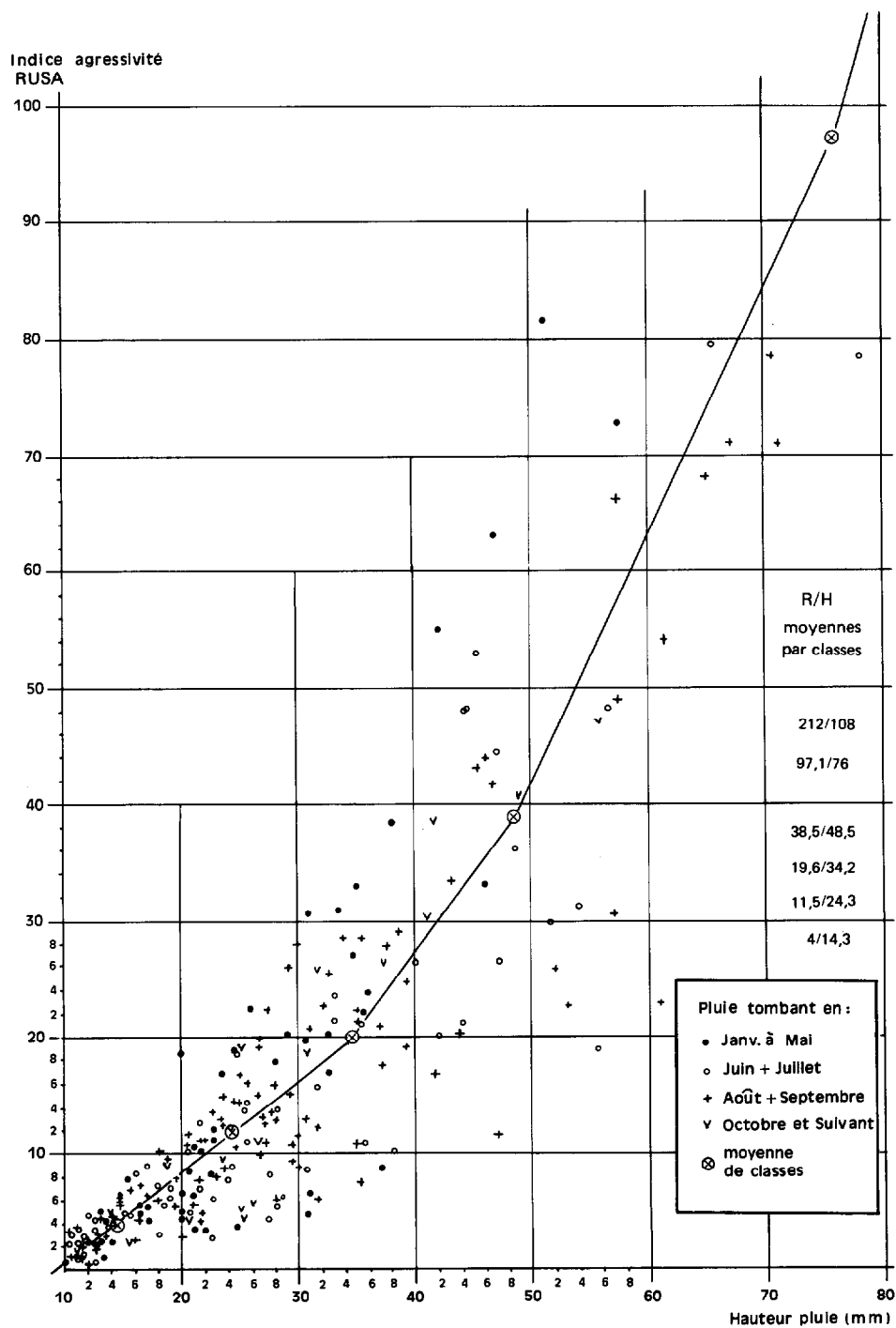


FIG. 5. — Relation Rusa = f (hauteur pluie unitaire) Korhogo 1967-75.

TABLEAU III  
Hauteur de pluie de fréquence décroissante comparée

	Nombre Années	Pluviosité Annuelle	Précipitation (mm/24 h) de retour							Sources
			1 an	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	
Korhogo	29	1.351	76	89	106	119	132	—	169	CAMUS <i>et al.</i> (1976)
Ouaga. V.	32	868	62	74	92	107	123	147	166	BRUNET MORET (1963)
Abidjan	28	2.124	135	—	200	230	—	—	(280)	BRUNET MORET (1967)

On peut observer au tableau IV, que les averses de forte intensité sont plus nombreuses en zone subéquatoriale qu'en zone soudanaise et a fortiori en zone soudanaise sahélienne.

TABLEAU IV  
Relations intensité x durée en zone subéquatoriale soudanaise et présahélienne

	Fréquence	Hauteur mm/jour	Intensité en				Sources
			10'	30'	60'	180'	
Ouaga	1 an	62	100	60	42	17	BRUNET MORET (1963)
	10 ans	107	140	80	58	28	
Korhogo	1 an	76	115	75	50	25	CAMUS <i>et al.</i> (1976)
	10 ans	119	155	106	73	34	
	100 ans	169	192	135	96	51	
Abidjan	1 an	135	126	92	66	30	BRUNET-MORET (1967)
	10 ans	230	204	130	102	42	

### 3.2. Le ruissellement

La lame d'eau ruisselée annuellement (R mm) a varié de 9 à 470 mm sur nos parcelles en fonction des traitements, ce qui montre bien l'influence de la couverture végétale, même dégradée, sur l'infiltration. Sur une même parcelle, par contre, le coefficient de ruissellement annuel moyen (KRAM %) a relativement peu changé sauf en 1975, année très sèche, et en 1969, année particulièrement pluvieuse : il oscille autour de KRAM = 3 % sous savane et dépasse 33 % sur sol nu travaillé. Quant au ruissellement maximum (KR MAX %) pour une averse, il atteint 28 % sous savane (exceptionnellement 52 % pour une averse de 68 mm tombant sur un sol déjà

gorgé d'eau le 22.7.69) et 75 à 90 % sur sol nu, bien que ce dernier se recouvre rapidement d'un mulch de gravillons. Sur parcelle et sur bassin versant, les plus forts ruissellements ont lieu en juillet, août et septembre, à une époque où le sol est très humide.

Sur l'ensemble du bassin versant de Korhogo (3,6 km<sup>2</sup>), le coefficient d'écoulement a oscillé autour de 40 % des précipitations, tandis que la fraction ruisselée (KRAM) varie de 1,5 à 9 % (en moyenne, 5 % des pluies). Rares sont les crues dont la fraction ruisselée (KR MAX) dépasse 15 % : une seule a atteint 40 % (CAMUS *et al.*, 1976). Si les caractéristiques du ruissellement sur le bassin sont assez semblables à celles de la case ERLO, cela ne veut pas dire que l'en-

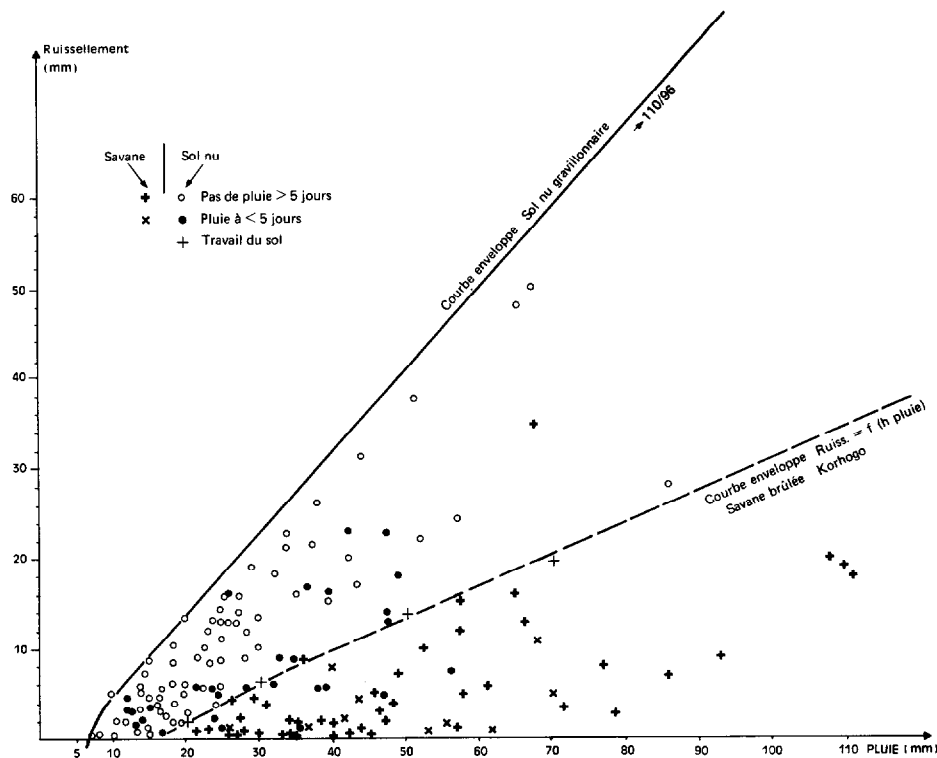


FIG. 6. — Lame ruisselée en fonction de la pluie (h mm). Korhogo 1967-75.

semble du bassin réagit comme cette petite parcelle : les bas-fonds saturés favorisent le ruissellement tandis que les zones récemment cultivées le réduisent.

Sur la figure 6, ont été définies deux courbes enveloppes du ruissellement en fonction de la hauteur des précipitations. Ces courbes signifient que le ruissellement dépasse rarement 80 % sur sol nu et 30 % sous savane dans les meilleures conditions de saturation du sol. Elles mettent en évidence l'influence sur le ruissellement du couvert végétal, du travail du sol et de son humidité préalable, de la hauteur et de l'intensité des averses. Il semble que dans les conditions de Korhogo, l'influence exercée par une pluie sur le ruissellement induit par la suivante s'estompe rapidement (3 à 5 jours). La hauteur de pluie nécessaire pour déclencher le ruissellement diminue de 20-35 mm en début de la saison humide à 7 mm au cœur de cette saison sur parcelle nue, et de 30-50 mm à 17 mm sous savane. Quant à l'intensité minimale pour déclencher une crue, elle serait de l'ordre de 18 mm/heure.

Le travail du sol augmente nettement l'infiltration, mais pendant une période limitée (1 à 3 semaines dans nos essais).

Sur les surfaces dénudées planes, l'érosion arrache les particules fines et les pluies battent un pavage de gravillons couvrant un matériau tassé et colmaté. Dans les champs d'ignames cultivés sur de hautes buttes, il n'y a pas de ruissellement pendant 2 à 4 mois, mais le fond des sillons finit par se colmater et donne naissance à des filets d'eau qui s'accumulent en bout de parcelles et finissent par creuser des rigoles et des ravines. Il en va de même là où le sol est tassé et peu couvert (jeunes jachères, sentiers et abords des villages) : les eaux ont tendance à se rassembler et à raviner le paysage.

### 3.3. L'érosion mécanique

Dans la parcelle sous savane dégradée, les transports solides à la surface du sol ont toujours été faibles (9 à 160 kg/ha/an), du même ordre de grandeur que sous forêt dense et les matériaux transportés sont essentiellement constitués de particules fines (S.E. moyen = 90 %) remontées par la mésofaune. La turbidité des eaux de ruissellement est modérée car, lors des fortes averses, la surface du sol est pro-

TABLEAU V  
*Précipitations, ruissellement et érosion observés sur les parcelles de Korhogo*

ANNÉES	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	MOY.
Pluie (mm)	1.367	1.193	1.723	1.226	1.252	1.199	1.241	1.164	1.155	1.280
RUSA	610	505	1.046	555	611	576	788	692	539	658
Savane brûlée										
Ruiss. : KRAM %	3,0	3,0	5,5	2,6	1,6	4,7	3,8	2,7	0,8	3,2
KR MAX %	19	21	27 (52)	28	9	25	19	16	8	28 (52)
Erosion kg/ha	129	141	160	109	9	137	109	42	22	95
Turbidité Moyenne g/l	232	382	168	275	45	237	232	135	62	209
S/E	75	96	99	79	100	97	100	100	26	90
						à partir du 1.8.72				
Sol nu travaillé										
KRAM % { <sup>1</sup>	—	—	—	—	—	(34,6)	35,4	40,8	23,3	33,6
{ <sub>2</sub>						33,8	35,0	38,2	24,3	33,0
KR MAX % { <sup>1</sup>						75	89	85	72	89
{ <sub>2</sub>						75	89	85	67	89
EROSION { <sup>1</sup>						(3.203)	9.441	4.215	3.300	5.652
kg/ha { <sub>2</sub>						(2.745)	9.146	3.212	3.240	5.199
Turbidité { <sup>1</sup>						239	304	128	138	186
mg/l { <sub>2</sub>						257	270	90	135	132
S/E						16 %	14 %	13 %	11 %	14 %

tégée de l'énergie des gouttes de pluie par des gravillons, par la savane herbacée et par les flaques d'eau qui se développent entre les touffes d'herbes (voir photo).

Sur les parcelles nues, l'érosion diminue de 9,4 à 3,3 t/ha/an de 1973 à 75 : une fois la terre fine déblayée, il ne reste qu'une couche gravillonnaire squelettique qui protège le sol contre les attaques ultérieures des pluies. L'érosion reprend à l'occasion des labours et des sarclages ; en dehors de ces périodes, les eaux sont peu chargées (T = 130 à 300 mg/l). Cependant, le ruissellement est si fort qu'il entraîne une forte proportion de terre grossière (86 %) et même des gravillons de 10 mm de diamètre par

traction plutôt qu'en suspension comme dans le cas d'érosion ravinante.

Si on considère les trois plus grosses averses des trois dernières années (récurrence 2 à 8 ans), on constate que sous savane une forte proportion des transports de matière (30 à 60 %) est attribuable aux averses rares, tandis que, sur sol nu, où les phénomènes d'érosion sont plus importants, la proportion attribuable à ces averses rares est modérée (6 à 28 % du total annuel). On pourrait en conclure que, sous savane et sur ces sols gravillonnaires, il faut de grosses averses capables de provoquer un ruissellement concentré pour déclencher l'érosion sous savane tandis que, sur des surfaces peu couvertes, c'est la

somme des énergies de toutes les pluies significatives qui détermine le niveau de l'érosion en nappe et rigoles.

Connaissant les pertes en terre ( $E$  en t/ha), l'érosivité des pluies ( $R$ ) et le facteur topographique ( $SL$ ) des parcelles nues de référence, il est aisé de calculer le coefficient d'érodibilité des sols ( $K$ ) de l'équation de WISCHMEIER et SMITH (1960) : il diminue de  $K = 0,022$  à  $0,011$  dès la troisième année. Ces valeurs, extrêmement faibles, de l'érodibilité de ces sols, plus faibles encore que l'estimation qu'on peut en faire avec les nomographes de WISCHMEIER *et al.* (1971) ou de DUMAS (1965), montrent que ces sols ocres gravillonnaires sont très résistants à l'érosion en nappe; il faudrait 2 à 8 siècles pour décaper les dix premiers centimètres du profil. En réalité, dans cette région, une érosion ravinante est active là où les eaux ruisselantes se concentrent dans les sillons, en bout de champs, sur les sentiers, les ravines et là où les hommes et le bétail se rassemblent; ces phénomènes doivent s'étudier en bassin versant.

