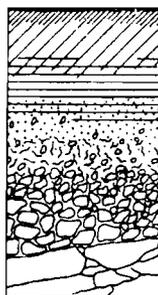


R. POSS
H. SARAGONI
A. FORGET

LA PÉNÉTRATION DE L'EAU DANS
LES TERRES DE BARRE :
ANALYSE DES COMPORTEMENTS
SOUS SIMULATION DE PLUIE
ET INTERPRÉTATION MORPHOLOGIQUE



INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION (ORSTOM)
Centre de LOME

INSTITUT DE RECHERCHES AGRONOMIQUES TROPICALES (IRAT)

MINISTÈRE DU DEVELOPPEMENT RURAL
DIRECTION DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

SEPTEMBRE 1988

LA PENETRATION DE L'EAU DANS LES TERRES DE BARRE :
ANALYSE DES COMPORTEMENTS SOUS SIMULATION DE PLUIE
ET INTERPRETATION MORPHOLOGIQUE

R.POSS*, H.SARAGONI** ET A.FORGET*

* ORSTOM BP 375 Lomé Togo

** IRAT/DRA BP 1163 et 2318 Lomé Togo

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 QUELQUES RESULTATS OBTENUS AU BENIN	3
CHAPITRE 2 MATERIEL ET METHODES	
2.1 L'infiltromètre à aspersion	5
2.2 Les parcelles étudiées	6
2.3 Les protocoles	7
CHAPITRE 3 ETUDE DES COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT	
3.1 Résultats	11
3.1.1 Parcelles sous forêt	11
3.1.2 Parcelles cultivées et après jachère	11
3.1.2.1 Parcelle avec mulch d'herbe	11
3.1.2.2 Parcelle après jachère non retravaillée	11
3.1.2.3 Parcelle après jachère labourée planée	13
3.1.2.4 Parcelles sur champ cultivé	13
3.1.3 Les parcelles labourées billonnées	14
3.2 Interprétation	15
3.4 Conclusion	16
CHAPITRE 4 ETUDE DES PLUIES D'IMBIBITION	
4.1 Parcelles labourées planées (parcelles 41 à 43)	17
4.2 Parcelles labourées billonnées (parcelles 51 à 53)	17
4.3 Parcelles sous forêt	19
4.4 Parcelles en jachère et cultivées	19
4.5 Conclusion	19
CHAPITRE 5 ETUDE DES INTENSITES D'INFILTRATION	
5.1 Remarques méthodologiques	21
5.1.1 Détermination de l'intensité d'infiltration	21
5.1.2 Stabilité de l'intensité d'infiltration	22
5.1.3 Influence des temps d'arrêt (Ta)	23
5.1.4 Conclusion	24
5.2 Parcelles labourées planées	25
5.2.1 Parcelles sous forêt (parcelles 11 à 13)	25
5.2.2 Parcelles avec pluies en créneau	26
5.2.3 Parcelles avec pluies d'intensité constante	28
5.2.4 Conclusion	31
5.3 Etude des parcelles en sol non retravaillé	32
5.4 Etude des parcelles sur sol labouré billonné	34
5.5 Conclusion	36

CHAPITRE 6 ETUDE DE LA DETACHABILITE

6.1 Détachabilité totale de chaque pluie	39
6.1.1 Parcelles sous forêt	39
6.1.2 Parcelles après jachère et cultivées	39
6.1.3 Parcelles labourées planées	41
6.1.4 Parcelles billonnées	41
6.1.5 Conclusion	41
6.2 Relations entre la turbidité, le ruissellement et le micro-relief	42
6.2.1 Problèmes méthodologiques	42
6.2.2 Résultats et discussion	45
6.3 Conclusion	46

CHAPITRE 7 ETUDE DE LA GRANULOMETRIE DES MATERIAUX ENTRAINES

7.1 Problèmes méthodologiques	47
7.2 Parcelles labourées planées	49
7.2.1 Matière organique	49
7.2.2 Argile	50
7.2.3 Limons fins	50
7.2.4 Limons grossiers	50
7.2.5 Sables fins et sables grossiers	50
7.3 Parcelles billonnées	51
7.4 Conclusion	51

CHAPITRE 8 EVOLUTION DE L'ETAT DE SURFACE DU SOL AU COURS DES PLUIES SIMULEES

8.1 Evolution des parcelles labourées planées	53
8.1.1 Etat initial	53
8.1.2 Phase d'imbibition	54
8.1.3 Evolution au cours de la première pluie	55
8.1.4 Evolution au cours des pluies successives	57
8.2 Evolution de l'état de surface des parcelles billonnées	59
8.2.1 Etat initial	59
8.2.2 Phase d'imbibition	59
8.2.3 Evolution au cours de la première pluie	59
8.2.4 Evolution au cours des pluies successives	60
8.3 Evolution de l'état de surface des parcelles non retravaillées	61
8.3.1 Etat initial	61
8.3.2 Evolution au cours des pluies	61
8.4 Conclusion	63

