



M. U. C.

Porgès

Handwritten signature/initials

Influence du bioclimat et de l'aménagement des sols sur les éléments du bilan hydrique en Afrique de l'Ouest

E. ROOSE

ORSTOM, 24 rue Bayard, F-75008 Paris, France

F. LELONG

Université d'Orléans, F-45046 Orléans Cedex, France

J. COLOMBANI

ORSTOM, 70-74 route d'Aulnay, F-93140 Bondy, France

RESUME Des bilans hydriques comparatifs ont été établis par des mesures (pluies, ruissellement, humidité du sol) et des calculs (évapotranspiration, drainage) dans six parcelles expérimentales d'Afrique Occidentale le long d'une séquence bioclimatique allant de la Basse Côte d'Ivoire à la Haute-Volta Centrale. Ces bilans montrent l'évolution de termes du bilan hydrique en fonction du bioclimat, de l'utilisation du sol et des caractéristiques pédologiques. Dans les parcelles non aménagées (végétation naturelle), le terme ruissellement reste faible quel que soit le couvert végétal (1% à 2% des pluies annuelles). Le drainage profond tend vers zéro quand les pluies annuelles deviennent inférieures à 900-1000 mm (régions équatoriales) et à 700-800 mm (régions tropicales). Dans les parcelles cultivées, le ruissellement augmente beaucoup, mais l'écoulement total (ruissellement + écoulement de base) n'augmente pas nécessairement. Les sols profonds, à forte réserve hydrique, favorisent l'augmentation de l'évapotranspiration aux dépens d'un drainage profond.

Effects of bioclimate and soil use on water budget terms in West Africa

ABSTRACT Comparative water budgets have been established by measurement (rainfall, runoff, soil moisture) and calculation (evapotranspiration, drainage) on six experimental plots in West Africa throughout a bioclimatic sequence from the lower Ivory Coast to central Upper Volta. These budgets show the variations of water budget terms with bioclimate, soil use and pedological characteristics. In non cultivated plots (natural vegetation) the runoff term is low whatever the vegetation (1%-2% of annual rainfall). Deep drainage is near zero when annual rainfall is less than 900-1000 mm (equatorial areas) and less than 700-800 mm (tropical areas). In cultivated plots, runoff increases greatly but total flow (runoff + deep drainage) does not necessarily increase. Thick soils, with important water storage support increased evapotranspiration at the expense of drainage.

-2 NOV. 1983

O. R. S. I. U. M. FOMUS DOCUMENTATION

283

No : 3584 ex1

Cote : B

3584 ex1

INTRODUCTION

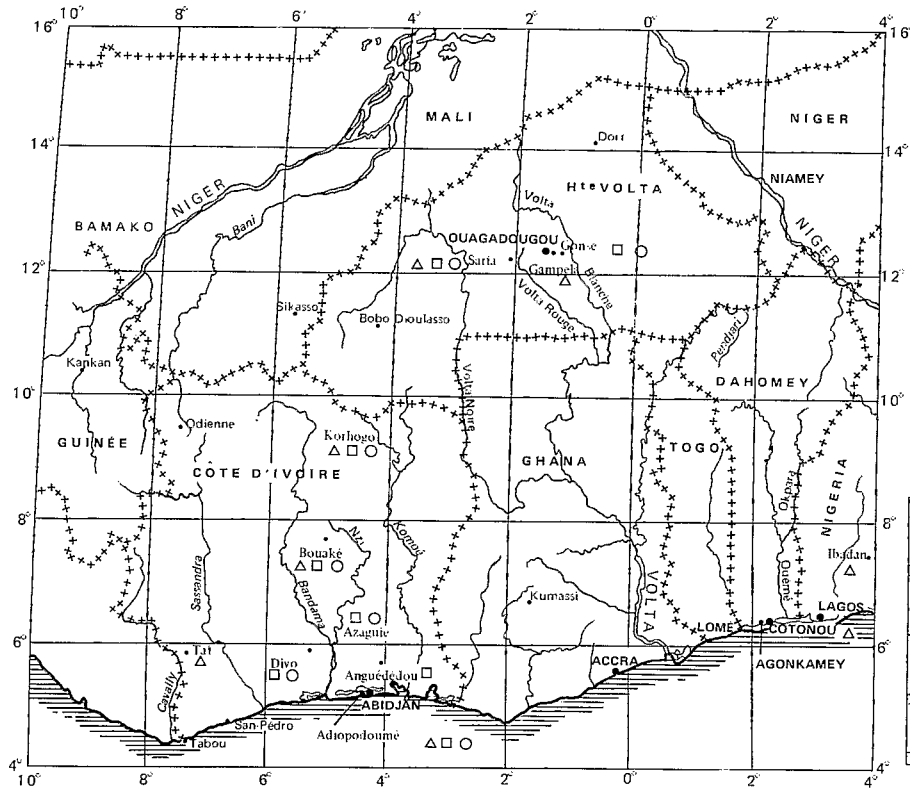
Le monde découvre un peu mieux chaque jour combien l'eau de bonne qualité est une matière précieuse. Ceci est particulièrement ressenti dans les zones industriellement avancées (*cf.* III Assises Internationales de l'Environnement: Paris, décembre 1980) mais aussi dans les régions chaudes en voie de développement où son absence limite l'extension de l'habitat et des cultures (Boutrais, 1979). Or, sa disponibilité ne dépend pas seulement de la hauteur et de la répartition des pluies au cours de l'année, mais aussi de la couverture végétale, du type de sol et de l'aménagement du bassin versant (Bailly *et al.*, 1974; Dagg & Blackie, 1965; Wischmeier, 1966; Holtan & Creitz, 1968; Kowal, 1972; Harrold *et al.*, 1962; Rapp *et al.*, 1972; Camus *et al.*, 1976; Roche, 1978; Sartz & Tolsted, 1974; Vuillaume, 1968; Lenoir *et al.*, 1976; Fournier, 1967; Heusch, 1970; Dunne, 1979).

Dans ce cadre de la mise en valeur des pays en voie de développement deux tendances peuvent s'affronter.

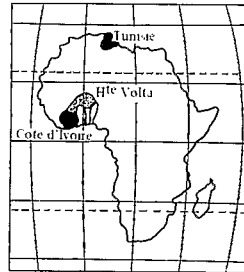
- Les ingénieurs de l'équipement s'efforcent de favoriser l'écoulement des bassins versants et à stocker de grandes quantités d'eau dans des retenues artificielles situées dans les vallées pour subvenir aux besoins (en eau potable, électricité, irrigation) des collectivités localisées le plus souvent en dehors du bassin (ou en aval du barrage). Dans ce cas, la végétation - surtout la végétation arborée - apparaît comme un concurrent qui gaspille l'eau par évapotranspiration (Ingebo, 1972; Fink & Frasier, 1975; Fairbourn *et al.*, 1972).
- Les forestiers et les agronomes au contraire cherchent à favoriser l'infiltration dans le sol et le stockage sur place des précipitations pour limiter les dangers d'érosion et augmenter la production de matières vertes. En effet, les plantes souffrent généralement plus encore d'un déficit hydrique que de carences minérales et ceci non seulement en milieu aride, mais même en milieu tropical humide (Roose, 1976). Toute une série de techniques biologiques visant à assurer la pérennité de la couverture végétale (pas forcément forestière) peuvent être conseillées pour limiter le ruissellement immédiat, améliorer l'alimentation des nappes et soutenir les écoulements retardés (Roose, 1973, 1974, 1980).

Parmi les couverts naturels qui favorisent l'infiltration, la forêt joue un rôle particulier, car elle développe les activités biologiques à la surface du sol (la plus sensible à l'érosion) en la recouvrant d'une litière organique et en y concentrant les éléments minéraux et organiques. Plus le taux de recouvrement forestier est important dans un bassin et plus le ruissellement immédiat et les débits de crue sont écrêtés. La forêt n'influence pas seulement le ruissellement, mais aussi l'évapotranspiration du bassin et donc l'écoulement annuel total. Ce dernier augmente souvent lorsqu'on défriche des bassins de petites surfaces (Hibbert, 1965; Charreau & Fauck, 1970), mais pour des surfaces plus grandes, il ne varie pas toujours inversement au taux de couvert forestier (Rakhmanov, 1970; Garczynski, 1978, 1981). De plus, l'écoulement de base - en particulier l'étiage - augmente le plus souvent avec le taux de couverture. Le régime hydrique des rivières s'en trouve régularisé

CARTE DE SITUATION DES STATIONS DE MESURE DE L'ÉROSION ET DU DRAINAGE



- Gonsé : ORSTOM - CTFT
- Gampela : CTFT - ORSTOM
- Saria : ORSTOM - IRAT
- Korhogo : ORSTOM
- Bouaké : IRAT - ORSTOM
- Divo : ORSTOM - IFCC
- Azaguié : ORSTOM - IRFA
- Anguédédou : ORSTOM - IRCA
- Adiopodoumé : ORSTOM
- Agonkamey : ORSTOM
- Ibadan : IITA



- △ Case érosion
- Case ERLO
- Case DV

Fig. 1 Carte de localisation des parcelles.

et la qualité ainsi que la quantité d'eau utile sont finalement augmentées.

Dans cette note sont résumés un certain nombre de résultats concernant le bilan hydrique à l'échelle de la parcelle acquis en Afrique par divers chercheurs de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. Ils font apparaître l'évolution des termes du bilan hydrique en fonction du bioclimat, des caractéristiques du profil pédologique et de l'aménagement de la surface du sol. Ils soulignent l'intérêt des études sur parcelles pour analyser les observations globales effectuées au niveau des bassins, toujours plus ou moins hétérogènes.

LE MILIEU ET LA METHODE

Le programme d'étude de la dynamique actuelle des sols dont sont extraits la majorité des résultats s'est déroulé de 1964 à 1976 en huit stations réparties entre la région subéquatoriale des forêts denses humides de basse Côte d'Ivoire et les savanes soudano-sahéliennes du centre de la Haute-Volta (*cf.* Fig.1). Les caractéristiques des stations sont résumées au Tableau 1.

Le but était de discerner le mode et la vitesse d'évolution (en fonction du bioclimat et des aménagements) de larges couvertures pédologiques très anciennes et monotones du point de vue minéralogique (kaolinite, quartz et sesquioxides), d'une part en sols ferrallitiques profonds et homogènes dans la zone tropicale humide, et d'autre part en sols ferrugineux tropicaux plus contrastés et moins profonds dans la zone tropicale sèche.