Dans le tableau VI sont comparés le ruissellement et la dégradation spécifique (t/km<sup>2</sup>) de bassins-versants de taille variable (100 m<sup>2</sup> à 100.000 km<sup>2</sup>), sous végétation forestière ou savanicole, dans différents pays et sous divers climats (tropical, tempéré, froid). Dans la région savanicole de Korhogo, le ruissellement est voisin quelle que soit la taille du versant (parcelle de 200 m<sup>2</sup>, Loserigue 3,6 km<sup>2</sup> et Bandama 32.000 km<sup>2</sup>).

La dégradation spécifique, par contre, semble dix fois plus forte sur le petit bassin-versant que sur la parcelle ERLO et sur le fleuve Bandama : ceci ne peut s'expliquer que par la mise en culture de la savane et surtout par l'aménagement de rizières que nous avons observé dans les bas-fonds du Loserigue. Dans les régions forestières, le ruissellement semble plus faible que sous savane surtout lors des crues principales (KR MAX); il en va de même pour la dégradation spécifique, mais les différences entre forêt et savane sont plus faibles que les variations interannuelles. Par ailleurs, dans les parcelles ERLO sous forêt, on a observé des valeurs d'érosion nettement plus fortes tout au moins les premières années; en effet, les pentes (9-14 ‰) et les risques d'érosion artificielle le long des bordures sont plus forts sous forêt que sous savane. Au Cameroun, les valeurs de dégradation spécifique, sur des bassins de savane (17 à 90 t/km<sup>2</sup>) sont plus fortes, car les pentes y sont plus raides et le couvert plus dégradé qu'en Côte d'Ivoire. Nous n'avons pas d'information sur les bassins de Thaïlande pour permettre d'expliquer pourquoi l'érosion y est très active (36 à 318 t/km<sup>2</sup>). Il semble que plus les climats sont contrastés, plus la charge solide des rivières est élevée : sous climat tempéré océanique, la dégradation spécifique est donc la plus faible

(1,1 t/km<sup>2</sup>). D'après MONNET (1972), le Bandama, soumis à un régime tropical mixte et coulant en milieu d'une pénéplaine couverte de savane au nord et de forêts au sud, présente des dégradations spécifiques (6 à 16 t/km<sup>2</sup>/an) voisines de celles du fleuve Congo (9 t/km<sup>2</sup>), mais beaucoup plus faibles que celles du Mississipi (64 t/km<sup>2</sup>/an) et de l'Amazone (79 t/km<sup>2</sup>/an).

Aucun de ces résultats ne permet de tirer des conclusions générales sur l'influence de la taille du bassin-versant sur les phénomènes d'érosion. Cependant, si l'érosion en nappe est forcément limitée sur ces sols gravillonnaires, on peut craindre qu'une mise en culture sans précaution entraîne l'érosion très sélective des particules fines, la squelettisation plus poussée de l'horizon arable, et donc la diminution de la rétention en eau et en nutriments de ce type de sol dont la fertilité est déjà médiocre.

#### 4. ESSAI DE BILAN HYDRIQUE

En l'absence de données précises concernant l'évapotranspiration réelle, il s'agit ici de passer en revue les éléments dont nous disposons, puis de schématiser le bilan hydrique sous savane et sous culture de maïs en année moyenne décennale sèche ou humide, à partir des données mensuelles disponibles (pluie, ruissellement, ETP) et d'une estimation par excès de l'ETR.

##### 4.1. Les données d'observation

###### 4.1.1. LES PRÉCIPITATIONS

Nous disposons des observations journalières au poste ERLO de Korhogo de 1967 à 75 (voir ROOSE, 1979). Les précipitations mensuelles moyennes sont celles du poste ASECNA de Korhogo de 1945 à 73 (CAMUS *et al.*, 1976); selon le même auteur, les précipitations annuelles s'élèvent à 1.351 mm en moyenne, 1.004 mm en année décennale sèche et 1.698 mm en année décennale humide. Etant donné les variations possibles, nous choisirons les données réelles de l'année 1969 (1.723 mm) pour caractériser l'année humide et une année sèche théorique calculée à partir des précipitations de 1974.

###### 4.1.2. LE RUISSellement

Dans la zone dense de Korhogo, la brousse brûle pratiquement chaque année, le plus souvent vers la fin de l'année : nous retiendrons un KRAM de 3 ‰

TABLEAU VI

Comparaison du ruissellement (% des pluies annuelles et journalières) et de l'érosion sur des parcelles et des bassins-versants différents par la surface, le climat et les roches

Source	Surface B. V.	Climat	Végétation	Roche-Mine	RUISSÈLEMENT		Dégradation spécifique t/km <sup>2</sup>	Turbidité spécifique g/m <sup>2</sup>	
					KRAM %	KR MAX %			
<i>Côte d'Ivoire</i>									
Case Erlo Korhogo	1	250 m <sup>2</sup>	Tropical trans.						
Case Er Korhogo	1	100 m <sup>2</sup>	P = 1150.1720 mm	Savane dégr.	Granito Gneiss	1-5 (3 %)	(28 %)	1-16 (10)	210
Loserigie	2 + 6	3,63 km <sup>2</sup>	P = 1150.1720 mm	Sol nu	Granito Gneiss	33	75-90 %	324-940 (550)	160
Bandama/Duibo	2	32.200 km <sup>2</sup>	Trop. trans.	Savane	Granito Gneiss	1,5-9	25-40 %	103-182 (150)	
Nzi/Zienoa	2	33.150 km <sup>2</sup>	Equat. trans.	Sav. boisée	Granite			13-18 (15)	
Bandama/Tiassale	2	94.250 km <sup>2</sup>	Trop.(eq. trans.	Sav. + forêt	Schiste	CE = 2-14 %		11-14 (9)	
Amitioro	2 + 7	170 km <sup>2</sup>	Equ. trans.	Forêt dense	Granite — schist.	CE = 6-14		6-16 (11)	92
Ravineau	2 + 7	2 ha	Equ. trans.	Forêt dense	Schiste	CE = 2-9 %		3,3-13,4 (7)	178
Case Erlo Divo	1	250 m <sup>2</sup>	P = 1200.1950	Forêt dense	Schiste	(7)	40-48	2,5-8,6 (7)	188
Case Erlo Teke	1	250 m <sup>2</sup>	P01400.2050	Forêt dense	Granite	0,4-1,4 (0,5)	1-6 (5)	6-64 (13)	490
					Schiste	0,5-5 (2)	3-39 (14)	5-85 (15)	700
<i>Cameroun</i>									
Risso à S3	3	32,6	Trop. trans.	Savane arbust.	Granite	—	—	17	—
Djerem/Mbakao	»	20.400	»	Sav. arbust.	Metam. Erupt.	—	—	59	—
Mbam/Goura	»	42.300	»	Sav. + For	»	—	—	60-90	—
Sanaga/Nachtigal	»	77.000	»	»	»	—	—	30	—
<i>Thaïlande</i>									
Chao Phya	4	103.470	Tropical	—	—	—	—	106,4	373
Me Ping	»	42.300	»	—	—	—	—	35,9	154
Me Nan	»	25.491	»	—	—	—	—	127,7	195
Me Klong	»	25.466	»	—	—	—	—	317,8	305
<i>Divers</i>									
North Saskatchewan	5	119.000	Boréal Cont.	—	—	—	—	23	190
South	»	116.000	Steppique	—	—	—	—	44	260
Oder (Pologne)	»	109.400	Temp. océan.	—	—	—	—	1,2	9
Red (Canada)	»	116.000	Tempéré	—	—	—	—	11,1	93

Sources : 1. ROOSE et coll.; 2. MONNET, MATHIEU, LENOIR (1972); 3. NOUVELOT 1969, d'après MONNET; 4. FOURNIER, 1969 d'après MONNET; 5. MONNET 1972; 6. CAMUS et al. 1976; 7. BOULANGE, 1970.

( ) : Moyenne sur 3 à 10 valeurs.

comme valeur moyenne du ruissellement sous savane. Pour tenir compte de l'influence du couvert végétal déployé par la culture et du travail du sol, nous avons retenu un coefficient moyen de ruissellement de 20 %, nettement plus faible donc que celui observé sur sol nu.

#### 4.1.3. LE DRAINAGE OBLIQUE

Lorsque les eaux de pluie s'infiltrant dans le sol, elles rechargent la réserve hydrique du sol, puis drainent verticalement jusqu'à la nappe phréatique. Si elles rencontrent en chemin des horizons peu perméables, elles s'accumulent sous forme de nappe temporaire et localisée d'eau libre susceptible de s'écouler dans le sol vers les points bas du paysage et de pro-

voquer des transports de matières. C'est le drainage oblique que nous avons tenté d'évaluer et de recueillir dans une case ERLO située vers le premier tiers du glacis de la toposéquence de Korhogo (fig. 2).

On ignore si le drainage oblique est un phénomène continu tout au long d'un versant et comme aucun obstacle ne sépare la parcelle du sommet de la colline (350 m) on ne peut délimiter la zone concernée par le drainage oblique mesuré. Cet inconvénient est mineur dans le cas présent, car, même si on ne considère que la surface de la parcelle, le drainage oblique n'a qu'une importance secondaire par rapport au bilan de l'eau (0,4 % du bilan annuel au maximum et 2,7 % lors d'une forte averse de 58 mm tombant le 11/8/69 sur sol détrempe). Il ne s'agit pas de suintements au

TABLEAU VII

Drainage oblique annuel (litre/2 x 50 m) à la case ERLO de Korhogo

ANNÉES	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	MOYENNE
Précipitations (mm)	1.367	1.193	1.723	1.226	1.252	1.199	1.241	1.165	1.155	1.280
K 1 (0-18 cm)	27,12	30,70	400,12	81,10	138,51	185,80	136,40	112,05	33,40	127,24
K 2 (18-50 cm)	8,01	10,10	188,04	5,60	77,80	33,10	50,33	74,60	6,50	50,45
K 3 (50-100 cm)	20,00	2,30	74,77	9,05	51,96	15,20	25,60	29,75	34,80	29,27
K 4 (100-170 cm)	5,21	2,10	32,60	0,45	36,75	4,25	18,25	23,80	7,20	14,51
Total/170 cm	60,34	45,20	695,53	96,20	305,02	238,35	230,58	240,20	81,90	221,48
Coeff. Dr. Oblique										
K Moy. Annuel %	0,04	0,04	0,41	0,08	0,24	0,20	0,19	0,20	0,07	0,17
K Max. par pluie %	0,93	0,63	2,72	0,48	0,94	0,95	1,8	1,4	1,5	(2,7)

sommet d'une nappe phréatique, mais bien d'un lessivage oblique invoqué par de nombreux pédologues (on a recueilli près de 200 l/jour dans une tranchée de 2 m de large x 1,7 m de profondeur); cependant, il semble qu'ici comme dans nos autres stations (ROOSE, GODEFROY, 1977; ROOSE 1978), son ampleur soit très limitée en intensité encore qu'il intéresse une grande partie du versant. Comme les essais de dynamique de l'eau l'avaient suggéré (écrasement du cône d'infiltration), les écoulements obliques sont les plus forts dans l'horizon humifère, au-dessus de l'horizon ocre gravillonnaire tassé. L'analyse des facteurs liés aux manifestations de drainage oblique montre qu'il ne se manifeste que lorsque le sol est très humide (juillet à septembre) pour des pluies de plus de 30 mm de hauteur et 40 mm/h d'intensité pendant une demi-heure.

La dynamique principale de l'eau est donc verticale sauf en surface (ruissellement) et au niveau de la nappe phréatique (vers 6 à 14 m de profondeur).

#### 4.1.4. LE DRAINAGE VERTICAL MESURÉ EN LYSIMÈTRES

Dans le dispositif installé à Korhogo, la bordure des lysimètres dépasse largement le niveau du sol; les eaux recueillies au fond des cases DV correspondent au drainage lorsque le ruissellement s'annule. En soustrayant de cette valeur (appelée drainage brut), le ruissellement observé par ailleurs, on obtient une évaluation de la lame d'eau qui percole réellement dans le sol en place au-delà du niveau où est placé le fond du lysimètre.

D'après les résultats exposés au tableau VIII, le drainage vertical brut est considérable puisqu'il atteint 20 à 60 % des précipitations en année déficitaire et qu'il augmente en valeur absolue et relative avec la plu-

visité. Il diminue de 41 % en surface à 23 % dans le niveau d'argile bariolée, ce qui devrait avoir une incidence sur les risques de lessivage et de lixiviation de chaque horizon pédologique. On ne peut distinguer l'influence des doses d'engrais sous maïs, car les valeurs de drainage de l'un enveloppent celles de l'autre. Le drainage brut moyen au-delà de 1 m de profondeur est plus important sous maïs (545 mm) que sous savane (400 mm). Cependant, si l'on soustrait le ruissellement (3 % sous savane et 20 % sous maïs) de ce drainage brut, la situation s'inverse (DV corrigée = 369 mm sous savane et 307 mm sous maïs). Ceci peut paraître paradoxal puisqu'on sait qu'une savane bien couverte consomme généralement plus d'eau qu'une culture (AUDRY, 1967), et souligne l'importance des mesures de ruissellement dans l'établissement des bilans.

#### 4.1.5. L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

L'ETP mensuelle a été calculée par ELDIN et FRANQUIN selon la formule de TURC pour les postes de Ferkessedougou puis Korhogo de 1953 à 1976 (communications personnelles : janvier 1979).

Il apparaît au tableau IX que l'ETP annuelle est remarquablement stable à Korhogo quelles que soient les précipitations et que les variations mensuelles sont faibles (5 à 12 %) surtout en saison humide. L'ETP à Korhogo diminue de 6,5 mm/jour en saison sèche à 3,5 mm/jour au plus fort de la saison pluvieuse; elle reste donc élevée pendant les 4 mois au cours desquels on peut espérer du drainage, car les précipitations sont brèves et les températures élevées. Si l'ETP de Korhogo est voisine de celle de Ouagadougou durant la saison humide (juin à septembre), elle se rapproche plutôt de celle de Bouaké en saison sèche (en raison de

TABLEAU VIII

*Drainage vertical annuel brut (% des pluies) observé aux lysimètres de Korhogo (1972-75)*

	Pluie (mm)	Savane à Andropogon				Maïs dose 1		Maïs dose 2		Drainage brut retenu vers 100 cm	
		1 40 cm	2 80 cm	3 130 cm	4 180 cm	5 130 cm	6 130 cm	7 130 cm	8 130 cm	Savane	Maïs
1972	1.199	37,4	35,2	20,2	20,2	38,4*	55,5*	48,5*	42,9*	35	46
1973	1.241	58,3	35,2	20,4	28,1	60,5	55,0	50,6*	49,2	35,2	53,5
1974	1.165	35,7	32,4	34,4	21,8	52,9	51,8	43,6	39,4	32,4	47,7
1975	1.155	32,5	—	30,6	22,9	37,4	26,9	27,4	28,9	31,5	34,5
Moyenne											
• mm	1.190	491	412	313	277	481 mm		412 mm		400 mm	545 mm
• %	100 %	41,3	34,3	26,3	23,3	40,4 %		34,6 %		33,6 %	45,7 %

(\*) Valeurs estimées partiellement.

l'humidité de l'air et de la durée de manifestation de l'harmattan, vent sec soufflant du désert).