CHAPITRE 9 INTERPRETATION DES RESULTATS HYDRODYNAMIQUES EN FONCTION DE LA DYNAMIQUE DES ETATS DE SURFACE

9.1 Parcelles labourées planées	65
9.2 Parcelles billonnées	67
9.3 Conclusion	67

CONCLUSION GENERALE 69

BIBLIOGRAPHIE 71

INTRODUCTION

Les terres de Barre sont des sols ferrallitiques rouges sans éléments grossiers largement répandus au sud-Togo et au sud-Bénin, où les densités de population atteignent parfois plusieurs centaines d'habitants au kilomètre carré. Les phénomènes de ruissellement et d'érosion sont extrêmement limités lorsque l'exploitation du milieu reste faible. Ils augmentent de façon alarmante, même sur pentes faibles, lorsque les champs sont cultivés continuellement sans jachères depuis plusieurs dizaines d'années.

Pour étudier le phénomène, l'ORSTOM avait mis en place en 1964 à Cotonou des parcelles d'érosion de 30X10 mètres, qui sont toujours étudiées par les pédologues béninois. Elles ont permis de suivre l'évolution du ruissellement et de l'érosion depuis un sol sous jachère de longue durée jusqu'à un sol exploité de manière continue depuis 25 ans. L'apport de ce dispositif à la connaissance du comportement des terres de Barre a été considérable, mais, comme tous les dispositifs permettant d'étudier les comportements sous pluie naturelle, il ne permet pas d'approcher les phénomènes élémentaires, car les intensités au cours des averses ne sont jamais constantes. Nous avons donc cherché à caractériser le comportement des terres de Barre du Togo, non pas par un suivi de longue durée, mais par une série de mesures rapprochées dans le temps sur des parcelles de 1.m² caractérisant différents niveaux d'exploitation du milieu. L'expérimentation a été conduite à l'aide du mini-simulateur de pluie mis au point par ASSELINE et VALENTIN (1978), qui permet de réaliser des averses d'intensités connues comprises entre 30 mm.h⁻¹ et 140 mm.h⁻¹, avec des énergies cinétiques comparables à celles des pluies naturelles. Les résultats obtenus seront comparés à ceux du Bénin et interprétés en fonction des observations réalisées au cours des pluies et de l'organisation du sol aux échelles macro et microscopiques.

CHAPITRE 1

QUELQUES RESULTATS OBTENUS AU BENIN

Des rapports de campagne (VERNEY et al., 1967, 1968, 1969 et 1970) et des deux rapports de synthèse principaux (AALDERS, 1977; AZONTONDE et al., 1987) ressortent les faits suivants:

- Sur une jachère de 4 ans, la lame ruisselée est inférieure, sur l'année, à 1% du total de la lame précipitée, et l'érosion est négligeable (campagnes 1964 et 1965). Avec une bonne couverture du sol (plantes de couverture) le ruissellement reste inférieur à 5% du total annuel, avec des érosions toujours inférieures à 3,5 t.ha⁻¹.an⁻¹ (AZONTONDE et al.). L'association des cultures diminue le ruissellement par rapport à une culture pure qui couvre mal le sol.

- Un an après la défriche, la lame ruisselée d'un sol labouré est le double de celle d'un sol non labouré, mais cette différence disparaît entièrement à partir de la deuxième année (rapports 1967, 1968 et 1969). L'érosion n'est pas non plus significativement différente entre la parcelle labourée et la parcelle non labourée à partir de la deuxième année après la défriche,

- La culture sur buttes ne modifie pas le volume du ruissellement par rapport au labour à plat, mais l'érosion est augmentée de 30 à 50% (rapports 1966 et 1967),

- La culture en billons isohypses est très efficace pour lutter contre le ruissellement et l'érosion, mais il arrive que les billons cèdent lors des très grosses pluies (1968), ce qui déclenche une érosion très importante, le bilan sur l'année restant cependant favorable à ce type d'aménagement (tous les rapports),