La méthode adoptée est originale: elle consiste à établir sur chaque parcelle des bilans "entrées-sorties" (bilans hydriques, bilans des charges solides et en solution). La tranche de sol considérée (couvert végétal, surface du sol et les deux premiers mètres des profils) est soumise à des flux positifs (apports par les pluies, par les remontées biologiques et éventuellement par les engrais) et à des flux négatifs (pertes par érosion, drainage profond et exportation éventuelle); flux qui sont comparés aux stocks (sol et végétation pérenne) et aux flux internes au système (pluiolessivage, activité de mixage de la mésofaune, minéralisation de la litière). L'eau est un agent de transport à la fois des éléments solubles et des matières solides; l'analyse de ces flux apporte donc des indications précieuses sur la dynamique actuelle des sols. Ces flux sont mesurés et analysés à cinq niveaux: la pluie au-dessus et en-dessous du couvert général, le ruissellement, le drainage superficiel (vers 30-60 cm), le drainage profond (vers 150-200 cm) ainsi que la nappe phréatique ou les sources (Roose, 1980).

Le bilan hydrique est calculé au pas de temps mensuel à partir de l'équation générale: pluie = ruissellement + drainage profond + ETR + variations du stock d'eau du sol.

Les pluies ont été mesurées à l'aide de pluviomètres standards et de pluviographes à augets basculants (Cerf): bague de 2000 cm², à 150 cm du sol.

Le pluiolessivage a été capté à 25 cm du sol dans des bacs en plastique ou dans des entonnoirs fixés sur des bouteilles en plastique.

Le ruissellement a été mesuré au bas de parcelles d'érosion de 100

Tableau 1 Caractéristiques générales des stations de mesure en Afrique de l'Ouest

	ADIOPODOUME	ANGUEDOU	AZAGUIE	DIVO	BOUAKE	KORHOGO	SARIA	GONSE
SITUATION								
Latitude	5°19' N	5°25' N	5°33' N	5°48' N	7°46' N	9°25' N	12°16' N	12°22' N
Longitude	4°13' W	4°08' W	4°03' W	5°18' W	5°06' W	5°39' W	2°09' W	1°19' W
Altitude	30m	60m	80m	150m	370m	390m	300m	300m
CLIMATS	EQUATORIAL DE TRANSITION (2 SAISONS DES PLUIES)					TROPICAL Transition	TROPICAL PUR	
Pluie an. moy. (mm)	2150	2100	1750	1450	1200	1350	830	860
ETP a.m. (mm)	1250	1300	1314	1280	1300	1660	1885	1905
Température (°C)	26,2°	26,2°	26,2°	26,0°	26,1°	27,0°	28°	28,1°
Ind. Agress. Rusa	1260	1000	885	825	512	676	450	430
VEGETATION NAT.	FORET DENSE HUMIDE				SAVANE ARBUREE			
	Sempervirente		Semi-decidue	Guinéenne	Soudanaise	Soudano-Sahélienne		
Végét. Comparée	Forêt Zaire nu-maïs-div. fertilisé	Hévéa/terrasse isohypse fertilisé	Forêt Zaire bananeraie fert. + irr.	Forêt Zaire cacao fertilisé	Sav. Arbust. maïs & div. fertil. feu	Sav. brülée sol nu, maïs fertil. feu	Sav.pat.+feu nu, sorgho fertilisé	Sav.Arb.brül. date variable du feu
PAYSAGES	Plateaux profondément entaillés		"Lanières" Vigour.incisée	Large croupe Moll.ondulée	Large croupe Moll.ondulée	Plat. Tab. Long Glacis concave	Dôme surb. Très long glacis	Plat. Tab. cuirassé Très long glacis
Pentes %	4-7-11-20-65		29	14	10	4	3	0.7
Versant (m)	20 à 500		100 à 500	180	300	700	750 à 1000	2000 3000
SOLS	FERRALLITIQUE						FERRUGINEUX-TROPICAL	
	Très désaturés		Moyen.Désat.	Très désat.	Moyen. désat.	Lessivés		
	appauvri	appauvri	remanié	remanié	rajeuni	remanié	indurés	à taches & concrét.
	modal	modal	appauvri	modal	remanié	modal	sur cuir. peu prof.	Cuir. Profonde
Roche mère	Sédiment.III sablo-arg.	Sédim.III sablo-arg.	Schist.chlor. filon.Quartz	Granito-gneiss Calco-alc.	Granito-gneiss +fil.pegm.	Granito-gneiss +fil.quartz	Granito-gneiss	Granito-gneiss

à 300 m² (Fournier, 1954; Roose, 1973).

Le drainage vertical fut recueilli dans des lysimètres isolant des monolithes de terre non remaniée, de 40 à 180 cm de profondeur, 63 cm de diamètre (Roose & des Tureaux, 1970).

Le drainage oblique a été mesuré au bas de parcelles ERLO à quatre profondeurs différentes située vers le tiers aval des toposéquences de sol (Roose, 1968).

Des profils hydriques ont été mesurés soit à l'humidimètre à neutrons (Bois & Roose, 1978), soit à partir d'échantillons prélevés à la tarière, au cours d'expériences de terrain visant à déterminer les caractéristiques hydrodynamiques des profils. On dispose ainsi des variations saisonnières d'humidité des sols, mais pas forcément des variations décennales du stock (ou de l'ETR).

Par ailleurs une équipe de bioclimatologistes a étudié l'évapotranspiration potentielle (ETP) selon la formule de Turc (1961) et l'évapotranspiration réelle (ETR) de divers couverts herbacés (Eldin, 1971).

La mesure directe du drainage profond dans les lysimètres s'est avérée très délicate dans le milieu naturel (sauf sous savane herbeuse), particulièrement sous la voûte forestière extrêmement hétérogène et lorsque le réseau racinaire déborde les limites des cases lysimétriques. De plus, les mesures ont été effectuées entre 1964 et 1975 selon les stations, période durant laquelle les pluies furent largement déficitaires par rapport à la normale. Pour généraliser les bilans à des années normales ou décennales sèches ou humides, il a donc fallu compléter les données par des calculs d'estimation du bilan hydrique: on a adopté la méthode de Thornthwaite (1948) en l'améliorant quelque peu (*cf.* Figs 2 et 3).

- En saison sèche, $ETP > \text{pluie} - \text{ruis.}$; $ETR \text{ brut} = \text{pluie} - \text{ruis.}$
(il n'y a pas de drainage profond).

- En période humide, $ETR \approx ETP$: $\text{drain. brut} = \text{pluie} - (\text{ruis.} + ETP)$

Il reste à ajouter à l'ETR brut ainsi estimé la variation saisonnière ΔS du stock d'eau du sol (profil à capacité au champ en fin de saison humide moins profil sec en fin de saison sèche) puisque la végétation puise dans les réserves hydriques du sol dès que la pluie cesse d'être suffisante (= ETR corrigé). De même, il faut soustraire cette variation saisonnière du stock au drainage brut ainsi calculé pour tenir compte du fait que les eaux infiltrées ne peuvent drainer en profondeur qu'après avoir réhumecté, à capacité au champ, l'ensemble du profil (on obtient ainsi le drainage corrigé). La comparaison des bilans estimés de la sorte à pas de temps mensuel et des bilans mesurés montrent que le drainage est sousestimé d'environ 10%, ce qui est acceptable surtout pour la comparaison des bilans calculés de la même façon tout au long d'une séquence bioclimatique (Roose, 1980).

Les conclusions pédologiques de cette étude ont été publiées ailleurs (Roose, 1978, 1979, 1980; Roose *et al.*, 1981) mais les résultats concernant les bilans hydriques à l'échelle de la parcelle méritent d'être discutés et confrontés aux bilans hydrologiques mesurés sur bassins versants. Certes, il se pose un problème d'échelle. En effet, le bassin versant est incontestablement une unité plus naturelle que la parcelle d'érosion pour l'étude du bilan de l'eau (*cf.* Amerman & McGuinness, 1967; Bailly *et al.*, 1974; Ibiza, 1976; Garczynski, 1980). Le choix de l'échelle expérimentale a été orienté non seulement par des contingences matérielles (coût) mais

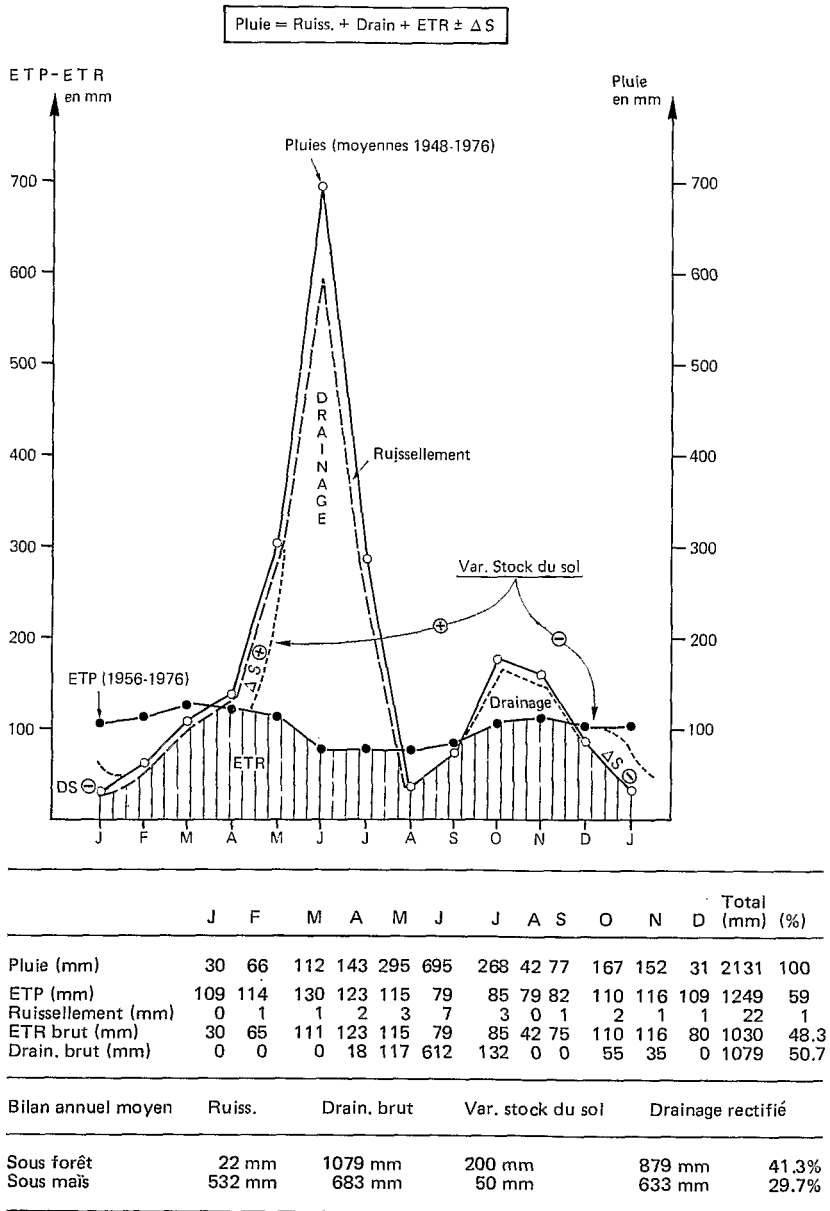


Fig. 2 Schéma de bilan hydrique à l'échelle de la parcelle à Adiopodoumé (Monteny & Eldin, 1977).