#### 4.1.6. L'ÉVOLUTION DU STOCK HYDRIQUE DU SOL

La différence de stock d'eau du sol lorsque le profil est à capacité au champ (ressuyé 48 h après irrigation) et lorsqu'il est desséché en fin de saison sèche, est une valeur importante à préciser pour calculer le bilan hydrique. Elle a été mesurée à plusieurs reprises à la sonde à neutrons sur le tube n° 10, sur la parcelle ERLO et dans les lysimètres par CAMUS et BOIS. D'après ces auteurs (communications personnelles en janvier 1979), les plus fortes variations d'humidité sont cantonnées dans l'horizon gravillonnaire (40 cm)

et le passage du front d'eau s'observe encore aisément vers 120 cm dans l'horizon d'argile tachetée. Les variations d'humidité s'annulent vers 180 cm dans la nappe d'argile bariolée dont la base resterait donc à une humidité voisine de la capacité au champ toute l'année.

Les variations du stock d'humidité (voir tabl. XIX, ROOSE 1979) s'élèvent à 18 mm dans le premier horizon, 53 mm sur les 50 premiers centimètres, 101 mm sur la tranche d'1 m et 151 mm sur 2 m. Toute cette réserve est rapidement épuisée; 1 à 2 mois après la dernière pluie utile, les herbes sèchent, mais les arbres dont les racines plongent plus profondément restent verts (tout en réduisant leur feuillage).

TABLEAU IX

*Evapotranspiration potentielle mensuelle selon la formule TURC comparée entre Abidjan et Ouagadougou*

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total Annuel
ETP moyen :													
Korhogo	164	157	154	143	146	129	116	107	116	141	138	132	1.643
St. déviation	±16	±19	±10	± 6	± 9	± 6	± 9	± 9	± 9	± 8	± 5	±17	
An. sèche = 1974	180	189	148	148	150	129	107	106	107	137	147	163	1.711
An. humide = 1969	150	140	157	141	157	131	126	118	118	131	138	136	1.643
ETP moyen :													
• Ouagadougou	187	188	216	178	155	136	129	116	126	149	165	160	1.905
• Bouaké	130	140	153	147	138	108	92	87	109	128	125	121	1.478
• Abidjan	105	113	128	121	113	77	79	77	81	108	113	105	1.220



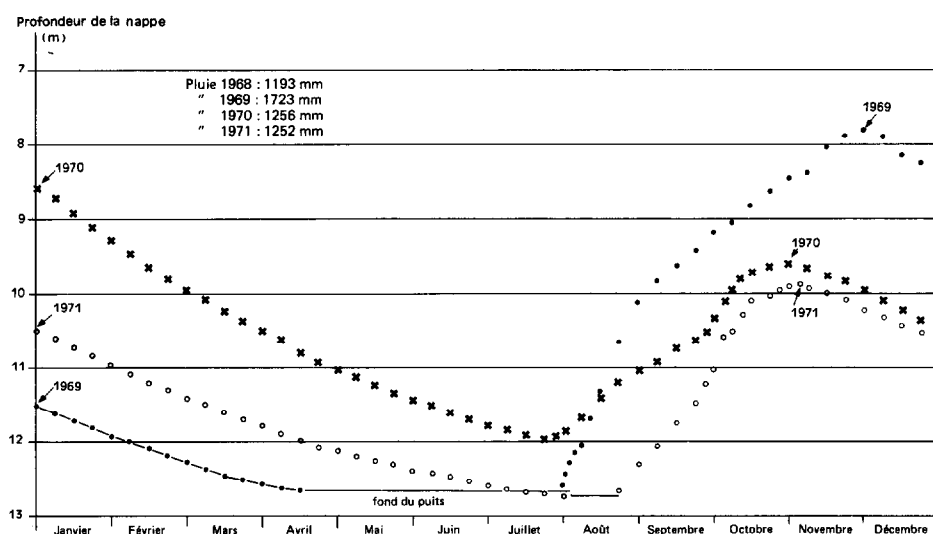


FIG. 7. — Evolution du niveau de la nappe au puits n° 10. Bassin de Korhogo, case Erlo, 1969-71.

#### 4.1.7. LES FLUCTUATIONS DU NIVEAU DE LA NAPPE

La nappe phréatique qui s'étend sur l'ensemble du bassin de Korhogo a été étudiée depuis plus de dix ans par le BRGM (1) puis par l'ORSTOM. Au puits n° 10, le plus proche de la case ERLO, le niveau de la nappe est au plus bas fin juillet (— 9 à — 13 m) et commence à remonter début août lorsque le stock d'eau du sol a été reconstitué. A ce niveau du versant, la montée se fait de façon massive sans qu'on puisse distinguer l'influence des pluies individuelles (voir fig. 7).

La nappe atteint son apogée (— 11 à — 6 m) entre le 5 octobre et le 26 novembre. Selon les années, les fluctuations de la nappe varient de 1,5 à 5,7 m autour d'une moyenne de 3,5 m. Ceci correspond à une lame d'eau percolée de l'ordre de 210 mm si on adopte une porosité utile de 6 %, valeur couramment observée

dans ce genre d'argile bariolée (LELONG, LEMOINE, 1968). Cette valeur est sensiblement inférieure au drainage observé dans les lysimètres ou calculé (voir paragr. 4.2) au niveau de l'argile bariolée (2 m) où les variations d'humidité du sol sont peu différentes des erreurs de mesure : il y a donc une certaine consommation d'eau dans les tranches profondes du sol (LELONG, 1966).

#### 4.1.8. BILANS HYDRIQUES ANNUELS D'APRÈS LES OBSERVATIONS DE TERRAIN SOUS SAVANE

Au tableau X apparaît le résumé des bilans hydriques annuels calculés à partir des observations mensuelles de pluie et de ruissellement à la parcelle ERLO et de l'ETP à Korhogo. (Voir tabl. 21 et 22 a et b du rapport). Le drainage brut est calculé par différence entre la pluie et la somme du ruissellement et

TABLEAU X

Moyenne des bilans hydriques observés sous savane arbustive (Korhogo 1967-75)

	Pluie	ETP	Variation stock hydrique	Ruiss.	ETR corrigé	Drainage corrigé
mm	1.280	1.660	150	41	981	258
%	100	130	12	3,2	76,6	20,2

(1) Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

de l'ETP. En saison sèche, il n'y a pas de drainage tant que la pluie est inférieure à (ETP + Ruiss.). En saison des pluies, ETR est voisin de ETP, et le drainage est égal à Pluie - (Ruiss. + ETP), aux variations d'humidité du sol près. Après l'arrêt des pluies, l'ETR n'est pas nulle, car les plantes puisent l'eau dans les réserves du sol (octobre et novembre); il faut donc ajouter à ETR la différence de stock d'eau du sol (humidité à capacité au champ — humidité du profil sec en fin de saison sèche) et la soustraire au drainage brut (avant de percoler, l'eau infiltrée doit ramener le profil à capacité au champ).

En moyenne sur 9 ans, 76 % des précipitations ont été évapotranspirés par la savane, tandis qu'un peu plus de 20 % ont percolé à travers tout le profil. En année très humide (P 1969 = 1.723 mm), le drainage dépasse 460 mm tandis qu'en année sèche (P < 1.200 mm) il atteint encore 100 à 250 mm selon l'organisation des séquences pluvieuses. Les horizons superficiels du sol subissent évidemment un plus grand nombre de passages du front d'eau libre que les horizons profonds. D'après les données lysimétriques, le drainage au-delà des horizons humifères dépasse 450 mm/an en moyenne; vers 1 m de profondeur, il n'est plus que d'environ 370 mm et, au-delà de 150 cm, il ne dépasse pas 260 mm. Contrairement à certains sols ferrugineux tropicaux (ROOSE, 1978a),

tous les horizons de ce sol ferrallitique sont soumis plusieurs fois par an au passage d'un front d'eau libre susceptible de chasser plus loin les dépôts temporaires d'éléments en solution ou pseudo-solution plus ou moins flocculés.

#### 4.2. Schémas de bilans hydriques calculés moyens et extrêmes

Les bilans hydriques évalués au paragraphe précédent ont été observés sur le terrain de 1967 à 1975 durant une année très humide et huit années légèrement déficitaires. Les différentes estimations du drainage au-delà de 2 m sont assez cohérentes (DV calcul (250 mm) = lysimètre (258 mm) < nappe (210 mm)) pour tenter de généraliser ces schémas de bilans à des conditions climatiques moyennes et décennales pour la région de Korhogo dans le cas d'une savane arbustive brûlée et d'une culture traditionnelle. Pour ce faire, nous avons procédé, mois par mois, à l'évaluation de chacun des termes de l'équation générale comme au paragraphe 4.1.8. Les résultats sont exposés au tableau XI.

Le drainage calculé à partir des moyennes mensuelles et non des valeurs réelles observées est forcément inférieur aux estimations précédentes, car les moyennes font disparaître les événements pluvieux

TABLEAU XI

*Schémas de bilans hydriques calculés en année moyenne et décennale sèche ou humide, sous savane et sous maïs*

		SAVANE ARBUSTIVE BRÛLÉE			CULTURE TRADITIONNELLE MAÏS		
		sèche	Années moyenne	humide	sèche	Années moyenne	humide
Précipitations	mm	1.004	1.353	1.723	1.004	1.353	1.723
ETP TURC	mm	1.751	1.660	1.643	1.751	1.660	1.643
	%	(174)	(123)	(95)	(174)	(123)	(95)
Ruiss.	mm	20	40,6	86,2	151	271	431
	%	(2)	(3)	(5)	(15)	(20)	(25)
ETR corr.	mm	828	1.064	1.169	702	876	979
	%	(82,5)	(78,7)	(67,8)	(70)	(64,8)	(56,8)
Drain corr.	mm	156	248	468	151	206	313
	%	(15,5)	(18,3)	(27,2)	(15)	(15,2)	(18,2)

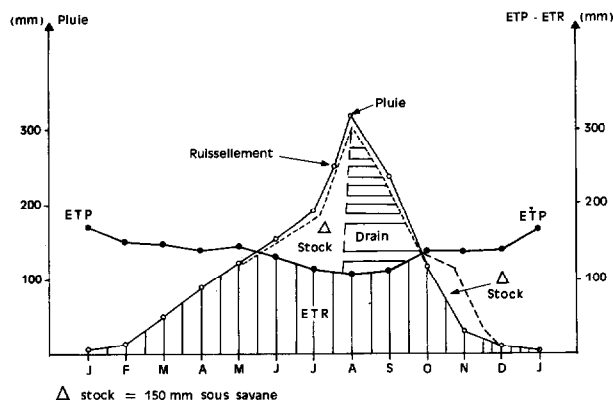


FIG. 8. — Schéma du bilan hydrique pour la région de Korhogo. Savane soudanienne. Pluie = Ruiss. + drain. + ETR ± Δ stock.

concentrés sur une courte période. Cependant la différence n'est finalement pas très grande (2 %) et ne change pas le sens des résultats. En moyenne, sous savane, on peut s'attendre à un drainage de l'ordre de 250 mm vers 2 m de profondeur, lame d'eau qui percolera jusqu'à la nappe sans grande perte ultérieure, puisque les niveaux d'argile bariolée profonds restent au voisinage de la capacité au champ toute l'année. Sous maïs, le drainage est nettement plus faible (206 mm) que sous savane, malgré des variations d'humidité du sol plus faibles (50 mm au lieu de 150 mm), le ruissellement étant beaucoup plus fort (20 % au lieu de 3 %).

D'une année sèche à une année humide (tabl. XI), les précipitations ont augmenté de 720 mm tandis que l'ETP diminue à peine (100 mm). Sous savane, 47 % de cette eau supplémentaire alimentent l'ETR, 44 % le drainage et à peine 9 % le ruissellement. Sous maïs, cette augmentation des précipitations concerne beaucoup moins l'ETR (39 %) et le drainage (22 %), et davantage le ruissellement (39 %). Mais si on intervient par un aménagement en vue de la conservation de l'eau (bonnes techniques culturales par exemple) pour diminuer de 5 % le ruissellement sous maïs, les 4/5<sup>e</sup> de la masse d'eau disponible disparaîtront sous forme de drainage et à peine 1/5<sup>e</sup> pourra améliorer la nutrition hydrique de cette culture (ETR). Pour rentabiliser les aménagements conservatoires de l'eau, il faut donc allonger le cycle cultural et intensifier l'exploitation en plantant dru et tôt.

## 5. SCHÉMA DE BILAN GÉOCHIMIQUE

Le sol étant considéré comme une « boîte noire », nous tenterons de chiffrer dans ce chapitre, ne fut-ce que grossièrement, l'importance des flux d'éléments

qui y entrent, ou en sortent, en vue d'établir un schéma de bilan géochimique sous savane arbustive soumise aux feux annuels précoces et sous une culture de maïs fertilisée. Nous discuterons successivement des apports par les engrais et les pluies, des eaux recueillies à différents niveaux, des pertes par érosion, drainage et exportation ainsi que des immobilisations dans le sol et les végétaux, avant de conclure sur le sens de ces bilans.

### 5.1. Les éléments du bilan

#### 5.1.1. LES APPORTS PAR LES ENGRAIS

Sur la culture de maïs fut apportée chaque année, en 2 ou 3 fractions, une fumure minérale correspondant à l'exportation de 30 quintaux d'épis et 45 quintaux de résidus de culture (tige + feuilles + spathes), soit 50 + 40 kg/ha/an d'azote (sulfate d'ammoniaque), 20 kg de phosphore (supertriple ou simple), 30 + 40 kg de potassium (chlorure de K), 30 kg de calcium et environ 15 kg/ha/an de magnésium (dolomie). Cette dose a été doublée sur la moitié des essais (= maïs dose 2).

#### 5.1.2. LES APPORTS PAR LES PLUIES

Des échantillons d'eau de pluie ont été récoltés régulièrement pendant 4 ans dans des bacs en toile plastique tendue au-dessus du couvert (PKO) ou entre les touffes d'herbes (PKH), bacs protégés des rejaillissements par un paillis recouvrant le sol. Les échantillons furent filtrés sur place (filtres plissés rapides) et stabilisés (ou non) à l'aide d'un bactéricide (aucune différence significative à l'analyse); les teneurs réunies au tableau XII reflètent les apports en éléments solubles de la pluie elle-même ou en éléments solubilisés des poussières qui ont pu couvrir les capteurs et le couvert végétal entre deux pluies.

Les teneurs moyennes observées par MONNET et MATHIEU (1970) sur le même bassin sont légèrement plus faibles que les nôtres, car ces auteurs ont nettoyé les bacs à l'eau distillée au début de chaque pluie : la différence donne donc des informations sur les éléments solubilisés des aérosols couvrant les capteurs entre deux pluies. Seuls les éléments observés dans les eaux de pluie recueillies au-dessus du couvert végétal constituent des apports réels au milieu; le pluviolessivage (PVL) n'est qu'un cycle interne au système « eau - sol - plante ».