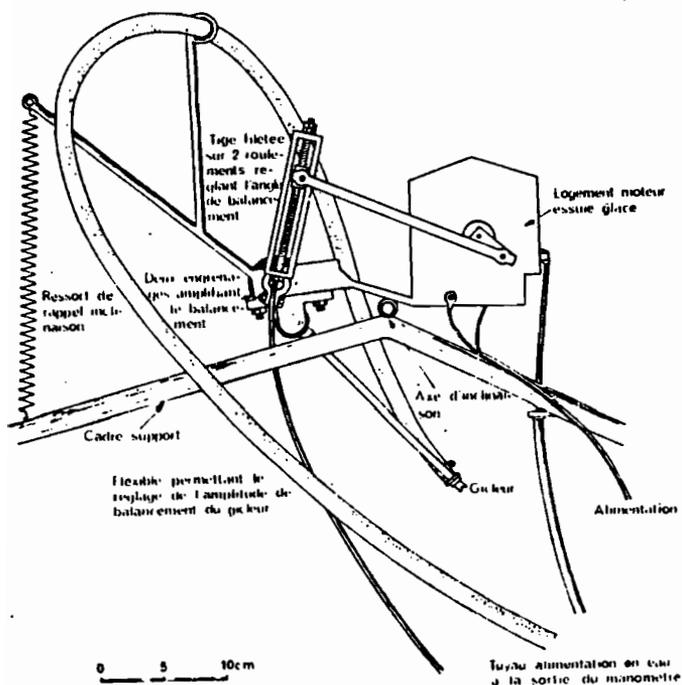
- Le paillage de la surface du sol et la culture à plat en lignes perpendiculaires à la pente diminuent significativement le ruissellement et l'érosion (AZONTONDE et al.),

- Le ruissellement est fortement lié à l'humidité du sol. En sol nu proche de la saturation, le ruissellement est de l'ordre de 75% des pluies, quelles que soient leurs hauteurs. L'érosion est fortement corrélée à l'érosivité des pluies (hauteur x intensité), surtout en sol humide,

- Dans les matériaux entraînés par l'érosion, il y a toujours un départ préférentiel de la matière organique et des éléments fertilisants. Il y a également un départ sélectif des sables grossiers sur les parcelles cultivées à plat, qui est beaucoup moins marqué dans le cas de billons ou de buttes (tous les rapports). Le dispositif se prêtait mal à l'étude de l'entraînement de l'argile, aussi aucune conclusion claire ne peut-elle être tirée des chiffres obtenus.

Ces résultats permettent de confirmer sur terres de Barre des données classiques sur l'effet bénéfique de la couverture du sol, mais ils mettent également en évidence des phénomènes de tri granulométrique lors de l'entraînement des matériaux, difficilement explicables à partir de cette expérimentation.

CHAPITRE 2

MATERIEL ET METHODES2.1 L'INFILTROMETRE A ASPERSION

L'infiltromètre à aspersion utilisé est principalement constitué d'un gicleur alimenté à débit constant situé plusieurs mètres au dessus du sol. Ce gicleur est animé d'un mouvement de balancement à l'aide d'un moteur électrique (figure 1). Il arrose une parcelle de 1 m^2 équipée d'un dispositif permettant de recueillir l'eau de ruissellement. L'intensité de la pluie peut être réglée en cours d'expérimentation en modifiant l'angle de balancement. Cette intensité est contrôlée en début et en fin de pluie : sur l'ensemble des pluies que nous avons réalisées, l'écart-type de la différence entre l'intensité initiale et l'intensité finale est de l'ordre de 2 mm.h^{-1} pour les intensités comprises entre 30 et 100 mm.h^{-1} et de l'ordre de 6 mm.h^{-1} pour l'intensité 140 mm.h^{-1} , ceci que l'intensité soit restée constante au cours de la pluie ou qu'elle ait varié. L'interprétation des résultats sera donc moins précise pour cette dernière intensité.