aussi pour des raisons pédologiques: l'interprétation des résultats obtenus sur bassin n'est pas toujours évidente étant donné les hétérogénéités du couvert végétal, des sols, de la topographie et aussi des averses à la surface d'un bassin. La parcelle de quelques centaines de m² a le mérite de réduire les hétérogénéités inhérentes à tous bassins, tout en intégrant l'hétérogénéité propre à un type de sol. Avec les moyens dont on disposait, la précision de nos résultats ne dépasse pas 10% en valeur relative. Cependant, les

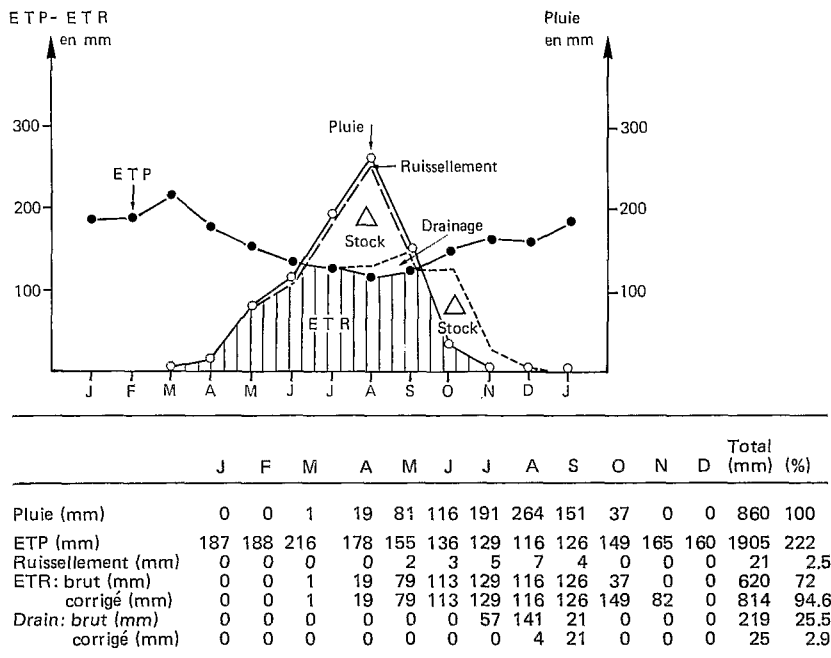


Fig. 3 Schéma de bilan hydrique à l'échelle de la parcelle à Gonsé (savane soudano-sahélienne). Calculs faits avec $\Delta S = 194$ mm.

parcelles ne permettent pas d'appréhender les phénomènes cumulatifs qui interviennent tout au long d'un bassin versant. Il donc intéressant de confronter les résultats obtenus dans cette étude avec les bilans hydrologiques mesurés, en régions comparables, sur bassins versants.

LES RESULTATS

Ils sont présentés aux Tableaux 2-4 et aux Figs 2-5.

Bilan hydrique en milieu naturel en fonction du bioclimat

Les différents termes du bilan hydrique sont les suivants:

Les précipitations Il importe de distinguer deux zones en fonction de la répartition des pluies au cours de l'année. En région subéquatoriale, les pluies tombent toute l'année, mais plus abondamment en deux saisons centrées sur juin-juillet et octobre-novembre. En région tropicale, les pluies sont généralement moins abondantes, mais regroupées en une seule saison qui s'étend de mai à octobre. La hauteur des précipitations diminue du sud au nord sauf entre Bouaké et Korhogo où elle augmente, et le changement de régime a généralement lieu entre ces deux localités (cf. Fig.5).

Le ruissellement En milieu naturel, qu'il s'agisse de la forêt dense ou de la savane herbeuse peu dégradée, le ruissellement reste

Tableau 2 Bilan hydrique calculé en année moyenne, humide et sèche de fréquence décennale sous végétation naturelle. D'après les résultats précipitation-ruisellement mesurés sur parcelle (Roose, 1980)

	Pluie (mm)	ETP: (mm) (%)		Ruisellement: (mm) (%)		ETR corrigé: (mm) (%)		Drainage corrigé: (mm) (%)	
ADIOPODOUME									
Sèche 1972	1636	1285	79	16.4	1	1128	68.9	491.6	30.1
Année moyenne	2131	1249	59	22	1	1230	57.7	879	41.3
Humide 1962	2776	1107	40	28	1	952	34.3	1796	64.7
Stock. = 200 mm									
AZAGUIE									
Sèche 1972	1468	1196	81	19	1.3	1175	80	274	19
Année moyenne	1767	1314	74	35	2	1305	74	427	24
Humide 1968	2052	1375	67	108	5.3	1370	69	574	28
Stock. = 200 mm									
DIVO									
Sèche 1973	1087	1353	124	5.4	0.5	1036.6	95.4	45	4.1
Année moyenne	1453	1276	88	14.5	1	1204	82.9	234.5	16.1
Humide 1968	1879	1265	67	28	1.5	1281	68.2	570	30.3
Stock. 150 mm									
BOUAKE									
Sèche 1973	914	1371	150	1	0.1	782	85.6	131	14.3
Année moyenne	1202	1291	107	4	0.3	1028	85.6	170	14.1
Humide 1970	1509	1285	85	7.5	0.5	1002	66.4	499.5	33.1
Stock. = 120 mm									
KORHOGO									
Sèche 1974 mod.	1004	1711	174	20	2	828	82.5	156	15.5
Année moyenne	1353	1660	123	40.6	3	1064	78.7	248	18.3
Humide 1969	1723	1643	95	86.2	3	1169	67.8	468	27.2
Stock. 150 mm									
GONSE									
Sèche 1963	657	2033	309	13	2	644	98	0	0
Année moyenne	860	1905	222	22	2.5	813	94.6	25	2.9
Humide 1955	1040	1694	157	52	5	872	83.8	116	11.2
Stock. = 193 mm									

faible (1-2% des pluies annuelles). Par contre si le milieu est dégradé par les feux de brousse ou les cultures antérieures (ex. Azaguié, Korhogo, Gonsé), le ruissellement moyen annuel peut atteindre 5% les années les plus humides.

Les variations du stock d'eau du sol (cf. Fig.4) Elles diminuent de 250 mm en sol très profond sous forêt dense à 40 mm en savane sur sol ferrugineux tropical gravillonnaire dès la surface. On verra plus loin que plus l'horizon exploité par les racines est réduit, plus l'ETR est limitée en faveur des écoulements superficiels s'il existe, à faible profondeur, un horizon peu perméable, ou en faveur des écoulements retardés s'il existe une cuirasse perméable en grand.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) L'ETP annuelle est très

Tableau 3 Evolution du drainage et de l'ETR en fonction de la réserve hydrique et de la profondeur du sol utilisée par les végétaux. Valeur annuelle en année moyenne

	Pluie moyenne (mm)	ETP moyenne (mm)	Ruissellement (%)	ETR corrigé (%)	Drainage corrigé (%)	Var. stock (mm)
SARIA PROT. sol gravill. dès surface	826	1905	3	77	20	40
SARIA P7 carapace vers 50 cm	826	1905	5	78	17	60
GONSE carapace vers 170 cm	826	1905	2.5	94.5	3	194

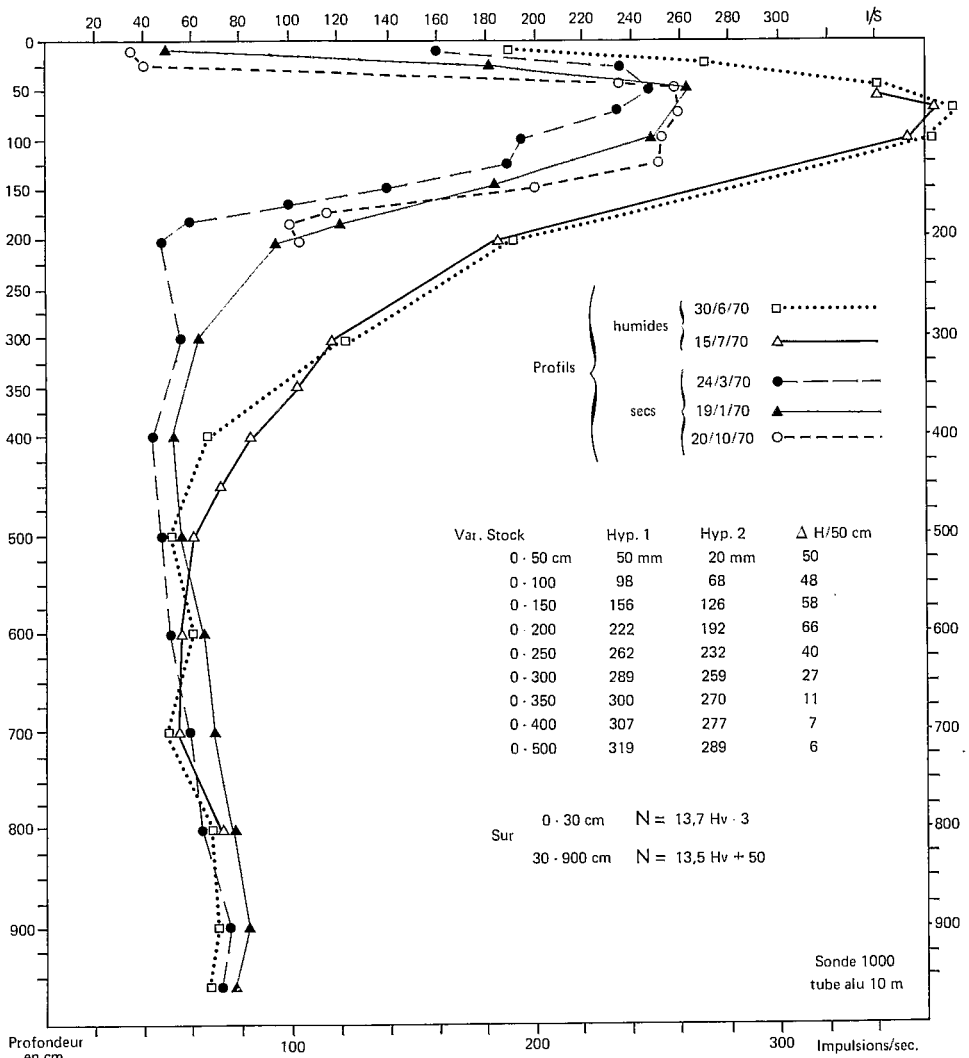


Fig. 4 Profils hydriques en saisons sèches et humides sous la forêt dense secondaire d'Adiopodoumé (d'après Bois & Roose, 1978).