Si on compare les résultats du tableau XII aux résultats semblables publiés antérieurement (ROOSE, 1974-78, VILLECOURT ROOSE, 1978), on constate que le pluviolessivage varie en fonction des éléments et du type de couvert. Sous forêt, le PVL est généralement

TABLEAU XII

*Teneurs moyennes (ppm) et apports (kg/ha/an) par les eaux de pluie à Korhogo*

	Ca	Mg	K	Na	M O	N total	N NH <sub>4</sub>	N NO <sub>3</sub>	PO <sub>4</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Cl	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	Résist. <sup>o</sup> . cm.
<b>Teneurs moyen.</b>																
- PKO (1)	1,9	0,1	0,3	0,15	1,1	0,9	0,26	0,48	0,30	0,13	0,07	0,7	0,3	1,0	4,8	69.000
- PKH (1)	2,4	0,4	1,3	0,2	3,8	1,1	0,10	0,21	0,38	0,12	0,07	1,4	0,8	1,7	6,2	54.000
- PKO MM (2)	<1	<0,1	<0,5	—	—	—	—	—	0,10	0,016	0,009	0,8	0,7	0,6	—	154.000
apport 1.350 mm de pluie	25,7	1,4	4,1	3,0	14,9	12,2	3,5	6,5	4,1	1,8	0,9	9,5	4,1	13,5	64,8	—

Sources : (1) ROOSE 1979. (2) MATHIEU 1972; MONNET, MATHIEU 1970.

plus marqué que sous savane, sauf pour la silice, très abondante dans les graminées. Le PVL est élevé pour le carbone, le magnésium et surtout le potassium (3 à 15 fois plus fort sous le couvert) : par contre, il est négligeable pour l'alumine, l'azote minéral et le sodium. Sous savane herbeuse, l'azote minéral des pluies aurait même tendance à être absorbé au niveau du feuillage des graminées. Si l'on compare les résultats des observations en fonction de la distance des stations à la mer (15 à 850 km), on constate qu'un groupe d'éléments présente des teneurs peu différentes d'une station à l'autre. (Ca, K, Carbone, PO<sub>4</sub>, fer, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>) : ils tirent leur origine des poussières continentales minérales ou organiques. Par contre, Na (1 à 0,1 ppm), Cl (3 à 0,3 ppm) et dans une moindre mesure Mg (0,5 - 0,1 ppm) et N total (1,7 - 0,6 ppm) diminuent dans les eaux de pluie lorsqu'on s'éloigne de la mer : les sels marins véhiculés par les embruns restent détectables à plus de 150 km à l'intérieur des terres. L'azote et le magnésium dépendent de la mer, mais aussi des formations forestières. En général, les eaux de pluie recueillies à Saria et Korhogo, en zone de savane dégradée par les feux sont plus pauvres qu'en zone forestière. Les apports par les pluies sont donc moins abondants qu'à Adiopodoumé (ROOSE 1978), mais pas tout à fait négligeables en ce qui concerne l'azote total (12,2 kg/ha/an), le calcium (26 kg), la silice (10 kg) et les bicarbonates (65 kg) qui constituent 78 % de la charge totale (145 kg de soluble) apportée par les pluies dans cette région.

### 5.1.3. COMPOSITION DES EAUX

En 9 ans, six cents échantillons d'eau ont été analysés au Laboratoire Central de l'ORSTOM à Adiopodoumé. Grâce à la diligence du Bureau des Données Pédologiques de l'ORSTOM à Bondy, tous les résultats (18 variables) ont été consignés sur fiches per-

forées et traités statistiquement. Nous ne présenterons ici qu'un bref commentaire sur les teneurs moyennes pondérées par les volumes écoulés ( $mp = S \frac{(x \cdot x \cdot v)}{S \cdot v}$ ) des eaux de pluies, de ruissellement, de drainage oblique et vertical sous savane et sous maïs (2 doses), ainsi que des eaux de source. Le lecteur pourra trouver dans le rapport de synthèse (ROOSE 1979) les résultats de l'analyse statistique. Les méthodes d'analyses ont été décrites par NALOVIC (1968) et par GOUZY (1973). Les délais d'analyse sont variables (1 à 3 mois) mais n'entraînent pas d'évolution notable des caractéristiques chimiques (sauf HCO<sub>3</sub>, les formes d'azote et les gaz dissous) à condition de respecter quelques règles simples (transport en flacons plastiques, pleins à ras bord, parfaitement bouchés et conservés à l'abri de la lumière et des fortes chaleurs).

#### 5.1.3.1. Evolution interannuelle des teneurs

En général, elles ne sont pas élevées ni systématiques, sauf dans le cas des eaux de drainage vertical sous maïs fertilisé (KDV 5 à 8) et pour les eaux de drainage oblique sous savane (K 1 à 4) pour lesquels la charge en silice, fer, alumine, SO<sub>4</sub>, Cl, Ca, Mg et Na est nettement plus élevée les deux premières années que les suivantes. Ceci pourrait s'expliquer du fait du changement de méthodes analytiques à l'occasion de l'automatisation progressive des analyses. Cette hypothèse, valable pour la silice, le fer et l'alumine (floculation partielle suite à l'acidification du milieu) ne l'est pas pour l'ensemble des résultats et en particulier pour la résistivité dont la méthode de mesure n'a pas changé. Il est donc possible que les équilibres « minéraux - eau - sol - plante » aient été perturbés les premières années par l'installation de la fosse de la case ERLO et par la mise en culture des cases DV sous maïs fertilisé et qu'il faille attendre 1-2 ans avant de retrouver un nouvel équilibre. Au tableau XIII,

TABLEAU XIII

Caractéristiques des eaux recueillies à Korhogo. Pluie, ruissellement, drainage vertical et oblique, source. 1967-75

		TENEURS MOYENNES PONDÉRÉES/VOLUMES (mp en mg/l)							VALEURS FRÉQU.	
		pluie air libre	pluie sous herbes	ruiss.	DRAINAGE hor. oblique	sup. vert.	DRAINAGE hor. inf. oblique	vert.	Source Dokaha	tous types d'eau confondus
T°	sav.	—	—	22,9	22,7	23,0	22,8	23,1	—	20 à 29
	cult.	—	—	22,9	dose 1	23,6	dose 2	23,9	—	
pH	sav.	6,0	6,2	6,9	6,6	6,8	7,0	6,9	6,1	5,5 à 7,8
	cult.	—	—	6,8	dose 1	6,6	dose 2	6,8	—	
RÉSIST.	sav.	68.900	54.000	46.900	35.800	28.100	16.300	30.100	44.600	10.000 à
	cult.	—	—	54.900	dose 1	18.000	dose 2	16.600	—	80.000
CA	sav.	—	—	2,1	2,6	2,6	6,2	2,1	—	0,8 à 3,7
	cult.	1,9	2,4	1,9	dose 1	3,6	dose 2	5,2	1,7	
Mg	sav.	1.	.4	.6	1,2	.6	3,0	.3	.4	0,1 à 2
	cult.	—	—	.2	dose 1	.6	dose 2	.6	—	
K	sav.	.3	1,3	1,33	3,2	.4	13,8	.3	1.	0,1 à 12
	cult.	—	—	0,70	dose 1	.7	dose 2	.3	—	
Na	sav.	.15	.20	.35	.53	.34	1,57	.22	1,80	0,1 à 10
	cult.	—	—	.13	dose 1	.43	dose 2	.48	—	
C	sav.	1,07	3,8	5,2	5,2	1,5	4,9	1,0	1,2	0,2 à 12
	cult.	—	—	1,4	dose 1	1,2	dose 2	1,1	—	
N tot.	sav.	.9	1,1	2,0	1,5	.9	3,4	.9	.8	0,1 à 8
	cult.	—	—	0,9	dose 1	2,0	dose 2	1,9	—	
N NO <sub>3</sub>	sav.	.48	.21	.20	.38	.12	1,96	.06	0,03	0,01 à 5
	cult.	—	—	.54	dose 1	0,94	dose 2	0,99	—	
N NH <sub>4</sub>	sav.	.26	.10	.13	.12	.16	.47	.09	0,09	0,01 à 1,4
	cult.	—	—	.16	dose 1	.37	dose 2	.18	—	
PO <sub>4</sub>	sav.	.30	.38	.74	.78	.36	1,47	.32	0,92	0,1 à 3
	cult.	—	—	.32	dose 1	.42	dose 2	.25	—	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	sav.	.13	.12	.30	.25	.13	.21	.14	0,14	0,01 à 2
	cult.	—	—	.09	dose 1	.35	dose 2	.44	—	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	sav.	.07	.07	.38	.98	.38	1,16	.10	0,16	0,01 à 3
	cult.	—	—	.11	dose 1	.22	dose 2	.48	—	
SiO <sub>2</sub>	sav.	.7	1,4	3,1	7,9	5,8	6,4	6,2	19,2	0,1 à 23
	cult.	—	—	1,8	dose 1	5,7	dose 2	6,1	—	
SO <sub>4</sub>	sav.	1	1,7	2,1	3,8	4,3	8,8	1,6	2,3	1 à 8
	cult.	—	—	2,4	dose 1	12,6	dose 2	10,8	—	
Cl	sav.	.3	.8	1,3	3,3	1,6	3,8	1,2	0,3	0,1 à 9
	cult.	—	—	.5	dose 1	2,5	dose 2	.7	—	
HCO <sub>3</sub>	sav.	4,8	6,2	9,2	9,6	20,9	(72,2)	20,2	—	4 à 30
	cult.	—	—	8,1	dose 1	14,2	dose 2	20,0	—	

Les teneurs sont exprimées en ppm ou mg/l, la température en degrés centigrades, la résistivité en ohms.cm.

on n'a tenu compte que des valeurs stabilisées; il faudra être très prudent lorsqu'on voudra comparer les résultats d'analyses d'eaux provenant des différentes stations et celles des auteurs cités, captées de différentes façons pendant des périodes plus ou moins brèves.

### 5.1.3.2. Evolution des teneurs en fonction des saisons et des volumes écoulés

Le rapport (mp/ma) des moyennes pondérées par le volume des écoulements et des moyennes arithmétiques a été calculé pour chaque élément et chaque type d'eau. Lorsque mp/ma est plus grand que 1, cela signifie qu'en général les teneurs augmentent avec le volume des écoulements; mp/ma < 1, veut dire que les éléments disponibles sont peu nombreux et vite dilués dans la masse des eaux qui circulent.

Pour les eaux de pluie, les résistivités ont tendance à diminuer — et les charges à augmenter — lorsque les écoulements sont forts; c'est l'inverse pour les autres types d'eau.

La potasse et l'azote (surtout l'azote nitrique) sont les éléments les plus sensibles à cet effet diluant des eaux qui circulent. Ensuite viennent les autres bases, les matières organiques, HCO<sub>3</sub> et SO<sub>4</sub>; le chlore, la silice et l'alumine changent peu en fonction du volume écoulé, tandis que le fer a tendance à augmenter avec les forts débits, (sans doute parce que ces forts débits n'ont lieu qu'à une époque où les sols sont engorgés et donc où la solubilisation du fer est facilitée par sa réduction). Les différences entre les moyennes s'écartent rarement de plus de 10 à 30 %, mais, si l'on considère les premiers écoulements, il n'est pas rare de trouver des teneurs 10 à 50 fois plus élevées qu'en fin de saison des pluies.

Aux phénomènes de dilution se superposent donc des variations saisonnières, observées dans toutes les stations et qu'on pourrait schématiser comme suit :

— les premiers écoulements sont peu abondants et très chargés; les eaux sont brunes et les matières minérales, accumulées durant la saison sèche, sont disponibles en grande quantité, si bien qu'on observe une explosion d'activité microbiologique lors des premières pluies;

— ensuite, la flore puise dans cette réserve facilement assimilable, tandis que les eaux de ruissellement et drainage délavent le sol. Il s'établit alors un nouvel équilibre entre les réserves peu disponibles, le stock d'éléments facilement solubles, les plantes et les eaux circulant dans le sol;

— en fin de saison des pluies, lorsque les écoulements diminuent, les eaux redeviennent un peu plus chargées.

### 5.1.3.3. Evolution de la charge en fonction du type d'eau et du niveau d'écoulement

Il apparaît au tableau XIII que les eaux étudiées

sont très peu chargées (résistivité : 70.000 à 15.000 ohms.cm), qu'elles se chargent au fur et à mesure qu'elles pénètrent dans la strate herbacée et surtout dans le sol, puis qu'elles se purifient, car, au niveau des sources, elles sont à peine plus chargées que dans le ruissellement à la surface du sol.

Elles sont légèrement acides (ph 5,5 à 7) et s'échauffent de quelques dixièmes de degrés à mesure qu'elles percolent dans le sol. Les teneurs en bases sont faibles et augmentent progressivement en profondeur; seules les teneurs en sodium augmentent jusque dans les eaux de source. Les eaux de pluie se chargent en carbone et azote au niveau de la végétation et de l'horizon humifère; puis les teneurs en matières organiques diminuent progressivement jusqu'à la source. Les phosphates sont peu abondants dans les eaux; celles-ci se chargent au contact avec l'horizon humifère. Leur tendance à diminuer dans les eaux de percolation profonde est moins nette que dans les autres stations.

Ce qui peut surprendre dans ce paysage cuirassé, ce sont les faibles teneurs en alumine et surtout en fer des eaux de percolation et de nappe. Dans les sols ferrallitiques, les eaux de drainage sont généralement bien oxygénées, si bien que la solubilisation de ces éléments est réduite, et leur migration est liée à celle des matières organiques et des argiles. Les teneurs en silice sont faibles dans les eaux de pluie (0,7 ppm), mais elles augmentent à mesure que celles-ci traversent la strate herbacée (1,4 ppm), entrent en contact avec le sol (2-3 ppm) et percolent à travers tout le profil (6 à 7 ppm) pour sortir au niveau des sources (19,2 ppm). Chlorures et sulfates sont peu abondants et augmentent légèrement à mesure que les eaux pénètrent dans les horizons superficiels du sol. A cause des délais d'analyse, très peu de déterminations de bicarbonate ont été effectuées : ceci est regrettable car ils forment une grosse partie de la charge soluble. Il sera heureusement possible de l'estimer par le calcul de la balance ionique.

Les eaux de drainage recueillies sous lysimètre sont moins chargées que celles qui proviennent de la case ERLO pour lesquelles le temps de contact avec le sol a probablement été plus long. L'application d'une dose raisonnable d'engrais minéraux (et même du double de cette dose) n'a pas entraîné d'évolution significative de la charge des eaux de drainage à part les teneurs en calcium, et surtout en sulfate, qui ont légèrement augmenté. Quant à l'azote total et nitrique, leurs teneurs progressent régulièrement chaque année et il faudrait plus de quatre années d'expérimentation pour tirer des conclusions valables à long terme. En milieu paysan, les risques de lixiviation sont limités car les engrais sont chers et utilisés parcimonieusement; par contre, en grande culture industrialisée, il faudrait tenir compte des dangers d'acidification du sol par abus d'engrais concentrés.