Figure 1 : Schéma du dispositif d'aspersion

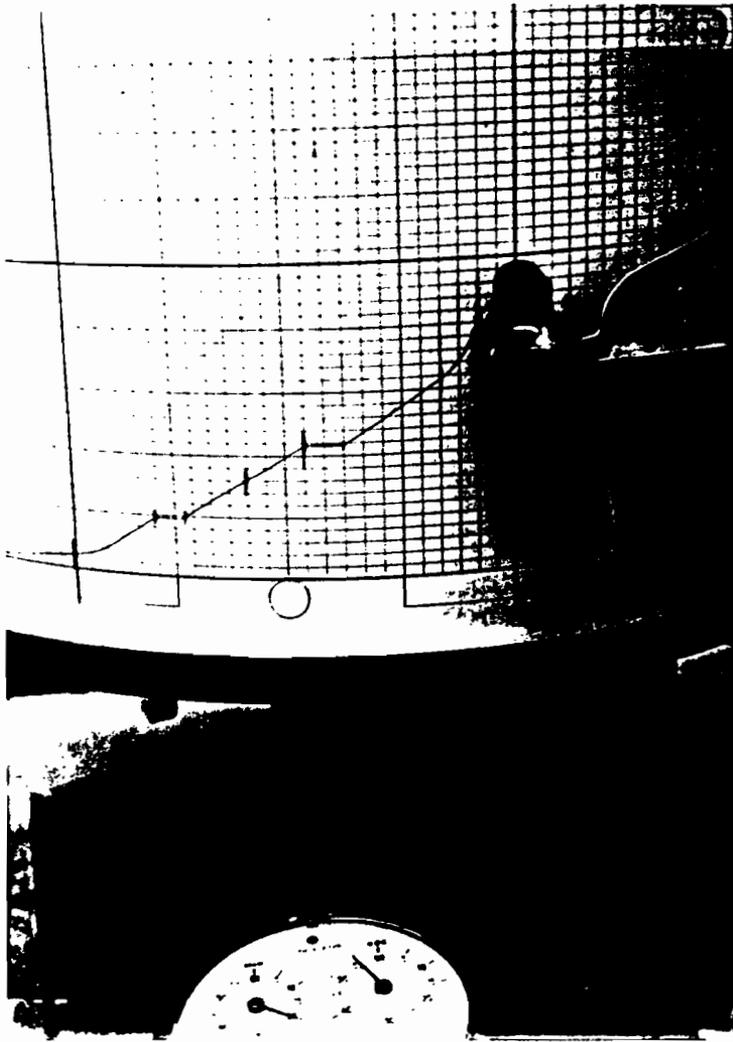


Photo 1 : Tracé du limnigramme sur le tambour du limnigraphe

L'eau de ruissellement est recueillie dans une cuve surmontée d'un limnigraphe à rotation rapide (photo 1) où chaque trait vertical correspond à un intervalle de temps de 30 secondes. Le tuyau de raccord entre la parcelle et le limnigraphe permet de prélever des échantillons d'eau en cours d'averse (paliers de la photo 1), et donc de connaître la turbidité.

L'évolution de l'état de surface de la parcelle a été suivie pendant les pluies lorsque c'était possible (absence de lame d'eau à la surface du sol), et les parcelles caractérisées ensuite à la fin de la pluie par description et photographie. Des échantillons pour étude micromorphologique ont été prélevés juste à côté du cadre limitant la parcelle étudiée lors de la première pluie, et sur la parcelle elle-même à la fin du protocole. L'horizon superficiel du sol a été soigneusement échantillonné à l'intérieur des parcelles pour réaliser les analyses physico-chimiques.

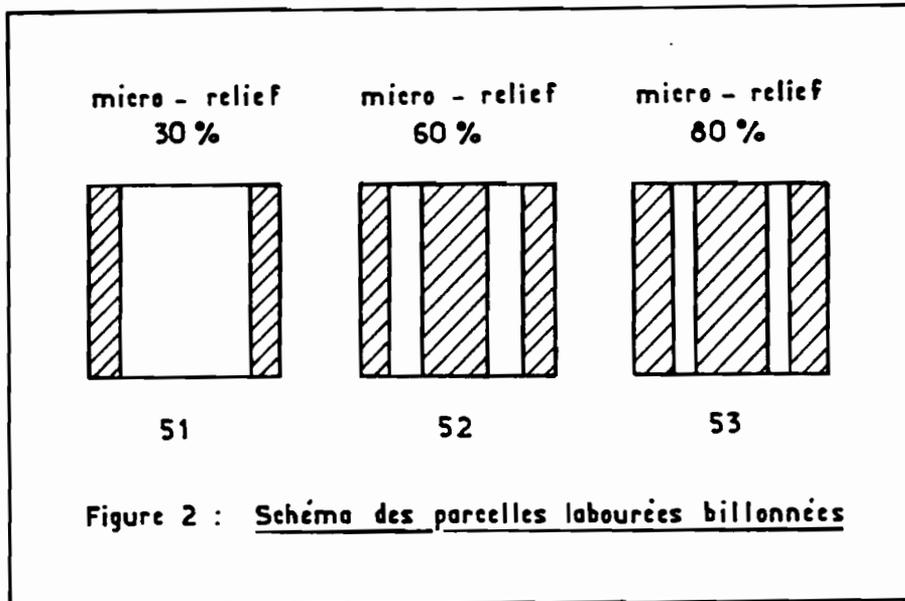
2.2 LES PARCELLES ETUDIÉES

La première expérimentation avait pour but de comparer le comportement de trois milieux différents : une forêt sacrée, une jachère de longue durée, et un champ cultivé depuis plus de dix ans. Dans la forêt, deux parcelles ont été laissées à l'état naturel (parcelles 11 et 12), alors que le mulch de feuilles était retiré de la troisième (parcelle 13), laissant la surface du sol exposée à l'action des gouttes de pluie.