Tableau 4 Ruissellement et érosion en Afrique et l'Ouest sous végétation naturelle ou cultivée et sur sol nu (Roose, 1980)

STATIONS	FENTE	Ruisc. an. moyen %			Ruisc. max. journalier %			Erosion (t/ha/an)			Sources
		milieu nat.	sol nu	culture	milieu nat.	sol nu	culture	milieu nat.	sol nu	culture	
Adiopodoumé : ORSTOM, 1954-75. Forêt dense sempervirente second. Pluie = 2100 mm en 4 saisons Sol ferrallitique sur sables III	4,5	-	35	-	-	98	-	-	60	-	Roose 73 - 79
	7	0.1	33	0.5 à 30	0.7	95	60-87	0.017	138	0.1-100	
	11	0.3	-	-	1.3	-	-	0.034	-	-	
	20	0.5	24	-	3.2	76	-	0.052	570	-	
Anquedou : IRCA-ORSTOM, 1966-69 Hévéa sur terrasse	65	1.2	-	hévéa	12	-	hévéa	0.455	-	hévéa	Roose Godefroy 1977
	29	-	-	0.3 à 1 md = 0.5	-	-	2 à 4 md = 2.2	-	-	0.06 à 0.3	
Azandjé : IRFA-ORSTOM, 1966-74 Forêt dense sempervirente Pluie = 1750 mm en 4 saisons Sol ferrallitique sur schistes chloritoux	14	0.4 à 5.5 md = ?	-	banane 5.5 à 12 md = 9	3 à 39 md = 14	-	banane 25 à 74 md = 60	0.05-1.4 md = 0.15	-	banane 0.7-4.5 md = 1.8	Roose Godefroy 1977
Divo : IFCC-ORSTOM, 1967-74. Forêt dense semi-décidue pluie = 1450 mm en 4 saisons sol ferrallitique sur granite	10	0.5 à 1.4	-	cacao 0.3-0.4	3 à 6	-	cacao 1 à 2.4	0.1 à 0.6	-	Cacao 0.06-0.1	Roose, Jadin 1970-79
Bouaké : IRAT-ORSTOM, 1960-73. Savane arbustive dense Pluie = 1200 mm en 4 saisons Sol ferrallitique sur granite	4	Pro. 0.03 FP. 0.23	15-49	0.1 à 26	Pro. 0.2 FP. 1	40 à 70	5 à 65	PRO. 0.001 PF 0.050	11 à 52	0.1 à 26	Kaïmo 15 Bertrand 67 Roose et al. Berger 64
Korhogo : ORSTOM, 1967-74. Savane arbustive claire dégradée Pluie = 1400 mm en 2 saisons Sol ferrallitique sur granite	3	FP. 1 à 5 md = 3.0	25-40 md = 33	-	8 à 30 md = 19	67 à 89	-	0.01-0.160 md = 0.110	3 à 9 md = 4	-	Roose 1975-79
SARIA : IRAT-ORSTOM, 1971-74. Savane arborée claire à épineux Pluie = 850 mm en 2 saisons Sols ferrallitiques sur cuirasse peu profonde	0.7	Pro. 5-8	35 à 43	10 à 37	Pro. 20-30	69-71	40 à 65	Pro. 0.2-0.7	14-35	3-14	Arrivet 73 Roose et al. 1974-79
	1.7	Pat. 10	-	-	Fat. 41	-	-	Pat. 0.17	mo = 20	mo = 7.3	
		Pro. 0,4	-	-	Pro. 1 à 8	-	-	Pro. 0.10	-	-	
Goné / Gampela : CTFT-ORSTOM, 67/74. Savane arborée claire à épineux Pluie = 850 mm en 2 saisons Sols ferrugineux trop. indurés sur granite on profondeur on surface	0.4	FP 2.5 PT 15	-	-	Pro. 1 FP. 8-10 FT. 50-70	-	-	Pro. 0.02-0.05 FP. 0.05-0.15 FT. 0.41	-	-	Roose, Bisot, 70
	0.8	-	-	2 à 45	-	-	50-70 50-70	-	-	-	
Séfa (Sénégal) : IRAT-ORSTOM, 1954-63. Forêt sèche claire Pluie 1200 mm en 2 saisons Sol ferrugineux tropical lessivé à tâches sur granite	1 à ?	Pro. 0.1-1.2 PF 0.3-1.5	25 à 55	8 à 10	-	-	-	Pro. 0.02-0.2 FP. 0.02-0.5	30 à 55	2 à 20	Roose, 67 Charreau, 1972
Anonkamey (Dahomey) : ORSTOM, 1964-69. fourré dense Pluie 1300 mm en 4 saisons Sol ferrallitique/sables III	4.4	0.1 à 0.9	après défrichement 17	20 à 35	2.5	69	70-80	0.3 à 1.2	17 à 28 après défrichement	10 à 85	Verney Volkoff Willaire, 67 Roose, 73,76
Ibadan (Nigeria) : IITA, 1972-73. Savane arbustive dense Pluie 1200 mm en 4 saisons Sol ferrallitique / granite	1	-	31-58	0.1-15	-	70-89	20-40	-	5-10	0-1.6	Lal, 75
	5	-	38-62	3.2-36	-	70-100	40-50	-	43-156	0.1-11	
	10	-	36-57	3.4-26	-	80-94	40-70	-	59-233	0.1-7	
	15	-	30-57	2.9-25	-	70-88	30-60	-	116-229	0.1-43	

Influence du bioclimat et de l'aménagement des sols 293

Pro. = protection intégrale; FP = feux précoces; md = médiane
Pat. = pâturage extensif; FT = feux tardifs; mo = moyenne arithmétique.

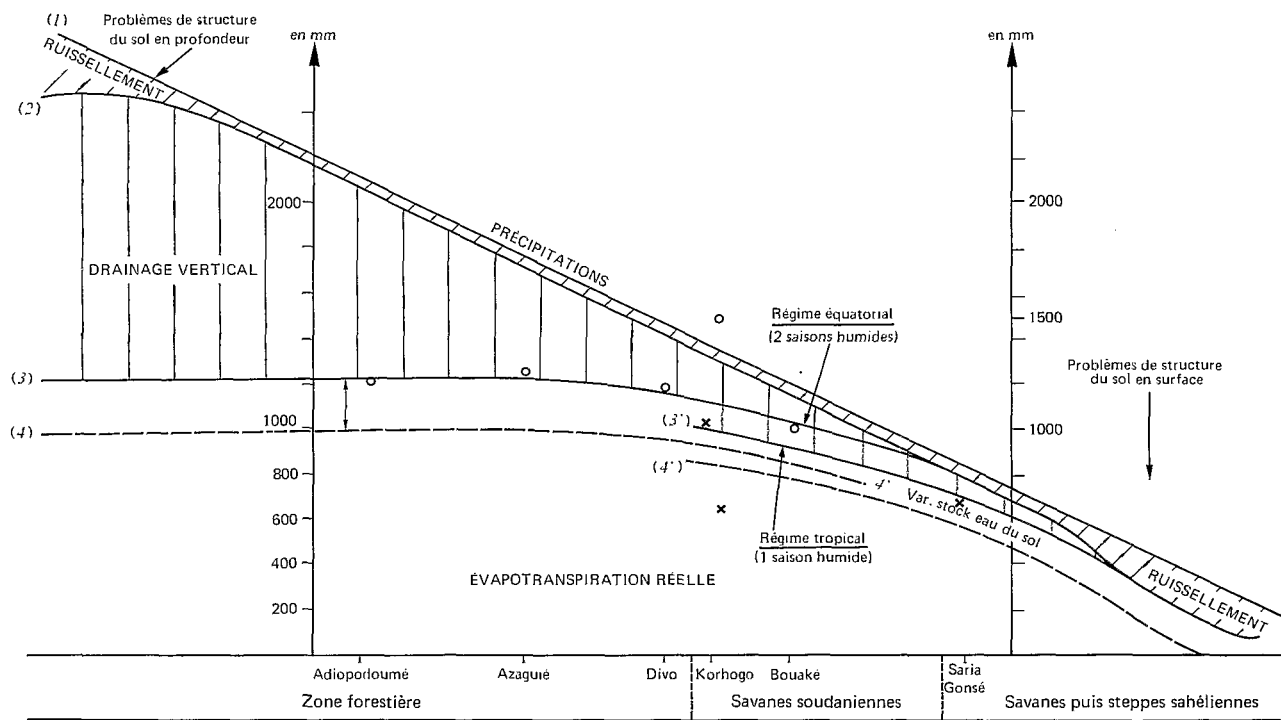


Fig. 5 Evolution du bilan hydrique sous végétation naturelle en fonction du bioclimat en milieu tropical (d'après Roose, 1980).

constante en milieu équatorial (1200-1300 mm) mais augmente rapidement en milieu tropical à mesure que le climat devient plus sec: elle atteint 1700 mm à Korhogo, 1900 mm à Ouagadougou et dépasse 2000 mm en zone sahélienne d'Afrique.

L'évapotranspiration réelle (ETR) corrigée L'ETR prend d'autant plus d'importance relative que le climat est sec; elle augmente de 58% à Adiopodoumé, à 86% à Bouaké, et de 79% à Korhogo (pluies plus concentrées qu'à Bouaké), à 95% à Gonsé (Roose, 1978). En valeur absolue l'évolution est inverse: ETR diminue de la zone humide forestière à la zone sahélienne. La savane herbeuse puise les réserves hydriques du sol beaucoup moins profondément que la forêt: les graminées se dessèchent six semaines après la dernière pluie.