En général, les eaux de ruissellement sont moins

chargées que les eaux de drainage; quant aux eaux de source, elles sont plus riches en sodium et surtout en silice, mais plus pauvres en matières organiques (C et N) et en sulfates que les eaux de drainage.

Il semble que les eaux superficielles soient liées à l'évolution des matières organiques (production de litière, humification et minéralisation) tandis que les eaux profondes (source) seraient en équilibre thermodynamique avec le monde minéral qui les entoure (altération et néoformation) (TARDY, 1969, GARDNER 1970).

#### 5.1.3.4. Comparaison des eaux en fonction des stations

La charge des eaux superficielles observées depuis la forêt subéquatoriale jusqu'à la savane présaharienne n'est pas fondamentalement différente; tout au plus peut-on constater que les eaux de savane sont d'autant plus pauvres qu'elles circulent dans un milieu produisant moins de matières organiques, et que ces différences sont peut être un peu plus fortes dans les eaux de ruisselement (résistivité = 17 à 75.000 ohms.cm) que dans les eaux de drainage (résistivité = 16 à 32.000 ohms.cm).

Sans entrer dans le détail, notons que Na, Cl, C, N et Fe diminuent à mesure que l'on s'éloigne de l'océan et que le climat devient plus sec. Par contre, la silice des eaux de nappe augmente avec l'aridité du climat : 8 ppm à la source d'Adiopodoumé, 19,2 à la source de Korhogo et 36 ppm dans les eaux de nappe de Saria.

#### 5.1.4. LES PERTES EN ÉLÉMENTS SOLUBLES DANS LES EAUX DE DRAINAGE

Nous ne prendrons en considération que les teneurs moyennes pondérées réunies au tableau XIII et les volumes drainés en année moyenne pour caractériser des phénomènes moyens observables sous savane arbustive et sous culture de maïs (dose 1) dans la région de Korhogo.

Aux tableaux XIV et XV, colonne 6, il apparaît que les pertes par lixiviation dans les eaux de drainage ne sont pas négligeables vu le volume considérable de ce dernier. Sous savane, entraînement de 143 kg/ha/an d'éléments solubles dont 21 kg de potassium, 18 kg de silice, 16 kg de sulfate, 12 kg de carbone et de calcium, 6 kg d'azote et de magnésium. Sous maïs fertilisé à une dose égale à l'exportation, les pertes sont restées modestes : lixiviation de 93 kg/ha/an de solubles dont

TABLEAU XIV

Schéma de bilan géochimique d'une parcelle en savane arbustive brûlée sur un sol ferrallitique ocre gravillonnaire Korhogo : 1967-75

	APPORTS			PERTES			Total kg. ha/an	Soluble % de 8 5 + 6/8	STOCKS		CYCLES INTERNES		
	Pluie 1.350 mm	Engrais	Remontée biolog.	Erosion (solide) 100 kg/ha	Ruiss. (soluble)	Drain (soluble)			Végé- tation	Sol sur 30 cm	Litière 5 t/ha herbes	Remontée termites 5 t/ha/an	Pluvio- Lessivage
	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14
Carbone	14,9	0	P.M.	5.46	2.11	12.63	20.20	73	P.M.	22.280	2.600	99	P.M.
Azote	12,2	0	»	0.46	0.81	5.88	7.15	94	»	1.208	10	5,5	»
Phosphore	1,34	0	»	0.12	0.10	1.22	1.44	92	»	533 tot. 58 ass.	1,5		»
										échang-			
Calcium	25.7	0	P.M.	0.059	0.85	11.00	11.91	99	P.M.	466	15	5.1	P.M.
Magnésium	1.4	0	»	0.117	0.24	5.25	5.50	99	»	216	10	3.0	»
Potassium	4.1	0	»	0.176	0.54	21.25	21.97	99	»	173	15	8.6	»
Sodium	2.0	0	»	0.063	0.14	2.63	2.83	98	»	13	0.5	—	»
SiO <sub>2</sub>	9.5	0	P.M.	26.36	1.26	17.88	45.50	42	P.M.	762.000	50	600	P.M.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.9	0	»	22.45	0.15	2.68	25.28	11	»	729.000	5.0	545	»
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.8	0	»	6.34	0.12	0.58	7.04	10	»	315.800	3,7	215	»
SO <sub>4</sub>	13.5	0	P.M.	—	0.97	15.75	16.72	(100)	P.M.	?	7.5		P.M.
Cl	4.1	0	»	—	0.53	8.88	9.41	(100)	»	?	—		P.M.
CO <sub>2</sub> H	64.8	0	»	—	3.73	37.25	40.98	(100)	»	?	—		P.M.
Quartz	—	0	»	(38.5)	0	—	38.5	(0)	»	—	—	3.100	—
Total	173.2			100	11.55	142.88	254.43	61 %					

( ) estimations; P.M. pour mémoire.

30 kg de bicarbonate, 26 kg de sulfate, 12 kg de silice, 4 à 8 kg d'azote et de calcium, 1 à 2 kg de magnésium et potassium.

#### 5.1.5. LES PERTES PAR RUISSELLEMENT ET ÉROSION

L'érosion entraîne la migration de divers éléments en solution dans les eaux de ruissellement ou liés aux suspensions ou aux particules grossières tractées au fond. Aux tableaux XIV et XV, colonnes 4 et 5, sont reportées les pertes moyennes par érosion. Sous savane, les pertes totales par érosion sont très réduites (2,1 kg/ha/an de bases totales, 9 kg de C + N, moins de 60 kg de silice + fer + alumine). Les bases circulent en majorité sous forme soluble tandis que fer, alumine et silice sont associés aux terres érodées; carbone, azote et phosphore sont liés aux suspensions fines et aux solutions.

Sous maïs, les teneurs sont légèrement plus faibles, mais les volumes sont plus importants, si bien que les pertes par érosion ne sont plus négligeables : 11 kg de calcium et potassium, 3 à 5 kg de sodium et magnésium, 11 kg d'azote, 82 kg de carbone, 2 kg de phosphore et près de 2 tonnes de fer + alumine + silice combinée. Bases, carbone, azote, et phosphore

se retrouvent tant en solution qu'avec la terre érodée; par contre fer, alumine et silice migrent essentiellement sous forme solide. La mise en culture multiplie par 50 les pertes superficielles par érosion (majorité de quartz et kaolinite) sans changer sensiblement les pertes par lixiviation (du moins en 4 ans).

#### 5.1.6. IMMOBILISATION TEMPORAIRE DANS LA VÉGÉTATION

La végétation intervient à différents niveaux dans le bilan d'une parcelle :

- apport d'azote fixé par les microorganismes et remontées de matériaux puisés en profondeur par les racines;
- stockage dans les parties pérennes de la végétation;
- perte par exportation des récoltes (grains et pailles) ou par les feux de brousse;
- recyclage au niveau du feuillage (pluvio-lessivage), de la litière et de l'humus.

Nous ne disposons malheureusement que de quelques estimations de productivité de la savane (3 à 9 t/ha/an de matière sèche) et d'un champ de maïs modérément fertilisé (2 t/ha de grains et 5 t/ha de pailles), ainsi que de leur composition chimique.

TABLEAU XV

Schéma de bilan géochimique d'une parcelle en maïs fertilisé (dose normale) sur un sol ferrallitique ocre gravillonnaire Korhogo : 1967-75

	APPORTS			PERTES					STOCKS		CYCLES INTERNES			Pertes par exportation par les grains 20 q/ha
	Pluie	Engrais	Remontée biologique	Erosion (solide) 5.500 kg/ha	Ruissel. (soluble) 3.375 m <sup>3</sup>	Drainage (soluble) 2.100 m <sup>3</sup>	Total kg/ha/an 4 + 5 + 6	soluble % de 8 5 + 6/8	Végétation	Sol sur 30 cm	Litière 5 t/ha-paille de maïs	Remontée termites	Pluvio-Lessivage	
	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	13	14	7
Carbone	14.9	0	P.M.	64.09	17.55	2.52	(84.16)	24	0	22.280		?	P.M.	—
Azote	12.2	90	»	4.38	6.75	4.20	15.33	71	0	1.208	50	?	»	38
Phosphore	1.34	20	»	1.17	0.81	0.29	2.27	48	0	533 tot 58 ass	5	?	»	
										échang.				
Calcium	25.7	30	P.M.	3.96	7.09	7.56	18.61	79	0	466	10	?	P.M.	4
Magnésium	1.4	15	»	2.75	2.03	1.26	6.04	54	0	216	10	?	»	2
Potassium	4.1	70	»	6.51	4.49	1.47	12.47	48	0	173	45	?	»	9.6
Sodium	2.0	0	»	2.35	1.18	0.90	4.43	47	0	13	0.5	?	»	0.2
SiO <sub>2</sub>	9.5	—	P.M.	811.26	10.46	11.97	833.69	3	0	762.000	5.5	?	P.M.	1.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.9	—	»	754.06	1.28	0.46	755.80	0.2	0	729.000	9.0	?	»	0.2
Fe <sub>2</sub> P <sub>3</sub>	1.8	—	»	376.21	1.01	0.74	377.96	0.5	0	315.800	5.0	?	»	0.6
SO <sub>4</sub>	13.5	—	P.M.	—	8.10	26.46	(34.56)	(100)	0	?	3	?	P.M.	1
Cl	4.1	—	»	—	1.69	5.25	( 6.94)	(100)	0	?	?	?	»	—
CO <sub>3</sub> H	64.8	—	»	—	27.34	29.82	(57.16)	(100)	0	?	?	?	»	—
Quartz	—	—	»	(3473.26)	—	—	(3473.26)	0	0	—	—	?	»	—
Total	173.2			5.500	89.78	92.90	5682.68	3.2 %						

( ) estimations; P.M. pour mémoire.



Aux tableaux XIV et XV, colonnes 7 et 12, il apparaît que l'immobilisation dans les herbes de la savane est faible, sauf pour la silice (50 kg/ha/an), le potassium et le calcium (15 kg) et l'azote (10 kg), ce qui reflète bien la pauvreté du sol. Pour une production normale de maïs, il faut prévoir une immobilisation plus élevée : 90 kg/ha/an d'azote, 11 kg de phosphore, 50 kg de potasse, 15 kg de calcium et magnésium. Il est important de remarquer que les résidus de culture contiennent une bonne part de l'azote, du phosphore et des bases (surtout K) : leur exportation systématique ne peut qu'appauvrir le sol. Pour éviter des carences difficiles à corriger économiquement autant que pour protéger la réserve de matières organiques du sol (dont le rôle est de stocker l'eau et les nutriments), il est nécessaire de lui restituer le maximum de résidus de culture, sous une forme ou sous une autre (fumier).

Les feux de brousse entraînent une minéralisation brutale des matières végétales, mais dont l'intensité dépend du type de feu. Après un feu précoce et rapide, il peut rester 10 à 20 % de carbone, de l'azote et du soufre immobilisés dans les herbes. Les cendres sont partiellement dispersées par le vent et le ruissellement, mais une fraction profite à la végétation ; le pH du sol remonte après le passage du feu.

#### 5.1.7. STOCKAGE DANS LE SOL

Le sol contient en réserve quantité d'éléments plus ou moins mobilisables. A Korhogo, les réserves d'éléments totaux sont assez élevées, mais les éléments mobilisables comme le phosphore assimilable et le potassium échangeable couvrent à peine les besoins de trois cycles de maïs.

Après une savane brûlée annuellement, les sols sont presque toujours carencés en azote facilement minéralisable. La comparaison des stocks contenus dans les 30 premiers centimètres du sol après trois années de traitements radicalement différents (savane, sol nu, maïs fertilisé) est assez décevante d'après l'analyse d'échantillons composites (12 prises). C'est à peine si, sur sol nu, on constate une baisse sensible du taux de carbone, de phosphore assimilable et de calcium échangeable ; la jachère reste pauvre en azote et potassium échangeable. Sur maïs fortement fertilisé, on note des taux de carbone, phosphore assimilable, Ca et K échangeables parmi les moins faibles.

Si on compare les stocks d'éléments contenus dans les 30 premiers centimètres des sols sous végétation naturelle sous différents climats, il ressort que les sols forestiers sont plus riches en carbone et azote, mais que les sols de savane sont moins pauvres en bases échangeables et phosphore assimilable ; plus le climat est humide, plus la lixiviation est sensible sur les éléments mobilisables. (voir le rapport ROOSE, 1979).

#### 5.1.8. LES REMONTÉES BIOLOGIQUES

Nous ne reviendrons plus ici sur l'immobilisation par la flore d'éléments puisés en profondeur, mais nous aborderons certains aspects de l'activité de la mésofaune en rapport avec le sol. Entre Bouaké et Korhogo, la savane est parsemée de grandes termitières cathédrales dont on sait que les constructeurs puisent leurs matériaux en profondeur : elles sont rares dans la zone dense de Korhogo et absentes sur la parcelle étudiée. Mêmes les petites termitières y sont rares, car les Sénoufos exploitent les nids épigés pour nourrir leurs volailles, ce qui ne veut pas dire que l'action de la mésofaune soit bloquée par l'homme, mais elle est moins apparente qu'ailleurs. Pour nous en rendre compte, nous avons procédé sur cinq parcelles de 1 m<sup>2</sup> à un inventaire de toutes les particules de terre façonnées par le tube digestif de la mésofaune (termites, fourmis, vers de terre, mille pattes, etc.) enfin de saison des pluies. La masse de terre déplacée, ainsi estimée par défaut, a varié de 110 à 710 g/m<sup>2</sup>, ce qui représente en moyenne 5 t/ha de terre fine ramenée à la surface du sol : l'analyse de ces matériaux montre qu'il s'agit d'un mélange de résidus de la digestion de la litière et de terre fine prélevée en majorité dans les 30 cm supérieures du sol. On ne peut considérer ces matériaux comme un apport net à la surface du sol, mais plutôt comme un cycle interne au système « eau - sol - plante », qui recoupe les phénomènes de minéralisation de la litière. Ce cycle interne n'est pas négligeable sous savane car il concerne au minimum 99 kg/ha/an de carbone, 6 kg azote, 17 kg de bases totales, 600 kg de silice et alumine combinées, 215 kg de fer total et 3,1 t de résidus quartzeux.

Ce flux de matériaux fins alimente finalement l'érosion sélective qui ne laisse en place, après destruction des agrégats qu'un résidu grossier riche en grains de quartz.

#### 5.2. Schéma de bilan géochimique sous savane et sous maïs

Les données disponibles concernant les apports, les pertes, les stocks et certains cycles internes au système « eau - sol - plante » ont été réunis aux tableaux XIV et XV. Ces données sont encore incomplètes et grossières surtout en ce qui concerne les remontées biologiques et les pertes réelles par le feu : elles ne permettent pas un bilan géochimique précis mais indiquent l'orientation et l'ordre de grandeur de l'intervention des principaux facteurs de l'évolution actuelle du sol sous savane ou soumis à une culture fertilisée de maïs.