Sur la jachère, trois parcelles ont également été étudiées : une parcelle sur laquelle le sol n'a pas été touché, mais la couvert végétal supprimé au ciseau (parcelle 22), une parcelle labourée planée, avec un travail du sol comparable à celui des parcelles de WISHMEIER (parcelle 21), et une parcelle également labourée et planée, mais recouverte d'un mulch d'herbe (parcelle 23). Cette dernière parcelle était labourée avant chaque pluie pour détruire les réorganisations superficielles éventuellement formées au cours de la pluie précédente.

Dans le champ, seules une parcelle labourée planée (parcelle 32) et une parcelle non retravaillée (parcelle 31), sur laquelle le couvert herbacé était supprimé, ont été étudiées.

Au vu des résultats obtenus, six autres parcelles de jachère ont été étudiées pour aborder deux autres problèmes : l'effet de l'intensité de la pluie et l'effet du micro-relief. Les trois premières (parcelles 41 à 43), qui ont reçu des averses d'intensité constante, étaient labourées planées comme la parcelle 21. Les trois autres ont, en revanche, été billonnées avec des billons dans le sens de la pente : la première (parcelle 51, figure 2) comportait deux billons occupant 30% de la superficie, alors que les deux autres en comportaient trois, ce qui permettait d'obtenir un pourcentage de 60% pour la parcelle 52 et 80% pour la parcelle 53.



Toutes les parcelles présentaient des pentes comprises entre 3 et 5%, ce qui est supérieur aux pentes moyennes de la région (de l'ordre de 1%), mais comparable à celles des parcelles du Bénin (5%).

2.3 LES PROTOCOLES

Sur les parcelles utilisées pour comparer les différents types d'exploitation du milieu (parcelles 11 à 32), nous avons réalisé une série de pluies de 75 mm en une heure, reproduisant aussi fidèlement que possible la hauteur de la pluie de récurrence annuelle (BRUNET-MORET, 1967) et la structure des averses tropicales, en changeant les intensités toutes les 10 minutes (30 mm.h⁻¹, 60 mm.h⁻¹, 140 mm.h⁻¹, 100 mm.h⁻¹, 80 mm.h⁻¹ et 40 mm.h⁻¹). Cette forme de pluie à pic d'intensité unique est la plus couramment observée en zone tropicale et a été largement utilisée par les hydrologues pour la prédiction des crues des petits bassins-versants (CASENAVE, 1982). Chaque averse était séparée de la précédente par un temps d'arrêt (Ta) de durée variable, afin d'approcher le facteur humidité du sol (tableau 1).

Ces pluies peuvent paraître violentes par rapport à la moyenne des pluies de la région. Nous avons repris les données des rapports de campagne du Bénin (VERNEY et al., 1965 à 1970) pour calculer les caractéristiques des pluies à Cotonou et leur liaison avec le ruissellement. Les pluies sont plus abondantes à Cotonou qu'au sud Togo (1400 mm contre 900 mm en moyenne), aussi les résultats ne sont-ils pas directement transposables, mais ils fixent un ordre d'idée (tableau 2).

Milieu	Forêt						Jachère						Champ			
N° parcelle	11		12		13		21		22		23		31		32	
Type de parcelle	Naturelle		Naturelle		Mulch de feuilles retiré		Labourée planée		Non re-travaillée couvert herbacé supprimé		Labourée planée + mulch herbacé		Non re-travaillée couvert herbacé supprimé		Labourée planée	
	Ta	Pu	Ta	Pu	Ta	Pu	Ta	Pu	Ta	Pu	Ta	Pu	Ta	Pu	Ta	Pu
Pluie n° 1 créneau	00	72,3	00	73,8	00	73,3	00	67,3	00	68,9	00	60,9	00	74,5	00	73,8
Pluie n° 2 créneau	72	76,3	72	77,5	65	78,3	72	67,5	72	74,2	64	69,2	25	101,2	20	115,7
Pluie n° 3 créneau	51	75,7	43	74,7	50	76,2	41	70,7	49	72,1	49	70,1				
Pluie n° 4 créneau	19	75,7	25	75,7	25	74,8	24	74,7	18	73,6	25	71,8				
Pluie n° 5 créneau	25	75,3	25	74,7	19	73,3	23	70,7	27	72,4	18	72,2				
Pluie n° 6 créneau	25	75,0	19	73,0	25	75,0	48	72,5	51	74,9	52	70,7				
Pluie n° 7 créneau	-	-	-	-	-	-	22	71,4	16	73,4	22	72,8				
	Labourée planée		Labourée planée		Labourée planée		Labourée planée		Labourée planée		Labourée planée		Labourée planée		Labourée planée	
	Ta	Pu	Ta	Pu	Ta	Pu	Ta	Pu	Ta	Pu	Ta	Pu	Ta	Pu	Ta	Pu
Pluie n° 7 ou n° 8	18	154,8	26	217,8	27	205,8	48	112,7	54	116,7	43	111,5				