Le drainage profond corrigé Dans le milieu naturel, le drainage profond est d'autant plus important que les précipitations sont abondantes et concentrées sur une brève période de l'année (sol déjà détrempé), que le sol est superficiel (à condition qu'il soit perméable) et sa réserve hydrique limitée et que l'enracinement de la végétation est peu profond. Ainsi, le drainage est plus abondant à Korhogo (sol superficiel et une seule saison des pluies de 5 mois) qu'à Divo (sol forestier avec 11 mois humides), malgré des précipitations annuelles moindres: la saison humide (à fort ETR) y est moins longue et le couvert forestier moins développé.

L'ensemble de ces observations en milieu naturel sont résumées à la Fig.5. La ligne 1 définit la décroissance des précipitations du sud au nord de la zone étudiée. L'espace compris entre les lignes 1 et 2 indique que le ruissellement reste constant dans la zone étudiée, mais qu'il augmente dans les steppes sahéliennes suite au développement des pellicules de battance entre les touffes de végétation. Le ruissellement augmente également en région équatoriale hyperhumide (précipitations supérieures à 3000 mm/an) là où la structure du sous-sol s'effondre (horizon compact) suite à l'abondance du drainage et au soutirage latéral (cf. Collinet, 1971, au Gabon; et en Guyane, Blancaneaux, 1979; et Boulet et al., 1979). L'ETR (espace en dessous de la ligne 4) tend vers l'ETP et reste plus ou moins constante (en valeur absolue) en zone subéquatoriale; elle diminue progressivement en zone tropicale sèche avec la décroissance des précipitations. Les lignes 3 et 4 délimitent l'influence des variations saisonnières du stock d'eau du sol. L'espace compris entre les lignes 2 et 3 montre l'importance croissante du drainage profond en région subéquatoriale et la diminution rapide de l'alimentation des nappes en zone tropicale sèche sahélienne; le seuil d'alimentation de celles-ci par les versants est variable (entre 600 et 700 mm de précipitations annuelles en fonction de la nature du sol).

Influence du type de sol et de la profondeur de l'enracinement
(cf. Tableau 3)

Lorsqu'un sol est mince, sableux ou chargé en éléments grossiers peu poreux, sa capacité de stockage est vite atteinte et l'excédent des eaux infiltrées peut percoler hors de portée des racines. De plus, les sols sableux ont tendance à former en saison sèche un mulch

pulvérisent très sec qui réduit fortement l'évaporation par ascension capillaire. Les sols argileux par contre, se dessèchent d'ordinaire sur toute leur épaisseur (= effet mèche, dont parlent Bourges *et al.*, 1977) à moins qu'une pellicule de battance imperméable ne limite également les échanges gazeux (Valentin, 1981).

L'exemple du Tableau 3 montre l'influence de l'épaisseur du sol sur les éléments du bilan hydrique. Il s'agit de trois sols ferrugineux tropicaux appauvris en surface en particules fines, situés dans la région centre de la Haute-Volta. La cuirasse (assez dégradée et poreuse) est presque affleurante dans la parcelle "protection" à Saria; elle est peu profonde et perméable dans la parcelle "P7", mais elle est très peu perméable et enfouie sous 180 cm de matériaux fins à Gonsé. Ruissellement, pluie et ETP sont du même ordre de grandeur sur les trois parcelles, mais la variation de la réserve hydrique augmente fortement du sol superficiel gravillonnaire (40 mm) au sol argileux profond sur cuirasse (194 mm). L'ETR augmente parallèlement et le drainage corrigé diminue fortement de 20% à 3% du bilan hydrique soit de 165 mm à 25 mm par an (année moyenne) quand la capacité de rétention en eau du sol augmente.

En conséquence l'alimentation des nappes est plus tardive et le seuil d'alimentation des nappes est plus élevé là où existent des sols épais et argileux: le seuil atteint 800 à 850 mm dans le cas du sol profond de Gonsé. Si par ailleurs il existe près de la surface du sol un obstacle (pellicule de battance, semelle de labour ou horizon peu perméable) s'opposant à la pénétration des eaux, c'est le ruissellement superficiel et immédiat qui est favorisé et non pas le drainage profond.

Influence de l'aménagement de la surface des bassins sur le ruissellement et la qualité des eaux

Contrairement à ce qu'on observe en milieu naturel, le ruissellement varie considérablement en milieu cultivé (*cf.* Tableau 4). Il peut rester négligeable (par exemple sous hévéas, palmiers et fruitiers divers cultivés avec un sous-étage de plantes couvrantes, sous prairies et cultures paillées), mais il augmente considérablement (jusqu'à 30-50% des pluies annuelles) sous cultures sarclées couvrant peu la surface du sol comme le maïs, le mil, le sorgho, le coton, l'arachide et le manioc. Quant aux pointes de ruissellement, elles atteignent rarement 20% en milieu naturel mais peuvent dépasser 80% sur sol nu ou mal couvert par les cultures.

Ces variations importantes du ruissellement en fonction de l'aménagement de la surface du sol (couvert végétal + travaux culturaux) peuvent avoir des conséquences sur les autres termes du bilan, conséquences de nature variable en fonction du bioclimat

En milieu subéquatorial C'est essentiellement pendant la saison des pluies, alors que le sol est déjà profondément réhumecté que le ruissellement se développe. L'alimentation hydrique des plantes (donc l'ETR) n'est pratiquement pas concernée par le volume du ruissellement. Par contre, l'augmentation du ruissellement suite à la mise en culture entraîne la diminution de l'écoulement de base. On constate par conséquent une modification des composantes de

l'écoulement (ruissellement immédiat + écoulement de base) plutôt que de son volume total.

En milieu tropical sec Les pluies restent irrégulières et le pouvoir évaporant de l'air est élevé même en saison humide. Par conséquent, la réhumectation profonde du sol est beaucoup plus tardive qu'une région subéquatoriale, si bien que l'ETR ne tend vers l'ETP qu'en fin de saison des pluies. L'augmentation du ruissellement diminue non seulement l'infiltration mais aussi le stockage de l'eau dans le sol, l'alimentation des plantes et donc l'ETR. Finalement, le drainage profond ne se manifeste que tard dans la saison des pluies, et encore, s'il advient une série d'averses suffisamment durables pour saturer la capacité de stockage du sol. C'est pour cette raison, qu'un aménagement visant à améliorer l'infiltration de l'eau favorise davantage la production végétale (donc l'ETR) en zone tropicale sèche qu'en région subéquatoriale.

Quant à l'érosion, transport solide par les eaux de ruissellement, elle augmente de quelques centaines de $\text{kg ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ sous végétation naturelle (rôle actif de la mésofaune) à plusieurs dizaines ou centaines de tonnes de terres par hectare et par an sous culture. Certes, la partie la plus grossière de ces sédiments se dépose avant d'atteindre le réseau hydrographique mais à l'échelle du bassin versant, on observe que les charges solides transportées par les rivières sont considérablement accrues par la mise en culture. Il est donc indéniable que l'utilisation agricole des sols entraîne généralement des effets à la fois sur le régime hydrique et sur la qualité des eaux.

DISCUSSION

Problème d'échelle

Les résultats des bilans hydriques mesurés sur parcelles de quelques centaines de mètres ne sont pas immédiatement transposables à l'échelle du versant et moins encore d'un bassin versant lequel intègre forcément des situations hétérogènes (sol, végétation, topographie, cf. Fig.6). Cependant, il nous a paru intéressant de chercher à comparer nos résultats à ceux obtenus sur de petits bassins versants (de quelques hectares à quelques dizaines de kilomètres carrés) typiques des régions où eurent lieu les observations; les résultats relatifs à ces derniers sont détaillés sur le Tableau 5. Les données disponibles les plus comparables sont résumées au Tableau 6.

On constate une bonne concordance entre les valeurs du déficit d'écoulement mesuré (DE) et celles de l'ETR calculées d'une part et entre les valeurs de coefficient d'écoulement mesurés et la somme en ruissellement et du drainage profond calculé d'autre part. Il existe seulement un écart appréciable à Divo où l'écoulement mesuré sur bassin versant semble parfois plus faible que le drainage profond calculé.

Mais cette convergence générale n'est peut-être qu'apparente; en effet, l'échelle "bassin versant" intègre des phénomènes différents de ceux accessibles à l'échelle "parcelle". En outre le calcul des

Tableau 5 Bilans hydriques sur de petits bassins versants situés entre Abidjan et Ouagadougou. Influence de la superficie, de la roche mère et du bioclimat

BASSINS VERSANTS	Caract. bassin Surface, roche	Végétation	Climat Pluie, ETP	Coefficient KR MAX %	Coef. Ruis. KRAM %	Coefficient écou. KE %	Déficit Ecoulement D.E (mm)	SOURCE
<u>Région AZAGUIE</u>								
. BAFO	26.8Km2/schiste	Forêt dense 90%	Equat.transi- tion P 1800 mm	40 à 60%	-	27 à 32	1200-1300	GIRARD
. SITOU	28.8Km2/schiste	Forêt claire + café			-			SIRCOULON et al.(1971)
. MANSO	92.5Km2/schiste	Forêt dense 70%	ETP 1250 mm					
<u>Région DIVO</u>								
. AMITIDRO								
" total	170Km2/schiste	Forêt dense méso.	Equat. transi- tion P = 1325mm + 300	-	-	2 à 9 (5.3)	940-1620	MATHIEU (1969) et (1972)
" Marigot	2Km2/schiste	" "		15 à 36%	-	3 à 6	1110	
" Ravineau	0.02Km2/schiste	" "	Evaporation bec colorado= 1170 mm	40 à 48%	7	5 à 8	820-1320	
<u>Région BOUAKE</u>								
	26.2Km2/granite	Sav.à ronier 75%	Equat.transi- tion P=1097 à 1270	23%	1.6 à 3.8	7 à 11	996 à 1174	LAFFORGUE (1979)
SAKASSOU	0.55Km2/granite	Sav.ronier 94%	ETP 1200	35%	2.5 à 8.8	10 à 21	996 à 1054	
	0.63Km2/granite	Sav. ronier 57%	ETP 1200	12%	0.8 à 2.7	2.2 à 7.2	1042 à 1245	
		Forêt claire 27%						