SOUS LA SAVANE ARBUSTIVE de Korhogo, les apports par les pluies et les remontées biologiques (litière + mésofaune) sont plus faibles que sous forêt dense humide mais les pertes par drainage y sont également faibles, si bien qu'au total le bilan semble équilibré à moins que le feu ne provoque la perte de l'ensemble des éléments contenus dans les 5 t/ha de paille. Comme dans les autres stations écologiques étudiées, les flux sont réduits sous le couvert naturel par rapport aux stocks. Si donc la savane est protégée des feux et du pâturage, on observe d'abord un enrichissement rapide de la végétation (développement des hautes herbes et de la strate arbusitive qui finit par coloniser toute la surface); l'augmentation de la production végétale (donc de la litière) entraîne une réduction sensible des pertes du système et une lente augmentation des réserves de nutriments des horizons superficiels. Inversement, la dégradation du milieu par les feux tardifs et le pâturage se marque plus vite sur la végétation que sur la réserve des nutriments contenus dans les horizons superficiels les plus exploités.

SOUS CULTURE, l'équilibre du bilan est rompu par l'augmentation des pertes par érosion et par exportation des récoltes; si l'on veut obtenir des rendements significatifs, il faut apporter des engrais, car la pluie ne fournit plus assez, ni assez vite, les éléments indispensables à une croissance harmonieuse. En effet, l'exportation de 20 q/ha de maïs, jointe aux pertes par érosion et drainage, suppose la fourniture de 53 kg/ha/an d'azote (la pluie n'en fournit que 12), 8 kg de phosphore et magnésium (contre 1,4 kg par les pluies) et 22 kg/ha de potasse (contre 4). Si en outre on exporte les pailles, le milieu s'appauvrit en azote (101 kg/ha/an) en phosphore (13 kg) et en bases (18 à 32 kg dont 10 kg de potassium) dont les réserves disponibles sont très limitées.

L'exploitation continue des sols exige donc un minimum d'apports minéraux, la restitution des matières organiques et un aménagement conservatoire de l'eau et des sols. S'il est facile de stabiliser les sols (naturellement résistants), il faut mettre au point un système de conservation de l'eau qui permette à la fois d'allonger le cycle (stockage en début et fin de saison) et d'éviter les risques d'engorgement et de ravinement en période trop humide. Comme il existe un antagonisme entre ruissellement et drainage, il sera difficile d'éviter les pertes en nutriments pendant les 3 mois les plus humides à moins d'intensifier la demande des végétaux (culture dense et hâtive), d'augmenter le pouvoir fixateur du sol (matières organiques) et de fractionner les apports en fonction des besoins physiologiques des plantes. Que ce soit au niveau du bilan de l'eau ou des nutriments, on retrouve les mêmes règles permettant d'espérer l'intensification de l'exploitation agricole.

L'analyse des pertes (colonne 9 tableaux XIV et

XV) montre que sous savane les bases, l'azote et les anions circulent sous forme soluble, tandis que la silice et surtout le fer et l'alumine migrent sous des formes associées aux particules solides. Sous maïs, les pertes en terre sont si élevées (5,5 t/ha) par rapport à la lixiviation (peu différente de celle de la savane) que ces règles, observées aussi bien sous forêt que sous savane présaharienne, sont masquées par l'érosion à la surface du sol.

## 6. TRANSFERTS DE MATIÈRE EN RELATION AVEC LA TEXTURE DU SOL

Dans les paragraphes précédents, nous avons montré que les pluies violentes de juillet à septembre peuvent entraîner des phénomènes importants de ruissellement, d'érosion et de drainage : il convient d'aborder ici l'impact de l'agressivité climatique et des redistributions de matières sur la texture du sol.

Comme on le constate souvent dans les sols tropicaux, le profil de la case ERLO de Korhogo présente en surface deux horizons appauvris en particules fines (A + LF = 7 à 17,5 %, compte tenu des refus) couvrant la nappe bariolée (A + LF = 33 à 35 %) sans qu'il soit possible de mettre en évidence un « ventre » dans la courbe texturale comme dans les sols lessivés classiques en région tempérée.

Plusieurs hypothèses peuvent être envisagées pour expliquer cette succession texturale :

(1) *Sédimentations successives au cours de phases morphogénétiques différentes.* Les résultats de cette étude ne permettent pas d'en discuter.

(2) *Destruction du réseau argileux en milieu acide* au contact avec l'humus. L'analyse a montré que si on trouve 3 à 8 ppm de  $\text{SiO}_2$  dans les eaux superficielles, l'alumine dissoute ne dépasse guère 1 ppm et ne s'accumule pas non plus à la surface du sol ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,6$  à 1,9). Par ailleurs, les eaux sont peu acides et leur charge en silice (19 kg dans le ruissellement et le drainage) proviendrait des apports par les pluies et les aérosols (9 kg), de la libération de la silice mobilisée par les végétaux (50 kg dans 5 t d'herbes) et sans doute aussi de la dissolution lente du quartz toujours très abondant et très corrodé dans toute la gamme de texture (voir lames minces).

(3) *L'érosion en nappe* évacuant sélectivement les particules fines de la surface du sol; divers agents d'homogénéisation transmettent en profondeur l'appauvrissement en fines qui en résulte.

(4) *Le lessivage oblique* des colloïdes de l'horizon A d'un profil situé vers le haut d'une toposéquence, leur transport à l'intérieur du sol et le colmatage des sols de bas de pente.

(5) *Le lessivage vertical avec dépôts diffus* tout au long d'un profil très profond. Les eaux se chargent en colloïdes à la surface du sol (battance des pluies) ou dans les premiers horizons (éluviaux); ces colloïdes pénètrent plus ou moins profondément dans le profil à l'occasion des averses successives et flocculent progressivement en fonction de leur taille et de leur composition. Ces dépôts plus ou moins temporaires pourraient se remettre à circuler lors de grosses averses à l'occasion desquelles les eaux d'infiltration nettoient les grandes voies de circulation. Quant aux colloïdes piégés dans les micropores du sol avec l'eau d'humectation, ils se déposent dans les canalicules les plus fins où ils forment des cutanes bien visibles en lame mince.

Nous proposons d'exposer ici les résultats concernant l'érosion sélective, l'activité de la mésofaune et la migration des colloïdes dans les eaux de drainage.

### 6.1. L'Erosion sélective

Les résultats d'analyse des terres érodées, de l'horizon superficiel et des terres remaniées par la mésofaune sont comparés dans le tableau XVI, (compte tenu d'un refus de 69 % dans le sol et de 41 % dans la terre de fond érodée sur sol nu). Sous savane, tous les éléments (sauf le quartz) sont plus concentrés dans la terre érodée que dans le sol en place (voir colonne 3); par exemple, l'argile, les limons fins et grossiers sont respectivement 12 fois, 10,4 et 1,2 fois plus importants dans les terres érodées que dans l'horizon superficiel alors que les sables et les gravillons s'accumulent à la surface du sol. Ces résultats confirment ceux que nous avons trouvés en basse Côte d'Ivoire et en Haute-Volta (ROOSE *et coll.*, 1968-73-77-78), mais il semble que sur ces sols gravillonnaires, l'érosion soit particulièrement sélective tant que la savane empêche le ruissellement en nappe d'accumuler assez d'énergie pour déplacer les gravillons.

Sur la parcelle nue, l'érosion est beaucoup plus forte mais moins sélective : le ruissellement est si intense qu'il se concentre en filets, creuse des rigoles et déplace pas mal de gravillons (41 % de refus, dont le diamètre peut dépasser 10 mm dans la terre de fond) (1).

Du point de vue de la pédogenèse, ces résultats signifient que si l'érosion décape localement l'horizon humifère (rigoles), elle évacue sélectivement des éléments liés à la fertilité (argile, matières organiques, nutriments) laissant sur place un mulch de sable et de gravier. Ce voile protégerait le sol de toute érosion

ultérieure si des agents d'homogénéisation ne mélangaient activement les horizons superficiels et ne rapportaient en surface des matériaux riches en particules fines.

### 6.2. Rôle de la mésofaune et du labour mécanique

Nous avons étudié sur d'autres stations l'activité des vers de terre et des termites (ROOSE 1976, 77 et 78). Sur la parcelle ERLO de Korhogo, l'activité de la mésofaune est plus discrète, mais nous avons tout de même observé entre 110 et 710 g/m<sup>2</sup> de terre sèche façonnée par cette faune soit en moyenne 5 t/ha. Les analyses rapportées aux colonnes 7 à 9 du tableau XVI montrent que cette terre remaniée est plus riche en argile et limons, en matières organiques et en nutriments que le sol en place. Cette terre provient du malaxage de débris végétaux et de terre fine prélevée entre les gravillons à faible profondeur (couleur grise ou brune, mais jamais rouge comme le sommet de la nappe d'argile bariolée). Nous avons montré ailleurs l'importance du rôle de cette faune sur l'évolution des matières organiques, sur la macroporosité et l'infiltration, ainsi que sur le développement des horizons appauvris en fines et lixiviés en bases. En résumé, elle fournit à l'érosion en nappe les particules fines que celle-ci peut exporter : après désintégration des agrégats sous l'impact des gouttes de pluie, il ne reste sur place qu'un matériau appauvri.

Sur les terres labourées, l'activité de la faune est très fortement ralentie, mais le labour remplit des fonctions voisines (mélange des horizons superficiels, augmentation de la macroporosité et de l'infiltration). Cependant, comme le labour mécanique se fait toujours à la même profondeur (à quelques centimètres près) et à l'aide d'engins de plus en plus lourds qui tassent le sous-sol, le contraste entre les horizons appauvris et les horizons profonds du sol se renforce.

### 6.3. Le Lessivage vertical et oblique

Les cases de drainage oblique et vertical ont été construites en remaniant le moins possible le sol en vue de mesurer les charges solubles et solides des eaux de drainage à différents niveaux du profil. Plus de 276 échantillons des différents types d'eau totalisant 2.123 l ont été prélevés à Korhogo. Après 1 à 2 mois de délai de transport, ils ont subi une série de manipulations pour séparer la charge colloïdale de la charge soluble et des pollutions. Les résultats demandent à être interprétés avec prudence, mais il est

(1) Les anomalies (dans le tableau XVI colonne 6) proviennent de l'hétérogénéité du sol (le refus varie de 30 à 69 %). En réalité, la surface de la parcelle nue est bien vite couverte d'un mulch de gravillons et les sables s'accumulent dans la matrice sous ce mulch protecteur.

Profondeur	0 cm	20 cm	45 cm	105 cm	170 cm	source
Teneur mpv (mg/l)	57	100	118	168	269	25
Volumes (mm)	1.300	400	380	310	260	?
Flux kg/ha	741 kg	400 kg	448 kg	521 kg	699 kg	?

possible d'en tirer quelques conclusions intéressantes à mettre en parallèle avec les observations sur les lames minces.

(1) La charge colloïdale varie généralement entre 10 et 300 mg/l. Elle diminue lorsque le volume des écoulements augmente, si bien que nous avons retenu les moyennes pondérées par les volumes (mpv) pour calculer les flux (par excès). Cette diminution sensible (20 à 50 %) de la charge colloïdale lorsque les volumes écoulés augmentent semble indiquer l'existence d'un stock limité de particules fines mobilisables (celles qui ont été abandonnées lors d'une averse précédente) et non une érosion de la matrice même des horizons du profil (laquelle est quasi infinie).

(2) La couleur des colloïdes floculés évolue du brun gris pour les échantillons de surface, au brun et jusqu'au blanc crème pour les échantillons recueillis en profondeur.

(3) La charge colloïdale des eaux diminue lorsque les eaux s'infiltrent (formation d'une pellicule de battance) puis augmente régulièrement à mesure qu'elles percolent plus profondément dans le sol. Les eaux de source sont encore opalescentes, mais moins chargées que les eaux de percolation : cela expliquerait le colmatage des sols hydromorphes de bas de pente. Cette augmentation des charges pourrait s'expliquer par la diminution des volumes d'eau qui percolent à travers chaque horizon.

En fait, les flux augmentent légèrement, mais systématiquement, et il faut faire intervenir des phénomènes cumulatifs tels que le drainage oblique. Cette hypothèse est confirmée par l'observation des lames minces de l'ensemble de la toposéquence. Sur ces lames minces, on n'observe pas de figure d'érosion ni de sédimentation dans les horizons humifères appauvris, mais les cutanes argileux et ferrugineux sont d'autant plus abondants et situés plus haut dans le profil qu'on s'éloigne du sommet de la toposéquence. La circulation de matière semble avoir été et être encore très importante dans les horizons qui montrent des indices d'hydromorphie temporaires en particulier dans les niveaux d'argile bariolée et dans les horizons compacts (N. FÉDOROFF, communication orale en février 1979).

L'interprétation de l'ensemble de ces résultats est donc bien différente de celles des sols lessivés clas-

siques en région tempérée : il n'y a pas de changement brutal des conditions physico-chimiques du milieu provoquant la floculation généralisée des colloïdes en un horizon bien défini (DUCHAUFOR, 1960). Les eaux se chargent en colloïdes en surface, pénètrent dans les grandes voies de circulation (macropores) et remplissent petit à petit les micropores. Lorsque le profil s'assèche, les pores se vident d'eau mais la charge colloïdale s'y dépose en couches successives. Lors de l'averse suivante, le front d'eau libre chasse les dépôts dans les gros pores et les pousse plus bas (donc l'eau libre que nous recueillons s'enrichit en colloïdes). Par contre, les micropores se remplissent progressivement et les argiles desséchées au fond des tubules (derniers retranchements de l'eau qui s'évapore) ne peuvent être chassées; les colloïdes s'accumulent donc en lits successifs de façon d'autant plus active que l'horizon est soumis à une alternance d'humectation et de dessiccation. D'autres schémas de migration et sédimentation peuvent coexister en particulier dans les zones d'hydromorphie où le fer peut migrer sous forme réduite et libérer l'argile.

#### 6.4. Vitesse actuelle de l'appauvrissement en particules fines

Sans vouloir préjuger du rôle des variations climatiques et des phases géomorphologiques, il nous a paru intéressant d'évaluer l'efficacité actuelle des moteurs de l'appauvrissement. En comparant la quantité de particules fines (A + LF) qui manquent dans les horizons appauvris (1.530 t/ha) aux pertes moyennes par érosion sélective (82 kg sous savane et 737 kg sous maïs) et par lessivage (380 et 307 kg/ha), on calcule qu'il faut un peu plus de 3.300 ans sous savane et 1.000 ans sous une culture de maïs pour atteindre, au rythme actuel, le stade actuel de l'appauvrissement. Ces chiffres ne sont que des ordres de grandeur qui soulignent le rôle actif du lessivage et de l'érosion sélective en milieu naturel ferrallitisant dès que le sol est découvert et mis en culture.