Milieu	Jachère								
n° parcelle	41			42			43		
Type de parcelle	Labourée planée 30 mm.h ⁻¹			Labourée planée 60 mm.h ⁻¹			Labourée planée 100 mm.h ⁻¹		
	Ta	I	Pu	Ta	I	Pu	Ta	I	Pu
Pluie n° 1 I = cst	00	29,0	72,5	00	63,5	79,4	00	102,0	76,5
Pluie n° 2 I = cst	21	30,0	75,0	21	60,2	90,3	24	102,5	76,9
Pluie n° 3 I = cst	21	29,5	73,8	21	57,5	71,9	23	105,0	78,8
Pluie n° 4 I = cst	21	29,0	72,5	21	60,0	75,0	23	108	81,0
Pluie n° 5 créneau double	21	-	142,5	21	-	136,7	23	-	137,3
Pluie n° 6 créneau double	7 j	-	145,7	7 j	-	140,7	7 j	-	137,3

Milieu	Jachère					
n° parcelle	51		52		53	
Type de parcelle	Labourée + billon 30%		Labourée + billon 60%		Labourée + billon 80%	
	Ta	Pu	Ta	Pu	Ta	Pu
Pluie n° 1 créneau double	00	144,0	00	143,3	00	144,6
Pluie n° 2 créneau double	22	126,7	20	118,7	20	122,3
Pluie n° 3 créneau double	22	126,2	22	117,3	23	116,3
Pluie n° 4 créneau double	22	124,8	22	127,3	22	123,5

Tableau 1 - Caractères généraux des parcelles et des pluies

Hauteur pluie (mm)	Nombre de pluies			Hauteur moyenne des pluies (mm)	Intensités maximales (mm.h ⁻¹)		Ruissellement total		Coeff.ruissell.(%) de l'ensemble des pluies
	N	% total	ayant ruisselé plus de 0,1 mm		15 mn	5 mn	(mm)	% de la somme du ruissell.	
≤ 20 mm	262	68	34	6,3	21	36	66	3,8	4,0
20 < H ≤ 50	88	23	71	30,8	42	59	439	25,6	16,2
50 < H	34	9	34	79,6	79	111	1212	70,6	43,4
Total	384	100	139	22,6	41	60	1718	100	19,0

Tableau 2 : Ruissellement sur la parcelle P2 d'AGONKAME (1965 - 1969).

Les chiffres résultent de la prise en compte de 5 années consécutives, sur une parcelle cultivée à plat en maïs, coton ou arachide. On constate que les pluies de moins de 20 mm représentent 68% des événements pluvieux, mais seulement moins de 4% du ruissellement total, alors que les pluies de plus de 50 mm représentent 9% des événements pluvieux, mais plus de 70% du ruissellement total. La structure des pluies qui a été choisie est donc bien adaptée à l'étude du ruissellement.

Après 6 pluies sous forêt et 7 pluies sous jachère, toutes les parcelles ont été labourées planées et soumises à une dernière pluie destinée à contrôler que les différences de comportement n'étaient pas liées à une hétérogénéité locale du sol. Au cours de cette pluie, à l'issue des intensités en créneau que nous venons de décrire, l'intensité était maintenue constante afin d'essayer de parvenir à un palier de ruissellement, d'où des hauteurs de pluie totale au cours de l'averse (Pu) qui atteignent plus de 200 mm sous forêt (tableau 1).

Les parcelles destinées à étudier l'effet de l'intensité de la pluie ont été soumises à quatre pluies successives, dont la hauteur totale était toujours de 75 mm, mais d'intensité constante : 30 mm.h⁻¹ sur la parcelle 41, 60 mm.h⁻¹ sur la parcelle 42 et 100 mm.h⁻¹ sur la parcelle 43. Pour comparer les ruissellements avec ceux des parcelles 11 à 32, la 5^e pluie était une pluie en créneau double, de même structure sur les trois parcelles : après une pluie en créneau standard, les intensités étaient augmentées par paliers jusqu'à 140 mm.h⁻¹, d'où une hauteur de pluie totale (Pu) plus élevée. Ce dispositif a été adopté afin de savoir si l'intensité du ruissellement est uniquement liée à l'intensité instantanée de la pluie, ou si elle dépend également des intensités précédentes. La 6^e pluie était identique à la 5^e, mais elle en était séparée d'une semaine, afin d'étudier l'effet de temps d'arrêt assez longs.