<u>Région BOUAKE</u> . KAN à BOUAKE	24.5Km2/granite	Sav.arbust. 65% gal. forestière 20%	Equat.transi- tion P=1202 ±1300 ETP 1200 mm	6 à 10%	-	5 à 15 (11)	870 à 1275 {1068}	DUBREUIL (1960)
<u>Région KORHOGO</u> . FLAKOHO central -Worossantia- kaha	31.5Km2/granite 14Km2/granite Plateau cuir.	Sav.arbus- tive dégradée	Trop.transition " P=1300 ETP 1800 mm	15 à 17% (30%) 3 à 6% (10%)	- -	5 à 23 7 à 20	880 à 1412	DUBREUIL (1960)
<u>Région KORHOGO</u> LOSERIGUE à DOKA	3.63Km2/granite	Sav.arbusti- ve dégradée Cult.20à50%	Trop.transition P=1351 ± 350 ETP = 1640	25 à ((40%))	1.5 à 10	30 à 54	700 à 1000	CAMUS et al.,(1976)
<u>Région OUAGADOU GOU</u> . ZAGTOULI . SELOGEN . KAMBOENSE . OUAGA 1 . NABAGALE . LOUMBILA	11Km2/granite 75Km2/granite 125Km2/granite 285Km2/granite 470Km2/granite 2120Km2/granite	Sav.arborée dégradée Cultures " "	Tropical pur " P = 850 ETP 1900	50 ((60)) 20 ((30)) 15 ((20)) 20 ((30)) 15 ((20)) 20 ((35))		2 à 14(7.8) 5 à 20(12) 0.6 à 5(3.1) 2 à 12(7.1) 3 à 10(6.9) 0.4 à 6.2(3.1)	560 à 770 720 à 800 740 à 870 670 à 770 640 à 960 700 à 780	PIEYNS KLEIN (1964)
<u>Région OUAGADOU GOU</u> . TIKARE II . ANSOUR	2.68Km2/schiste 0.76Km2/quartzite	Sav.arborée + cultures	Trop.sahélien P=725-825mm ETP = 2300	12 ((18%)) 18 ((25))	1 à 5	0.8 à 4.9 2.8 à 6.5	639 à 773 639 à 758	OBERLIN et al.,(1966)

KR: coefficient de ruissellement.

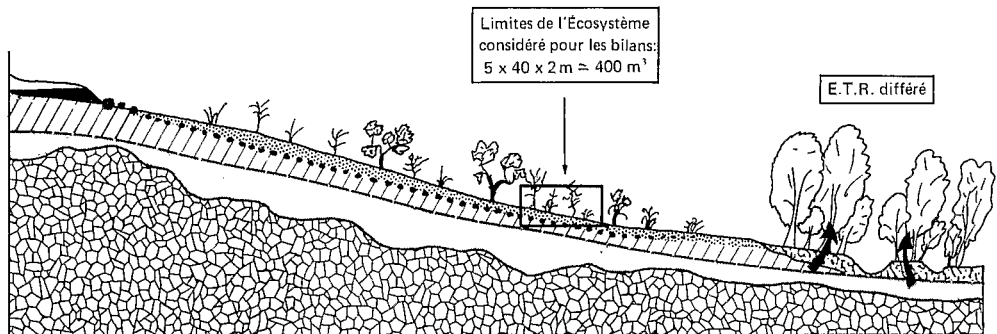
KRAM: coefficient de ruissellement annuel moyen.

Tableau 6 Bilans hydriques de petits bassins versants situés entre Abidjan et Ouagadougou. Influences de l'échelle de mesure de la roche-mère et du bioclimat

Région et couvert végétal	Bassins versants			Parcelles		
	Pluie (mm)	KE (%)	DE (mm)	Drain. (%)	KRAM (%)	ETR (mm)
AZAGUIE Forêt sempervirente	1800	27-32	1200-1300	24	2	1305
DIVO Forêt semi-décidue	1350	2-9	820-1320	4-16	0.5	1204
BOUAKE Savane dense	1200	2-15	870-1275	14	0.3	1028
KORHOGO Savane dégradée par cult.	1350	20-30	700-1400	18	3	1064
OUAGADOUGOU Savane dégradée par cult.	800	1-12	560-850	3-17	2.5	650-810

KE = coefficient d'écoulement = ruissellement + écoulement de base/précipitation.
DE = déficit d'écoulement = précipitation - écoulement.

bilans hydriques induit des erreurs systématiques. Ainsi, on comprend en examinant la Fig.6 que le déficit d'écoulement mesuré sur bassin versant, dans lequel entre l'évapotranspiration différée (pompage de la nappe par la grande végétation des vallées), devrait être normalement plus grand que l'ETR définie à l'échelle de la parcelle sur une tranche de sol de 2 m d'épaisseur. Par ailleurs,



LÉGENDE

- | | |
|--|--|
| | |
| | |
| | |
| | |

10 m
ÉCHELLE
100 m

Fig. 6 Coupe schématique d'un versant en région de savane tropicale. Elle souligne l'effet d'échelle considérée (parcelle ou versant entier) sur le bilan hydrique.

le bilan calculé donne des valeurs de drainage par défaut d'autant plus importantes que le pas de temps de calcul est plus grand et que les précipitations sont plus concentrées; en effet, on postule dans les calculs que les précipitations sont réparties uniformément sur toute la période du pas de temps adoptée; ceci majore la valeur de l'ETR et diminue celle du drainage. La convergence entre les résultats à l'échelle bassin et à l'échelle parcelle pourrait donc être due au fait que les deux causes d'erreur susceptibles d'intervenir dans le bilan calculé sont de sens opposé et se compensent.

Les bilans calculés n'ont donc pas une valeur absolue très précise. Mais ils conservent un intérêt comparatif: ils permettent de prévoir le sens sinon l'ampleur des variations des termes du bilan quand on passe d'une zone bioclimatique à l'autre, et du milieu naturel au milieu aménagé. La similitude des ordres de grandeur des deux types de bilan suggère également que la portion de versant correspondant à la parcelle expérimentale est représentative du point de vue fonctionnement hydrique de la majorité du bassin versant.

Rôle de l'aménagement de la surface du sol

Nous avons vu le rôle joué par la forêt dans le bilan hydrique en fonction du type de climat à l'échelle de parcelles et probablement des bassins versants. Le rôle de régulation des écoulements (diminution du ruissellement et des crues, soutien des étiages) est le plus apparent. Cependant, l'influence du couvert forestier sur l'écoulement global (ruissellement + écoulement retardé) n'est pas évident. Récemment Garczynski (1980, 1981), étudiant les résultats disponibles sur 141 bassins du nord-est des USA, 29 bassins de l'ouest de l'Oregon, 16 bassins du sud-ouest de la California, de cinq bassins de la Pologne et de quelques bassins français, montre par des régressions multiples qu'au-delà d'une certaine limite, variable d'une région à l'autre, l'influence de la forêt sur l'écoulement global cesse d'être négative, ce qui pourrait s'expliquer soit par l'émergence vers l'aval des bassins d'eaux infiltrées à l'amont, soit par l'existence de précipitations occultes plus abondantes sous forêts qu'à l'écart de celles-ci; ces précipitations ne sont jamais prises en compte dans les bilans hydrologiques (Aussenac, 1970).

Les résultats acquis dans cette note donnant à penser qu'il existe d'autres facteurs que le taux de recouvrement forestier et la taille du bassin conditionnant l'importance des termes du bilan hydrologique:

- type de végétation: forêt et/ou culture;
- nature, profondeur et état de surface des sols;
- répartition des précipitations.

Ainsi, il est probable que le rôle hydrologique d'une maigre forêt méditerranéenne dégradée par les feux, végétant sur un sol peu profond, et arrosée surtout en dehors de la saison de croissance est moins marqué que celui d'une futaie tempérée et à fortiori que celui d'une forêt dense équatoriale sur des sols profonds.

En milieu équatorial

On a vu que l'augmentation du ruissellement liée à la mise en culture

n'entraîne pas de grosse diminution de l'ETR, la différence de l'ordre de 100-200 mm an⁻¹ étant due à la profondeur d'enracinement.

A Madagascar, Bailly *et al.* (1974) obtiennent des résultats analogues sur bassins versants de 1 à 101 ha, dans la zone forestière d'altitude du Périnet. Ainsi, l'écoulement total d'un bassin recouvert de brousse après une courte période de cultures dépasse d'une centaine de mm seulement celui d'un bassin forestier de même taille et de 250 mm celui d'un bassin couvert de vieux eucalyptus. Les débits des crues exceptionnelles sont de 1.5 à 2 fois plus forts sous végétation dégradée que sous forêt; le ruissellement est nettement plus élevé sous cultures traditionnelles, que sous forêt et même que sous culture modernisée (rotation, engrais, travail du sol et terrassement de diversion).

En milieu tropical humide

L'exemple étudié à Korhogo montre outre une forte augmentation du ruissellement entre savane et culture, une certaine majoration du drainage sous maïs. Mais la comparaison est faussée car la savane est déjà dégradée et la forêt sèche climatique n'existe plus dans la zone concernée. Des études semblables ont été faites au Sénégal (Charreau & Fauck, 1970; Roose, 1968), sur les parcelles d'érosion de Séfa en Casamance (1954-1968) où les précipitations s'élèvent à 1300 mm en moyenne et sont groupées sur 6 mois et les sols ferrugineux tropicaux sont profonds.

Tableau 7 Variation du ruissellement et de l'érosion en fonction de l'utilisation du sol (d'après Charreau *et al.*, 1968)

	Ruissellement annuel (% des pluies)	Erosion (t ha ⁻¹ an ⁻¹)
Forêt sèche	1	0.18
Jachères herbacées	17	4.88
Cultures (mil, sorgho, coton, riz, arachide)	21	7.3
Sol nu	40	50

Les résultats présents au Tableau 7 montrent la très forte influence de l'utilisation du sol sur le ruissellement (rapport 1 à 40) et sur l'érosion (rapport 1 à 295). Charreau précise que se sont les techniques culturales (labours) associées à chaque culture qui ont une influence réelle sur l'infiltration de l'eau, plutôt que le type de couvert végétal. L'infiltration étant inférieure d'environ 20% sous culture et savane par rapport à la forêt, on aurait pu craindre un assèchement progressif des grandes zones défrichées (10 000 ha d'un seul tenant à la Sodaica) et un abaissement de la nappe phréatique. Or, en réalité le niveau de la nappe s'est élevé de 8 m en 20 ans, donnant naissance à des sources nouvelles (Charreau & Fauck, 1970). Charreau pense que c'est la réduction de l'ETR dans les champs en saison sèche qui paraît finalement être le mécanisme déterminant de ce changement du régime

hydrologique. Dès qu'ils sont débarassés des récoltes, les champs cessent rapidement d'évaporer, car il se forme un mulch naturel réduisant les échanges gazeux. Au contraire la forêt continue à puiser de plus en plus profondément les réserves hydriques du sol. La réduction de l'ETR sous culture serait de l'ordre de 160 mm.