## 7. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Les principaux facteurs de la pédogenèse actuelle ont été observés à l'échelle de la parcelle à l'aide de divers dispositifs expérimentaux durant une longue

TABLEAU XVI

Sélectivité de l'érosion et des remontées biologiques par rapport au sol en place

Colonne	SAVANE			SOL NU			REMONTÉES BIOLOGIQUES		
	érosion	sol en place 0-15 cm	sélect. 1/2	érosion	sol en place 0-15 cm	sélect. 4/5	terre digérée par mésof.	sol en place 0-15 cm	coeff. sélect. 7/8
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C	54.6	4.94	11.1	9.02	4.94	1.8	19.62	4.94	4.0
N	4.6	0.27	17.0	0.64	0.27	2.4	1.04	0.27	3.8
P tot.	2.45	0.04	61.3	0.36	0.04	9.	0.42	0.04	10.5
P ass.	1.46	0.01	146.8	0.08	0.01	8.	0.07	0.01	7.
Ca échang.	2.26	0.72	3.1	1.38	0.72	1.9	3.79	0.72	5.3
Mg mé/100 g	0.92	0.78	1.2	0.31	0.78	0.4	2.49	0.78	3.2
K	0.35	0.06	5.8	0.10	0.06	1.7	0.51	0.06	8.5
Na	0.25	0.01	25.	0.016	0.01	1.6	0.01	0.01	1.
Ca total	3.20	1.05	3.0	2.22	1.05	2.1	4.33	1.05	4.1
Mg mé/100 g	9.62	1.84	5.2	3.12	1.84	1.7	4.75	1.84	2.6
K	4.52	0.26	17.4	2.18	0.26	8.4	4.15	0.26	16.0
Na	2.75	0.11	25.	1.28	0.11	11.6	1.18	0.11	10.7
SiO <sub>2</sub> comb. %	26.35	4.19	6.3	10.39	4.19	2.5	12.9	4.19	3.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> comb. %	22.45	3.89	5.8	9.63	3.89	2.5	11.2	3.89	2.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tot. comb. %	6.94	1.33	4.8	4.64	1.33	3.5	4.0	1.33	3.
• Argile	59.0	4.9	12.0	14.1	4.9	2.98	20.3	4.9	4.1
Limon fin	30.3	2.7	10.4	6.9	2.7	2.66	14.3	2.7	5.3
Limon gros.	2.2	1.9	1.2	2.1	1.8	1.2	11.6	1.8	6.4
Sable fin	4.4	7.3	0.6	9.8	7.3	1.3	37.7	7.3	5.1
Sable gros.	4.1	14.3	0.3	32.2	14.3	2.2	16.1	14.3	1.1
Refus	0	69	—	34.9	69.0	0.5	0	69.0	—
	100	100		100	100		100	100	

Note : Afin d'estimer la sélectivité de l'érosion on a tenu compte des refus pour pondérer les teneurs observées à l'analyse de la terre fine. Par contre on a négligé les pertes solubles dans le ruissellement : en réalité la sélectivité de l'érosion est encore plus forte.

période couvrant une année très humide et huit années normales ou légèrement déficitaires. Aucun événement très rare (moins que décennal) n'est intervenu mais les mouvements de matière sont surtout liés aux séquences pluvieuses concentrées de juillet à septembre (200 à 500 mm/mois) à une époque où les sols sont déjà très humides et bien protégés par la végétation naturelle.

Dans la zone dense de Korhogo, la forêt sèche en équilibre avec le climat a été détruite par les feux annuels, le pâturage et la culture itinérante. Elle a laissé la place à une savane arbustive soudanienne sous laquelle l'érosion en nappe (10 à 160 kg/ha/an) est modérée et le ruissellement (1 à 5 % des pluies

annuelles) à peine supérieur à celui qu'on observe sous forêt dense. Malgré une évapo-transpiration potentielle élevée toute l'année, le drainage est important (150 à 470 mm/an) à cause de la concentration des pluies sur 3 mois : le profil est parcouru plusieurs fois par an par le front d'humectation et la nappe phréatique est bien alimentée chaque année. Le bilan géochimique est à peu près équilibré dans le milieu naturel pourvu que les pertes par les feux ne soient pas trop fréquentes. Comme dans les autres stations, les flux sont nettement plus faibles que les stocks, encore faut-il distinguer les stocks d'éléments assimilables par les plantes (en particulier le phosphore, le potassium et probablement l'azote mobilisables) qui sont

limités dans ces sols de savane. La protection du milieu entraîne une amélioration rapide du couvert végétal (les hautes herbes et les arbustes envahissent le paysage) et un enrichissement beaucoup plus lent des horizons humifères. Inversement, le surpâturage et les feux de brousse trop fréquents dégradent rapidement la végétation, provoquent le tassement du sol et le développement de l'érosion avant d'entamer nettement le stock de nutriments du sol.

Les eaux superficielles prélevées dans la savane soudanaise de Korhogo ont une composition qui n'est pas fondamentalement différente de celle des eaux recueillies dans les savanes présahariennes et sous les forêts denses humides : les différences proviennent des apports par les pluies qui diminuent avec l'éloignement de l'océan (surtout Na et Cl). La charge soluble des eaux de ruissellement et de drainage semble dépendre surtout de la dynamique des matières organiques vivantes ou mortes tandis que celle des eaux de nappe qui ont un temps de contact plus long avec la roche altérée serait plutôt en relation avec les minéraux qui s'y forment.

Dès que les sols sont dénudés et cultivés, les phénomènes d'érosion se développent considérablement. L'érosion en nappe est encore relativement modérée (3 à 9 t/ha/an) à cause de la protection offerte par les gravillons, mais elle est très sélective. Le ruissellement atteint 20 à 40 % de pluies annuelles : il se concentre en filets suffisamment puissants pour dégager les gravillons et creuser des rigoles et des ravines en particulier à l'extrémité des champs billonnés. Le drainage est légèrement plus faible que sous savane, mais le bilan géochimique est déséquilibré par l'augmentation des pertes par érosion et par l'exportation des récoltes (grains et pailles).

L'appauvrissement en particules fines que l'on observe dans les horizons superficiels de nombreux sols tropicaux est la résultante des phénomènes d'érosion sélective couplés à l'activité de l'homme ou de la mésofaune, du lessivage avec dépôts diffus et de la destruction des argiles. Ces processus interviennent simultanément mais à des vitesses différentes selon les conditions écologiques (climat et couvert végétal).

Sous végétation naturelle et dans les sols ferrallitiques observés, le lessivage prend une part importante. Par contre, dans certains sols ferrugineux où le ruissellement est abondant, et chaque fois qu'intervient la culture, l'érosion en nappe couplée à l'intervention d'un agent d'homogénéisation accélère l'appauvrissement qui devient, de loin, le mécanisme prépondérant de l'évolution.

Dans les conditions écologiques étudiées (Pluie = 700 à 2.100 mm), la destruction des argiles peut exister mais son ampleur est faible. La silice en solution dans les eaux de surface provient des pluies, de la mobilisation de la silice contenue dans les végétaux et de la dissolution du quartz toujours très abondant dans

toute la gamme des textures. Ces résultats sont voisins de ceux que FAUCK a présentés dans sa thèse sur les sols rouges des zones climatiques très proches de Korhogo (1972).

Sous le climat soudanais caractérisé par une longue saison sèche et quatre mois de pluies intenses, la pédogenèse actuelle de ce type de sol semble très active, et intermédiaire entre celle que nous avons observée sur les sols ferrallitiques très désaturés de la zone forestière ivoirienne et sur les sols ferrugineux des savanes présahariennes voltaïques. Elle est marquée par un fort appauvrissement en particules fines des horizons superficiels, un potentiel élevé de lixiviation des solubles, mais aussi par le colmatage et la rubéfaction du sommet de l'argile tachetée.

Le lessivage des colloïdes et la lixiviation des bases ne sont pas aussi poussés qu'en zone subéquatoriale où il tombe couramment plus de 1.000 mm de pluie en six semaines. Par contre la dynamique du fer et de l'argile dans l'horizon compact est bien marquée par l'alternance de périodes très humides (migration) et de périodes sèches (sédimentation). De même l'érosion sélective particulièrement active sur les sols ferrugineux peu perméables et peu pentus est ici favorisée par la présence de gravillons ferrugineux abondants dès la surface du sol. Quant à la dynamique des matières organiques, elle est gouvernée par le type de formation végétale (savane), par les contrastes climatiques et par les feux de brousse annuels qui minéralisent brutalement la plus grande part des matières végétales formées.

Ce type de sol gravillonnaire présente un milieu assez défavorable au développement des plantes cultivées : les horizons superficiels sont tassés et leurs réserves hydriques, organiques et minérales sont médiocres. Leur mise en valeur exige donc des travaux culturaux profonds, un minimum d'apports minéraux, la restitution du maximum de matières organiques et un aménagement conservatoire élémentaire. Sur le plan chimique, ces sols de savane sont généralement carencés en azote et phosphore. Cependant, il ne faut pas attendre la manifestation de carences en bases pour équilibrer la fumure. Azote et potasse sont facilement lixiviés, il faut donc les fractionner en fonction des besoins physiologiques des plantes. L'usage répété d'engrais concentrés entraîne l'acidification rapide du milieu : l'apport de phosphate riche en chaux retarde la baisse du pH. Le travail du sol et l'aménagement conservatoire viseront à améliorer la capacité du sol à stocker l'eau et les nutriments (matières organiques), à améliorer l'infiltration (surtout en début et fin de saison pour allonger la période utile) et à éviter les excès d'eau au cœur de la saison des pluies (risques d'engorgement et de lixiviation). Cet aménagement pourrait consister à cultiver sur de gros billons (comme les Sénoufos) ou des planches (utilisé par l'ICRISAT sur *vertisols* en Indes)

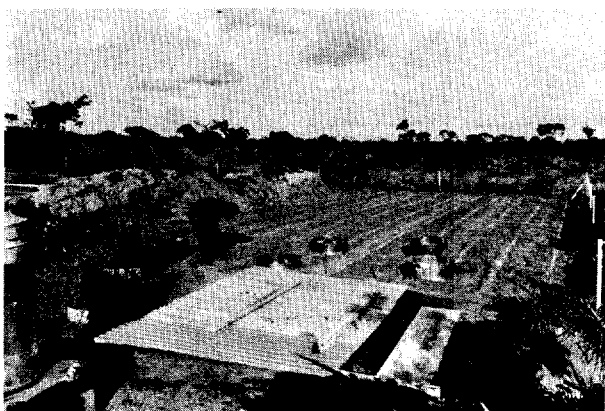
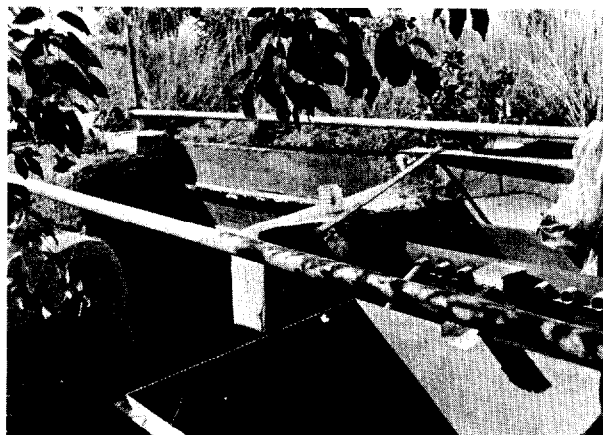
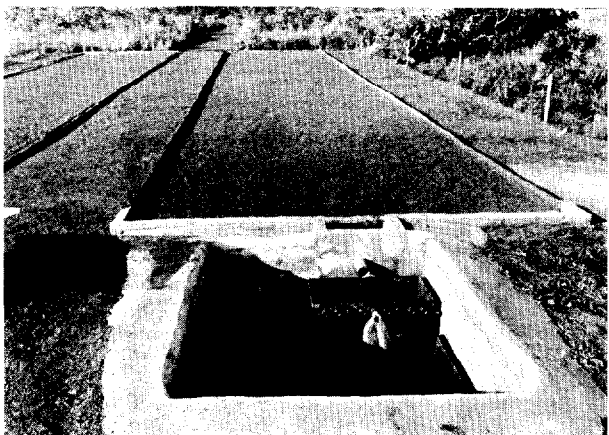
inclinés légèrement sur la courbe de niveau et à organiser quelques exutoires pour éviter d'enfouir les rizières qui occupent les bas-fonds sous une masse de sable lors de grosses averses.

En réalité, il vaudrait mieux répartir les cultures dans le paysage en fonction des potentialités du sol, réservant aux cultures vivrières les bas-fonds hydro-morphes, les sols colluvionnaires et les sols profonds

des plateaux tandis que les glacis gravillonnaires seraient consacrés au pâturage, ou mieux, aux plantations forestières ou fruitières; les arbres, en effet, peuvent tirer le meilleur profit de la réserve hydrique qui existe en permanence sous la nappe gravillonnaire dans l'horizon d'argile bariolée (les vergers existants et les bois sacrés en fournissent la preuve).

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'ORSTOM le 31 juillet 1979.*

PLANCHE I *Le matériel*



1. Parcelle ERLO de Korhogo en 1972.

2. Parcelle d'érosion KE 1.

3. Parcelle cultivée en maïs et lysimètres.

4. Détail de la case ERLO.



PLANCHE II *Techniques culturales de la région*

1. Buttes d'igname protégées par un bouquet de feuilles.



2. Pellicule de battance.



4. Culture de riz entre les buttes d'igname supprimant le ruissellement.

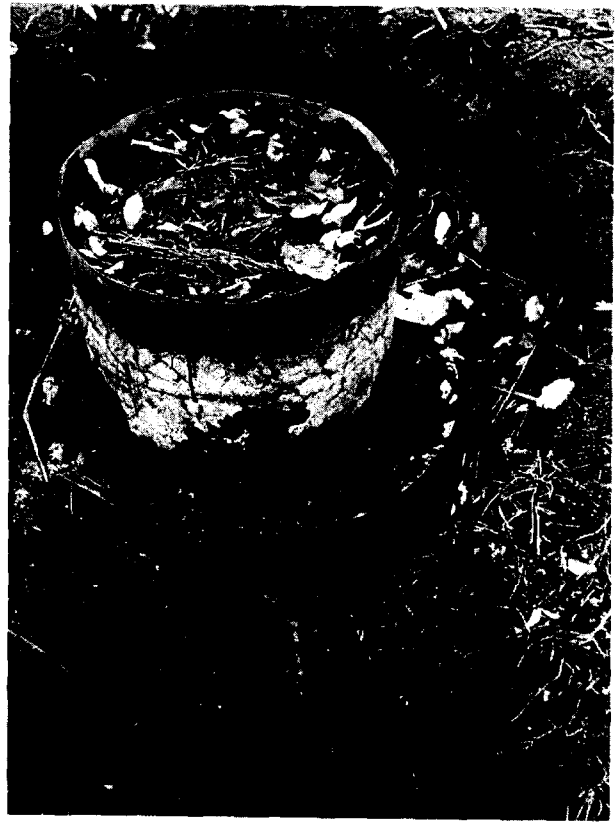


3. Mulch de gravillon sur la parcelle d'érosion.

PLANCHE III



3. Le simulateur de pluie sur la parcelle ERLO : pluviomètre linéaire.



1. Lysimètre déterré.



2. Lysimètre déterré et démonté.



4. Ruissellement et érosion au cours d'une pluie simulée. La présence de flaques entre les touffes d'herbe réduit la charge solide et l'érosion.

## BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), SEGALEN (P.), 1966. — Projet de classification des sols ferrallitiques. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, vol. IV, n° 4 : 97-112.
- AUDRY (P.), 1967. — Observations sur le régime hydrique comparé d'un sol ferrugineux tropical faiblement lessivé sous savane et sous culture. ORSTOM Fort-Lamy. 26 p. *multigr.* — Colloque Tananarive, 1967.
- BOULANGE (B.), 1970. — Transport et érosion sur un bassin versant tributaire de la rivière Amitioro (Côte-d'Ivoire). ORSTOM Abidjan, 40 p. *multigr.* + annexe.
- BRUNET-MORET (Y.), 1963 et 1967. — Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale : 1963 en république de Haute-Volta, 1967 en Côte-d'Ivoire. Rapport CIEH-ORSTOM 23 et 20 p. *multigr.*
- BOISSEZON (P. de), 1969. — Note sur la classification des sols ferrallitiques. Rapport ORSTOM, Abidjan, 13 p., *multigr.*
- BELOUSOVA (N.I.), 1974. — Role of the migration of water soluble substances in the formation of podzolic Al - Fe - humic soils (based on lysimeter data) *Potchvovedeniye*, 12 : 55-69 (*Soviet Soil Sc.* 6 : 694-708).
- BOCQUIER (G.), 1973. — Génèse et évolution de deux toposéquences de sols tropicaux du Tchad. Interprétation biogéodynamique - *Mém. ORSTOM* n° 62, Paris, 350 p.
- BERTRAND (A.R.), KAMIL SOR, 1962. — The effect of rainfall intensity on soil structure and migration of colloid materials in soils. *Soils Sc. Soc. Amer. Proc.* 26, 3 : 297-300.
- CALLEDE (J.), 1974. — Bassin versant représentatif de SARKI (RCA). Bilan de 5 ans d'observations (1968-72). ORSTOM, Paris, 120 p., *multigr.* + annexe.
- CAMUS (H.), BERTHAULT (C.), 1972. — Influence du couvert végétal sur la perméabilité des sols du bassin représentatif de Korhogo (Côte-d'Ivoire). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.* vol. IX, n° 3 : 3-14.
- CAMUS (H.), CHAPERON (P.), GIRARD (G.), MOLINIER (M.), 1976. — Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical. Influence de la mise en culture (Côte-d'Ivoire : Korhogo, 1962-72). *Trav. et Doc. ORSTOM*, Paris, n° 52, 81 p. + annexes.
- CHABALIER (P.), 1976. — Contribution à la connaissance du devenir de l'azote du sol et de l'azote engrais dans un système sol-plante. Thèse Doct. Ing. Fac. Sciences, Abidjan n° 33, 139 p. *multigr.* + annexe.
- CHAPERON (P.) *et Coll.*, 1966. — *Etude de ruissellement sur le bassin versant de Korhogo. Campagnes 1962-65 - Etude hydrologique de surface*, rapport ORSTOM tome 1 46 p. + annexe, tome 2, 46 p. + annexe.
- CHARREAU (C.), 1972. — Problèmes posés par l'utilisation agricole des sols tropicaux par les cultures annuelles. Comm. Séminaire sur les sols tropicaux. IITA, Ibadan mai 72, 54 p., *multigr.*
- CHRISTOI (R.), 1966. — Mesure de l'érosion à Niangoloko (Haute-Volta) Oléagineux 21, 8 : 531-534.
- COMMISSION DE PÉDOLOGIE ET DE CARTOGRAPHIE DES SOLS (C.P.C.S.), 1967. — Classification des sols. C.P.C.S., 87 p. *multigr.*
- C.T.F.T., 1966. — L'équation universelle de perte de sols de Wischmeier. Rapport C.T.F.T. - Madagascar, 15 p., *multigr.*
- DEGALLIER (R.), 1975. — Interprétation des variations naturelles de niveau des nappes souterraines. Application aux données provenant du bassin versant de Korhogo (Côte-d'Ivoire) B.R.G.M. 75 SGU 383 AME, 231 p. + annexe.
- DUCHAUFOUR (Ph.), 1960. — Précis de pédologie. Masson Edit. Paris, 438 p.
- DUMAS (J.), 1965. — Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* vol. III, n° 3 : 307-333.
- ELDIN (M.), 1971. — Le climat. in « Le milieu naturel de la Côte-d'Ivoire » *Mém. ORSTOM*, Paris n° 50, 391 p. : 77-108.
- FAUCK (R.), 1972. — Les sols rouges sur sables et sur grès d'Afrique Occidentale. *Mém. ORSTOM*, Paris, n° 61, 257 p.
- FEDOROFF (N.), 1974. — Les transferts de particules solides dans les sols sur granites. C.R. 10<sup>e</sup> Congrès Soc. Int. Sci. Sol., Moscou 1974, t. 6 : 219-224.
- FOURNIER, 1969. — « Transports solides effectués par les cours d'eau. Résultats au 1-8-1967 de l'enquête sur les données acquises avant la Décennie Hydrologique Internationale. A.I.H.S., 14, 3 : 7-49.
- FREE (G.R.), 1952. — Soil movement by raindrop. *Agr. Eng.* 33, 8 : 491-494.
- GARDNER (L.L.), 1970. — A chemical model for the origin of gibbsite from kaolinite. *Amer. Mineral*, 55 : 1.380-1.389.
- GIRARD (G.), CHOURET (A.), 1965. — Etude du ruissellement sur le bassin versant de Korhogo (Côte-d'Ivoire). Campagne 1963 - ORSTOM Paris, 61 p., *multigr.*
- GOUZY (M.), 1973. — Méthodes d'analyses utilisées dans le Laboratoire Central d'Analyse du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé. ORSTOM, Abidjan, *multigr.*

- KUCHARKA-FORKASIEWICZ (J.), MARGAT (J.), 1964. — Premiers résultats de l'étude hydrogéologique du bassin de Korhogo. BRGM - CIEH, 30 p., *multigr.*
- LELONG (F.), 1966. — Régime des nappes phréatiques contenues dans les formations d'altération tropicale. Conséquences pour la pédogénèse. *Sc. de la Terre*, 11, 2 : 201-244.
- LELONG (F.), LEMOINE (J.), 1968. — Les nappes phréatiques des arènes et des altérations argileuses. Leur importance en zone intertropicale. Les difficultés de leur exploitation. *Bull. BRGM* 2,3 : 41-52.
- LELONG (F.), TARDY (Y.) *et al.*, 1976. — Pedogenesis, chemical weathering and process of formation of some supergene ore deposits in « handbook » of strata-bound and stratiform ore deposits. Ed. Wolf Elsevier, Amsterdam : 93-173.
- LENOIR (F.), 1972. — Exportation chimique d'un bassin intertropical (Le Bandama, Côte-d'Ivoire). Influence des conditions hydrologiques. Thèse Doct. Sc. Nat. Nice, CNRS n° AO 7845, ORSTOM, 375 p., *multigr.*
- LENOIR (F.), MATHIEU (P.), MONNET (C.), 1976. — Bilan d'érosion chimique et mécanique sur un bassin versant de Côte-d'Ivoire (Le Bandama). 3<sup>e</sup> Conf. Géol. Africaine. Kartoum, 3-17 janvier 1976, 7 p., *multigr.*
- LÉVÊQUE (A.), 1975. — Pédogénèse sur le socle granito-gneissique du Togo. Différenciation des sols et ramèments superficiels. Thèse Univ. Strasbourg N° AO 11485 — ORSTOM, Paris, 301 p.
- MATHIEU (Ph.), MONNET (C.), 1970. — Apports chimiques par les eaux de pluie en savane et sous forêt en climat intertropical (Côte-d'Ivoire). Rapports ORSTOM, Abidjan, 153 p. + annexes.
- MATHIEU (Ph.), MONNET (C.), 1970. — Physico-chimie des eaux de pluie en savane et sous forêt en milieu tropical. *Cah. ORSTOM, Sér. Géol.* vol. III, n° 2 : 9-30.
- MATHIEU (Ph.), 1972. — Apports chimiques par les précipitations atmosphériques en savane et en forêt. Influence du milieu forestier intertropical sur la migration des ions et sur les transports solides (Bassin de l'Amintoro en Côte-d'Ivoire). Thèse Doct. Sc. Nat., Univ. Nice, n° CNRS AO 7838, ORSTOM, 441 p., *multigr.*
- MONNET (C.), 1972. — Contribution à l'étude de la dynamique et de la nature des suspensions d'un fleuve intertropical, le Bandama en Côte-d'Ivoire. Evolution des éléments chimiques des eaux de son estuaire. Thèse Sc. Nat. FAC. Nice, CNRS n° AO 7826, 427 p., *multigr.*
- MAYMARD (J.), 1964. — Etude pédologique dans la région de Korhogo (Côte-d'Ivoire) rapport ORSTOM Abidjan, 83 p., *multigr.*
- MOLINIER (M.), 1968. — Etude du ruissellement sur le bassin versant de Korhogo. Campagne 1967, ORSTOM, Abidjan, 20 p., *multigr.* + annexes.
- MOLINIER (M.), 1971. — Etude du ruissellement sur le bassin versant de Korhogo Campagnes 1968, 69, 70. ORSTOM, Abidjan, 60 p., *multigr.* + annexes.
- NALOVIC (L.J.), 1968. — Les méthodes d'analyse des sols et des eaux utilisés dans le Laboratoire du Centre ORSTOM d'Adiopodoumé, ORSTOM, Abidjan, 123 p., *multigr.*
- PEDRO (G.), CHAUVEL (A.), 1973. — Sur la nature et l'importance relative des principaux mécanismes intervenant dans le processus de lessivage pédologique. C.R. Acad. Sc., Paris t. 277D : 1.133-1.136.
- POULAIN (J.F.), ARRIVETS (J.), 1971. — Effets des principaux éléments fertilisants autre que l'azote sur les rendements des cultures vitrières de base (sorgho, mil, maïs) au Sénégal et en Haute-Volta. Séminaire CSTR/OUA Dakar 7.71 - Rapport IRAT-H.V., 31 p., *multigr.*
- PERRAUD (A.), CHEROUX (M.), 1963. — Etude Pédologique du bassin versant de Waraniene-Doka (Korhogo, Côte-d'Ivoire). ORSTOM Abidjan, 23 p., *multigr.*
- ROOSE (E.J.) 1968a. — Un dispositif de mesure du lessivage oblique dans les sols en place. *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.* vol. VI, n° 2 : 235-249.
- ROOSE (E.J.), 1968b. — Erosion en nappe et lessivage oblique dans quelques sols ferrallitiques de Côte-d'Ivoire. Comm. 6<sup>e</sup> Conf. WASA Abidjan 15 p.
- ROOSE (E.J.), HENRY DES TUREAUX (P.), 1970a. — Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans les sols en place. *Agron. Trop.* 25, 12 : 1.029-1.087.
- ROOSE (E.J.), 1972. — Contribution à l'étude de l'appauvrissement de quelques sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux situés entre Abidjan et Ouagadougou par l'utilisation de méthodes expérimentales de terrain. ORSTOM Paris, Bull. liaison Pédol. Thème A, 1 : 19 à 41.
- ROOSE (E.J.), 1973. — Dix-sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte-d'Ivoire. Thèse Doct. Ing. Fac. Sc. Abidjan n° 20, ORSTOM, Abidjan, 125 p., *multigr.*
- ROOSE (E.J.), 1974a. — Influence du niveau de fertilisation sur l'évolution des bilans hydriques et chimiques pour une culture continue de maïs sur des sols ferrallitiques perméables de la zone tropicale humide. Protocole expérimental ORSTOM, Abidjan, 14 p., *multigr.*
- ROOSE (E.J.), 1974b. — Influence du type de plante et du niveau de fertilisation sur la composition des eaux de drainage en milieu tropical humide. XIII<sup>e</sup> Journées de l'Hydraulique, Paris, sept. 1974, Question 3, rapport 13, 7 p.
- ROOSE (E.J.) 1976a. — Contribution à l'étude de l'influence de la mésosofaune sur la pédogénèse actuelle en milieu tropical, ORSTOM, Abidjan, 56 p., *multigr.*

- ROOSE (E.J.), COLLINET (J.), 1976b. — La conservation des sols et la dynamique de l'eau à Korhogo, in « Journées de la Recherche Scientifique en région de savane » Korhogo 12-15/4/76, ORSTOM Abidjan : 5-12.
- ROOSE (E.J.), LELONG (F.), 1976c. — Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale. Etudes sur petites parcelles expérimentales. *Rev. Geogr. Phys. et Géol. Dyn.*, 18,4 : 365-374.
- ROOSE (E.J.) 1976d. — Use of the universal soil loss equation to predict erosion in West Africa. in « Soil erosion prediction and control ». SCSA Special public, n° 21 : 60-74.
- ROOSE (E.J.), 1977a. — Adaptation des méthodes de conservation des sols aux conditions écologiques et socio-économiques de l'Afrique de l'Ouest. *Agron. Trop.* 31, 2 : 132-140.
- ROOSE (E.J.) 1977b. — Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. in *trav. et doc. ORSTOM*, Paris, n° 78, 108 p.
- ROOSE (E.J.), GODEFROY (J.), 1977c. — Pédogénèse actuelle comparée d'un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous une bananeraie fertilisée de basse Côte-d'Ivoire Azaguié, 1966-73. *Cah. ORSTOM sér. Pédol.*, vol. XV, n° 4 : 67-94.
- ROOSE (E.J.), 1978a. — Pédogénèse actuelle d'un sol ferrugineux tropical issu de granite sous une savane arborée du plateau Mossi (Haute-Volta) Gonsé; Campagne 1968 à 74. Rapport ORSTOM Paris 121 p., in *Cah. ORSTOM Sér. Pédol.*, vol. XVI, n° 2 : 193-223.
- ROOSE (E.J.), 1978b. — Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indurés issus de granite sous savane et sous sorgho en région soudano-sahélienne. Saria (Haute-Volta) : Campagnes 1971-74. Rapport ORSTOM Paris, 116 p., *multigr.*
- ROOSE (E.J.), 1979. — Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique gravillonnaire issu de granite sous culture et sous une savane arbustive soudanienne du Nord de la Côte-d'Ivoire. (Korhogo 1967-75). Rapport ORSTOM, Paris, *multigr.*, (à paraître).
- SIBAND (P.), 1972. — Etude de l'évolution des sols sous culture traditionnelle en Haute Casamance. *Agron. Trop.* 27,5 : 574-591.
- SOUCHÈRE (P. de la), 1966. — Note sur la physiographie générale du bassin versant de Waraniene-Doka et des bassins versants environnants. Photo-interprétation. Rapport ORSTOM, Abidjan, 4 p : *multigr.*
- VILLECOURT (P.), ROOSE (E.J.), 1978. — Charge en azote et en éléments minéraux majeurs des eaux de pluie, de pluviolésivage et de drainage dans la savane de Lamto (Côte-d'Ivoire). *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, 15, 1 : 1-20.
- TARDY (Y.), 1969. — Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. Thèse Doct. Sc. Nat. Strasbourg, 199 p. *Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorraine* n° 31.
- WISCHMEIER (W.H.), SMITH (D.D.), 1960. — A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planning. *7th Congres Inter. Soil Sc. Soc.*, 1 : 418-425.
- WISCHMEIER (W.H.), JOHNSON (C.B.), CROSS (B.V.), 1971. — A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. of Soil and Water Cons.* 26, 5 : 189-192.