Les parcelles billonnées (parcelles 51 à 53) ont été soumises à 4 pluies successives en créneau double, identiques à celles des 5^e et 6^e pluies des parcelles 41 à 43.

CHAPITRE 3

ETUDE DES COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT

Pour une pluie donnée, le coefficient de ruissellement est le rapport entre la lame ruisselée et la hauteur de l'averse. Il permet de comparer l'effet des différents traitements sur le ruissellement, mais il ne permet pas une compréhension des phénomènes, car le ruissellement total résulte de la combinaison du temps d'imbibition (temps avant l'apparition du ruissellement) et des ruissellements aux différentes intensités.

Le coefficient de ruissellement ne permet donc de comparer que des pluies de même structure : les premières pluies sur les parcelles 41 à 43 ne seront pas étudiées ici.

3.1 RESULTATS

3.1.1 Parcelles sous forêt

Sur les trois parcelles sous forêt, la surface du sol n'était pas perturbée. Le ruissellement (tableau 3) est pratiquement nul pour les 6 pluies consécutives (450 mm de pluie), que le mulch de feuilles soit laissé (parcelles 11 et 12) ou enlevé (parcelle 13). Au cours de la 7^e pluie, après labour et planage, le ruissellement reste faible (moins de 15%), même en sol humide (temps d'arrêt de 1 jour), pour une pluie comparable de 75 mm.

Il n'y a donc aucun ruissellement sous forêt naturelle. Après labour, l'infiltrabilité diminue, mais elle reste élevée.

3.1.2 Parcelles cultivées et après jachère

3.1.2.1 Parcelle après jachère labourée planée avec mulch d'herbe

Lorsque la parcelle est labourée avant chaque pluie, et recouverte d'un mulch d'herbe, le ruissellement est aussi faible que sous forêt. Lorsque le mulch est supprimé (8^e pluie), le ruissellement est comparable à celui des deux autres parcelles. L'infiltrabilité élevée est donc liée à l'effet du mulch, qui protège le sol labouré de l'impact des gouttes de pluie.

3.1.2.2 Parcelle après jachère non retravaillée

Lors de la première pluie, le coefficient de ruissellement est faible (3%), puis il augmente jusqu'à la 3^e pluie, et il oscille ensuite entre 50 et 65%. La cause de ces oscillations n'a pas été trouvée : bien que cette parcelle ait présenté une forte activité des fourmis entre les pluies, la 4^e pluie, où le coefficient est le plus faible, correspond à un moment où il n'y avait aucune perforation de la surface du sol. Le faible coefficient de la 6^e pluie peut s'expliquer par une pluie naturelle de 40 mm qui a affecté cette parcelle juste avant la 5^e pluie, modifiant considérablement l'état de surface (les autres parcelles étaient protégées).

Milieu	Forêt			Jachère			Champ		Lac Elia
n° parcelle	11	12	13	21	22	23	31	32	2
Type de parcelle	Naturelle	Naturelle	Mulch de feuilles retiré	Labourée planée	Non re-travaillée couvert supprimé	Labourée planée + mulch	Non re-travaillée couvert supprimé	Labourée planée	Cultivée la saison des pluies précédente
Pluie n° 1 créneau	0	0	0,3	6,7	3,0	0	49,3	48,8	29,2**
Pluie n° 2 créneau	0	0	0,5	38,4	37,8	0	-	84,0*	42,6
Pluie n° 3 créneau	0,2	0	0	63,1	59,8	0,2			48,7
Pluie n° 4 créneau	0,1	0	0,2	66,4	50,6	0,1			49,1
Pluie n° 5 créneau	0	0	0,3	79,5	63,0	0,1			62,9
Pluie n° 6 créneau	0,2	0	0,7	80,9	54,9	0			61,3***
Pluie n° 7 créneau	-	-	-	81,6	64,5	0,1			
	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	
Pluie n° 7 ou 8* créneau	4,3	13,6	3,1	35,8	30,3	33,6			

* Sur les 75 premières millimètres

** Pluie de 117,9 mm (pluie décennale)

*** " 116,5 mm "

Milieu	Jachère		
n° parcelles	41	42	43
Type de parcelle	Labourée planée 30 mm.h ⁻¹	Labourée planée 60 mm.h ⁻¹	Labourée planée 100 mm.h ⁻¹
Pluie n° 1 I = cst	1,9	10,6	23,3
Pluie n° 2 I = cst	44,4	61,1	61,2
Pluie n° 3 I = cst	51,8	70,0	74,9
Pluie n° 4 I = cst	46,6	77,3	74,9
Pluie n° 5 créneau double	79,5	81,8	66,8
Pluie n° 6 créneau double	56,7	66,8	60,4