Dagg & Blackie (1965) ont abouti à des conclusions analogues en Afrique de l'Est. Les bassins cultivés sur oxysols donnent 450 mm d'écoulement en plus que les bassins forestiers, d'une part parce que le ruissellement est important sous culture et d'autre part parce que la forêt continue à pomper l'eau en profondeur dans le sol alors que les cultures annuelles sont mortes.

En milieu tropical sec

On a vu que l'augmentation du ruissellement liée à la mise en culture entraîne à la fois la diminution de l'ETR et du drainage: ce double effet ressort clairement du Tableau 8 rapportant les résultats de

Tableau 8 Bilans hydriques en année normale, sèche et humide sur la parcelle P7 de Saria (Haute-Volta)

	Sèche	Année normale	Humide
Pluie (mm)	617	826	1076
Ruiss. KRAM (%):			
Sav.	4%	5%	8%
Sorgho	20%	25%	30%
ETR corrigé (%):			
Sav.	<u>93</u>	<u>78</u>	<u>54</u>
Sorgho	<u>80</u>	<u>72</u>	<u>52</u>
Drain. corr. (%) au-delà de 60 cm de fréquence décennale:			
Sav.	3	17	<u>38</u>
Sorgho	0	2.5	<u>18</u>

mesures (sur parcelles) à Saria (Roose *et al.*, 1979). On remarque que la diminution porte plus sur le drainage en année décennale humide (1076 mm de pluie) et plus sur l'ETR en année décennale sèche (617 mm de pluie).

Remarquons qu'en se déplaçant vers la zone aride, on atteint un domaine où l'alimentation des nappes phréatiques est discontinue dans le temps (années humides) et dans l'espace (zones sableuses, gravillonnaires et les bas-fonds).

Il existe probablement des gradations semblables dans d'autres zones bioclimatiques. Ainsi, en Tunisie sous climat méditerranéen subhumide, à saisons très contrastées, Delhumeau (1981) a suivi les variations saisonnières du stock du sol sous trois types de maquis plus ou moins dégradés et sous une plantation d'eucalyptus de 15 ans. Il constate que sur ces sols lessivés hydromorphes, profonds, les fluctuations d'humidité sont très grandes (400 mm sur 240 cm de profondeur de sol) au regard de la pluviosité (800 mm). Au cours

des quatre années de mesure, les sols ont atteint l'hiver le même état de saturation en eau sauf la parcelle sous eucalyptus où la consommation d'eau ne permet pas une reconstitution complète des stocks. En été, il a observé un dessèchement du sol d'autant plus précoce et prononcé que le couvert végétal forestier est développé. Malgré les fortes intensités des averses, le ruissellement et le drainage sont réduits sous maquis peu dégradé et les écoulements s'annulent sous forêt: toute l'eau disponible est évapotranspirée. Ce cas peut être rapproché de celui de Séfa.

Enfin dans la région de Gabès (Sud tunisien) sous climat méditerranéen aride, en général et en année moyenne, il semble que toute l'eau infiltrée est évapotranspirée. Lors des averses de fréquence rare ($F \leq 1/50$) il peut arriver qu'en certains sites les eaux infiltrées parviennent à alimenter les nappes. Les précipitations sont faibles (180 mm par an en moyenne) mais très irrégulières (250 mm en 18 h le 12 décembre 1973). La végétation naturelle est une steppe à Armoise, composée de quelques plantes pérennes et d'herbes annuelles dont le développement dépend de l'importance des pluies. Le ruissellement sur ces sols peut atteindre 10 à 20% l'an et 60 à 85% lors des averses importantes. Dans les zones à sols limono-argileux profonds, toute l'eau infiltrée est finalement évapotranspirée et il n'y a pas d'alimentation de nappe (Bourges *et al.*, 1977) contrairement aux zones à sols très sableux qui peuvent former un mulch protecteur (Colombani *et al.*, 1980). Seule la concentration dans les oueds des eaux ruisselantes sur les versants et l'épandage ultérieur des crues dans des sites privilégiés des plaines permettant d'accumuler assez d'eau dans le sol pour réaliser une certaine forme d'agriculture.

A travers tous ces exemples on voit combien l'impact de la mise en culture sur le bilan hydrologique est nuancé, en fonction des conditions bioclimatiques et pédologiques.

CONCLUSION

L'ensemble des résultats exposés montre, dans la séquence bioclimatique étudiée (climat équatorial de basse Côte d'Ivoire à climat tropical sec de Haute-Volta centrale), la forte influence du type de bioclimat sur la valeur des termes du bilan hydrique.

(a) *En milieu naturel* (forêt humide à savane) le ruissellement reste toujours faible, inférieur à quelques pourcents du bilan total. Par ailleurs le drainage profond, permettant l'alimentation directe des nappes par les versants, tend vers zéro quand les précipitations descendent au-dessous de 700 à 900 mm par an.

(b) *En milieu dégradé*, notamment par suite de l'utilisation agricole du sol, le ruissellement augmente considérablement mais cette augmentation s'accompagne de modifications des termes du bilan hydrique, variables selon le type de bioclimat (*cf.* Tableau 9). On voit en particulier que le drainage profond, alimentant les nappes souterraines et l'écoulement de base, peut diminuer ou augmenter selon les cas, en fonction de l'intensité de la diminution de l'ETR.

La nature du sol dont dépend la réserve hydrique mobilisable par les plantes influence aussi beaucoup l'importance des termes des bilans hydriques. Cette réserve diminue normalement du sud au nord

Tableau 9

	Ruissel- lement	ETR	Drainage et écoulement de base	Écoulement total
Milieu équatorial (Abidjan)	↗↗	~ ou ↘	↘	~ ou ↗
Milieu tropical humide (Korhogo)	↗↗	↘↘	↗	↗↗
Milieu tropical sec (Ouagadougou)	↗↗	↘	↘	↗

Effet de la destruction de la végétation naturelle et
de la mise en culture sur les éléments du bilan hydrique

de la séquence bioclimatique étudiée en relation avec la diminution de la profondeur de l'altération. Cependant à l'intérieur d'une zone bioclimatique, il existe de fortes fluctuations de la réserve hydrique du sol selon les conditions lithologiques et géomorphologiques: le seuil de précipitations annuelles nécessaire pour assurer le drainage profond diminue par exemple de 150 à 200 mm en zone tropicale sèche, soit 20% à 25% du bilan hydrique, si l'on passe de sols profonds à horizons argileux à des sols squelettiques.

L'augmentation du ruissellement lié à la mise en culture entraîne de surcroît des changements considérables de la qualité des eaux et notamment de leur charge solide, donc de l'érosion.

Les mêmes tendances semblent se manifester également dans d'autres zones climatiques où la ressource en eau est également précieuse (zone méditerranéenne notamment). Il peut en résulter certains conflits au niveau des choix d'aménagement entre le point de vue de ceux qui privilégient l'augmentation de l'écoulement total, pour le remplissage de barrage par exemple, et ceux qui veulent favoriser la production végétale et/ou l'alimentation des aquifères.

REMERCIEMENTS Plusieurs organismes du Groupement de Recherches et d'Etudes en vue du Développement de l'Agriculture Tropicale (GERDAT) ont été associés au programme de dynamique actuelle des sols de l'ORSTOM, dont on a tiré ici les principaux résultats hydrologiques.

Nous remercions de leur coopération le Centre Technique Forestier Tropical, l'Institut Français du Café et du Cacao, l'Institut de Recherches Agronomiques Tropicales, l'Institut de Recherches sur les Fruits et Agrumes et l'Institut de Recherche sur le Caoutchouc en Afrique.

REFERENCES

- Amerman, C.R. & McGuinness, J.L. (1967) Plot and small watershed runoff: its relation to larger areas. *Am. Soc. Agric. Engrs Trans.* 10 (4), 464-466.
- Arrivets, J., Roose, E. & Carlier, P. (1973) Etude du ruissellement,

- du drainage et de l'érosion sur des sols ferrugineux de la région centre Haute-Volta (station de Saria). Dispositif d'étude et premiers résultats (1971) - Annexes. Rapport IRAT/HV - ORSTOM/ C.I. 85 + 88 p.
- Aussenac, G. (1970) Aperçu du rôle de la forêt dans l'économie de l'eau. *Rev. Forest. Française (Nancy)* 22 (6), 603-618.
- Bailly, C., Benoit de Coignac, G., Malvos, C., Ningre, J.M. & Sarrailh, J.M. (1974) Etude de l'influence du couvert naturel et des modifications à Madagascar. Expérimentation en bassins versants élémentaires. Dans: *Cahiers Scientifiques du CTFT no.4*.
- Bertrand, R. (1967) Etude de l'érosion hydrique et de la conservation des eaux et du sol en pays Baoulé. *Coll. sur la Fertilité des Sols Tropicaux* (Tananarive, novembre 1967), no. 106, 1281-1295.
- Blancaneaux, Ph. (1979) Dynamique de sols ferrallitiques sur granito-gneiss en Guyane française. Relation avec l'érosion, le ruissellement et le lessivage oblique. *Rapport ORSTOM*.
- Bois, J.F. & Roose, E.J. (1978) Quelques réflexions sur les résultats de mesures systématiques d'humidité à la sonde à neutrons dans un sol ferrallitique forestier de basse Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.* 15 (4), 351-363.
- Boulet, R., Brugiere, J.M. & Humbel, F.X. (1979) Relations entre organisation des sols et dynamique de l'eau en Guyane française septentrionale. Conséquences agronomiques d'une évolution déterminée par un déséquilibre d'origine principalement tectonique. *Science du Sol*, 3-18.
- Bourges, J., Floret, C. & Pontanier, R. (1977) *Etude d'un Milieu Représentatif du Sud Tunisien (type Segui): Citerne Telman, 1972-1974*. ORSTOM Tunis/Min. Agricult. Tunisie.
- Boutrais, J. (1979) *Le Nord Cameroun - Bilan de Dix Ans de Recherche - I - le milieu naturel*, 8-116. Onarest, Yaoundé.
- 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 1962-1972). *Travaux et Documents ORSTOM Paris no. 52*.
- Charreau, C. & Fauck, R. (1970) Mise au point sur l'utilisation agricole des sols de la région de Séfa. *Agron. Trop.* 25 (2), 151-191.
- Charreau, C. (1972) Problèmes posés par l'utilisation agricole des sols tropicaux par des cultures annuelles. *Agron. Trop.* 27 (9), 905-929.
- Collinet, J. (1971) Premiers résultats de l'exploitation d'une parcelle de lessivage oblique dans la région de Libreville (Gabon). Rapport ORSTOM, Libreville.
- Colombani, J., Vachaud, G. & Vauclin, M. (1981) Bilan hydrique dans le Sud tunisien. Caractérisation expérimentale des transports dans la zone non saturée. *J. Hydrol.* 49, 53-73.
- Dagg, M. & Blackie, J.R. (1965) Studies of the effects of changes in land use on the hydrological cycle in East Africa by means of experimental catchment areas. *Bull. IASH* 10 (4), 63-75.
- Delhumeau, M. (1981) Etude de la dynamique de l'eau sur parcelles du bassin versant de l'oued Sidi Ben Nasseur (Nord Tunisie). *Minist. Agricult. Tunisie/ORSTOM Tunis, no. ES 185*.
- Dunne, T. (1979) Sediment yield and land use in tropical catchments.

- J. Hydrol.* 42, 281-300.
- Eldin, M. (1971) Le climat. Dans: *Le Milieu Naturel de la Côte d'Ivoire*, 77-108. Mém. ORSTOM Paris, no. 50.
- Fairbourn, M.L., Rauzi, F. & Gardner, H.R. (1972) Harvesting precipitation for a dependable economical water supply. *J. Soil Wat. Conserv.* 27 (1), 23-26.
- Fink, D.H. & Frasier, G.W. (1975) Water harvesting from watersheds treated for water repellency. Dans: *Soil Conditioner*, chap. 17, 173-186. SSSA Special Publ. no.7.
- Fournier F. (1954) La parcelle expérimentale. Méthode d'étude expérimentale de la conservation du sol, de l'érosion et du ruissellement. Extrait du rapport de la mission OECE. *Etude des Sols aux Etats-Unis* (T.A. 38-63). ORSTOM, Bondy.
- Fournier, F. (1967) La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain. *Sols Africains* 12 (1), 5-53.
- Garczynski, F. (1978) Effets comparés des couverts végétaux sur la qualité, la quantité et la régularité des écoulements sur les versants et dans les cours d'eau. Dans: *XV Journées de l'Hydrologie* (Toulouse, 5-7 sept. 1978), question 5, rapport 4.
- Garczynski, F. (1980) Influence du taux de boisement sur le régime hydrologique dans trois régions des USA (corrélations multiples). Dans: *L'Influence de l'Homme sur la Régime Hydrologique* (Actes du Colloque d'Helsinki, juin 1980), 67-74. IAHS Publ. no. 130.
- Garczynski, F. (1981) Régularisation du régime hydrologique par la forêt en fonction de la taille du bassin. Colloque sur la Recherche sur les Petits Bassins Versants Torrentiels (FAO/IUFRO Grenoble, juin 1981).
- Harrold, L.L., Brakensiek, D.L., McGuinness, J.L., Amerman, C.R. & Dreibelbis, F.R. (1962) Influence of land use and treatment of the hydrology of small watersheds at Coshocton, Ohio, 1938-57. *USDA Tech. Bull. no. 1256*.
- Heusch, B. (1970) L'érosion du Pré-Rif. Une étude quantitative de l'érosion hydraulique dans les collines marneuses du Pré-Rif occidental. *Ann. Recherche Forestière au Maroc* 12, 9-176.
- Hibbert, A.R. (1965) Forest treatment effects on water yield. Symposium Internat. sur l'Hydrologie Forestière (Pennsylvanie, USA).
- Holtan, H.N. & Creitz, N.R. (1968) Influence of soils, vegetation and geomorphology on elements of the flood hydrograph. Rapport USDA-ARS.
- Ibiza, D. (1976) Bilan hydrique sous prairies naturelles et artificielles. Bassins versants expérimentaux d'Ambatomainty. Campagne 1974-75. Effet de la mise en valeur. Rapport ORSTOM/CTPT/IEMVT Tananarive.
- Ingebo, P.A. (1972) Hydrology and water resources in Arizona and the South West. Dans: *Proc. of the 1972 Meeting of the Arizona section AWRA and the Hydrology Section Arizona Acad. of Sciences*, vol. 2, 181-192.
- Kalms, J.M. (1975) Influence des techniques culturelles sur l'érosion et le ruissellement en région centre de Côte d'Ivoire. Colloque sur la Conservation et l'Aménagement du Sol dans les Tropiques Humides (Abadan, 30 juin-4 juillet 1975).
- Kowal, J. (1972) The hydrology of a small catchment basin at Samaru, Nigeria. III. Assessment of surface run-off under varied land

- management and vegetation cover. *Samaru Res. Bull.* 149, 120-133.
- Lal, R. (1975) *Soil Erosion Problems on an Alfisol in Western Nigeria and their Control*. IITA Monograph no. 1, Ibadan.
- Lenoir, F., Mathieu, P. & Monnet, Cl. (1976) Bilan d'érosion chimique et mécanique sur un bassin versant de Côte d'Ivoire (Bassin du Bandma). 3ème Conf. Géol. Africaine (Khartoum, 3-17 janvier 1976).
- Monteny & Eldin (1977) Données agroclimatiques recueillies à la station ORSTOM d'Adiopodoumé: 1948-1976. ORSTOM, Abidjan, Côte d'Ivoire.
- Rakhmanov, V.V. (1970) Dependence of stream flow upon the percentage of forest cover of catchments. Symposium sur les Influence de la Forêt et de l'Aménagement des Bassins Versants (Moscou), 55.
- Rapp, A., Berry, L. & Temple P. (1972) Erosion and sedimentation in Tanzania. *Geogr. Ann.* 54A (3 et 4).
- Roche, M.A. (1978) Les bassins versants expérimentaux ECEREX en Guyane Française. Etude comparative des écoulements et de l'érosion sous forêt tropicale humide. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.* 15 (4), 365-378.
- Roose, E.J. (1967) Dix années de mesure de l'érosion et du ruissellement au Sénégal. *Agron. Trop.* 22 123-152.
- Roose, E.J. (1968) Un dispositif de mesure du lessivage oblique dans les sols en place. *Cah. ORSTOM, Série Pédol.* 6 (2), 235-249.
- Roose, E.J. (1970) Importance relative de l'érosion, du drainage oblique et vertical dans la pédogenèse actuelle d'un sol ferrallitique de moyenne Côte d'Ivoire. Deux années de mesure sur parcelle expérimentale. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* 7 (4), 469-482.
- 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. Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical. Thèse Doct. Ing. Fac. Sci. Abidjan, ORSTOM Abidjan.
- Roose, E.J. (1974) Conséquences hydrologiques des aménagements antiérosifs. Dans: *XIII Journées de l'Hydraulique* (Paris, sept. 1974), question 3, rapport 10.
- Roose, E.J. (1976) Conservation des eaux et du sol en vue de l'intensification de l'exploitation de l'espace agricole tropical. Dans: *Colloque Seneca sur l'Eau et les Activités Agricoles* (Paris, 3-5 mars 1976). Communication 322.
- Roose, E.J. (1977) Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest. Vingt années de mesures en petites parcelles expérimentales. *Travaux et Documents de l'ORSTOM Paris, no. 78.*
- Roose, E.J. (1978) Pédogenèse actuelle d'un sol ferrugineux complexe issu de granite sous une savane arborescente du Centre Haute-Volta. Gonsé: campagnes 1968 à 1974. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* 16 (2), 193-223.
- 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: 1967-1975) *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* 17 (2), 81-118.
- Roose, E.J. (1980) Dynamique actuelle d'un sol ferrallitique sablo-argileux très désaturé, sous cultures et sous forêt dense humide subéquatoriale du Sud de la Côte d'Ivoire. Adiapodoumé: 1964-1975. ORSTOM, Paris.

- Roose, E.J. (1980) Dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Etude expérimentale des transferts hydrologiques et biologiques de matières sous végétations naturelles ou cultivées. *ORSTOM Paris, sér. Travaux et Documents no. 130*. Thèse Doct. es-Sciences, Univ. Orléans.
- Roose, E.J. & Godefroy, J. (1977) Pédogenèse actuelle comparée d'un sol ferrallitique remanié sur schiste sous forêt et sous une bananeraie fertilisée de basse Côte d'Ivoire. Azaguié: 1966 à 73. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.* 15 (4), 409-436.
- Roose, E.J., Henry des Tureaux, P. (1970) Deux méthodes de mesure du drainage vertical dans les sols en place. *Agron. Trop.* 25 (12), 1079-1087.
- Roose, E.J. & Lelong, F. (1976) Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale. Etudes sur petites parcelles expérimentales. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn.* 18 (4), 365-374.
- Roose, E.J. et al. (1970) Erosion, ruissellement et lessivage oblique dans une plantation d'hévéa en basse Côte d'Ivoire. III - Résultats des campagnes 1967-68-69. ORSTOM/IRCA Abidjan.
- Roose, E.J. et al. (1979) Dynamique actuelle de deux sols ferrugineux tropicaux indurés sous sorgho et sous savane soudano-sahélienne. Saria (Haute-Volta: campagnes 1971-1974). ORSTOM, Paris.
- Roose, E.J., Fauck, R., Lelong, F. & Pedro, G. (1981) Sur l'importance des transferts en phase solide dans la dynamique actuelle de sols ferrallitiques et ferrugineux d'Afrique Occidentale. Cas des milieux sous végétation naturelle. *C.R. Acad. Sci Paris* 292, série II, 1323-1328.
- Sartz, R.S. & Tolsted, D.N. (1974) Effect of grazing on runoff from two small watersheds in Southwestern Wisconsin. *Wat. Resour. Res.* 10 (2), 354-356.
- Thorntwaite, C.W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 55-94.
- Turc, L. (1961) Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Formule climatique simplifiée et mise à jour. *Ann. Agron.* 12 (1), 13-49.
- Valentin, C. (1981) Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (Agadez, Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau. Thèse 3ème cycle Paris VII.
- Verney, R., Volkoff, B. & Willaime, P. (1967) *Etude de l'Erosion sur Terres de Barre. Comparaison sol nu-jachère arbustive.* Année 1965. ORSTOM, Cotonou.
- Vuillaume, G. (1968) Premiers résultats d'une étude analytique du ruissellement et de l'érosion en zone sahélienne. Bassin Représentatif de Kountkouzout (Niger). *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.* 5 (2), 33-56.
- Wischmeier, W.H. (1966) Surface runoff in relation to physical and management factors. Dans: *Proceedings, First Pan American Soil Conservation Congress* (Sao Paulo, Brasil), 237-244.

Reçu 31 août 1982.