Milieu	Jachère		
n° parcelles	51	52	53
Type de parcelle	Labourée + billons 30%	Labourée + billons 60%	Labourée + billons 80%
Pluie n° 1 créneau double	38,4	29,9	37,7
Pluie n° 2 créneau double	75,3	68,1	60,3
Pluie n° 3 créneau double	76,9	71,4	68,0
Pluie n° 4 créneau double	80,7	72,2	66,7

Tableau 3 : Coefficients de ruissellement (%)

Les coefficients obtenus sont remarquablement voisins de ceux d'une parcelle comparable située à une cinquantaine de kilomètres (lac Elia, cf tableau 3), avec un protocole pratiquement identique (BADER, 1985). La méthode assure donc une bonne répétabilité, et fournit une caractérisation fiable de l'infiltrabilité pour un sol à un état structural donné.

3.1.2.3 Parcelle après jachère labourée planée

Dés la première pluie le ruissellement est plus élevé sur parcelle labourée que sur parcelle non retravaillée. Il augmente ensuite régulièrement au cours des pluies, en restant toujours supérieur à celui de la parcelle naturelle (cf figure 3). Après la 5^e pluie le coefficient est de l'ordre de 80%, contre 60% pour la parcelle non retravaillée. Ces coefficients sont très proches de ceux obtenus au Bénin sous les plus fortes pluies. Cette remarquable correspondance valide l'utilisation du mini-simulateur pour étudier le ruissellement sur les terres de Barre. Elle est probablement liée à la grande homogénéité des parcelles du Bénin (parcelles régulières sans replats ni ravines) : le changement d'échelle ne crée pas ici d'hétérogénéité supplémentaire.

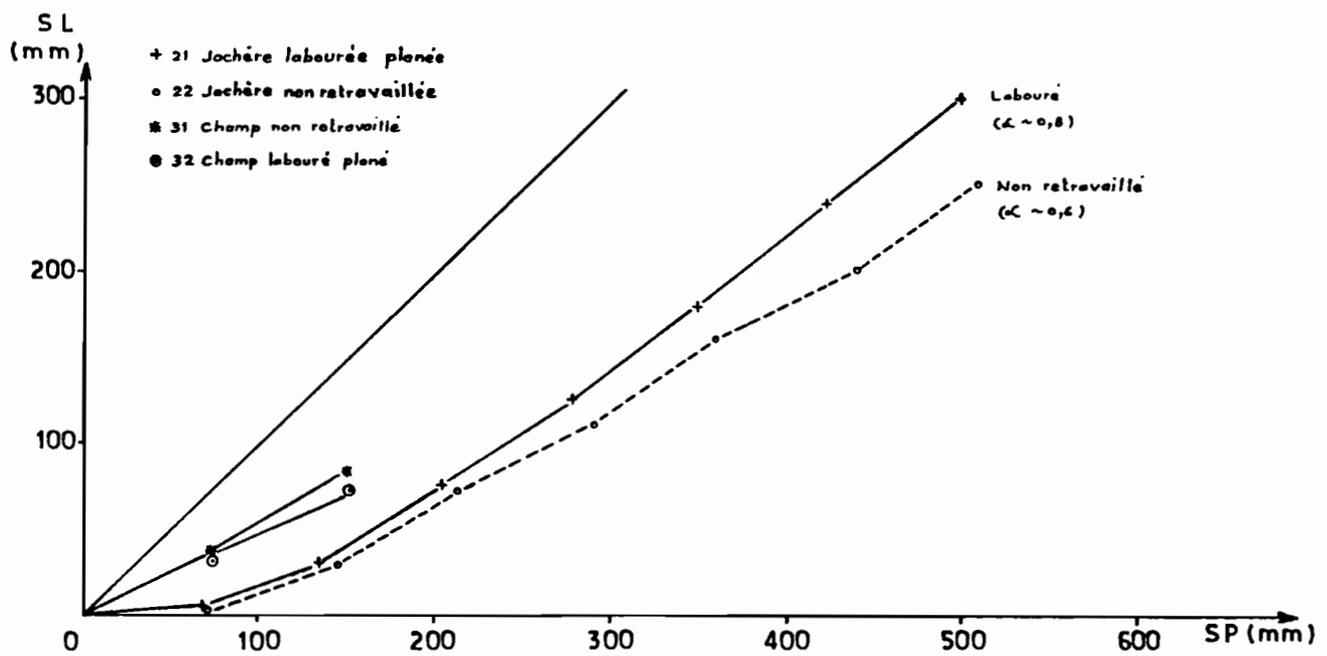


Figure 3: Lames ruisselées cumulées (SL) en fonction du cumul des pluies (SP)

3.1.2.4 Parcelles sur champ cultivé

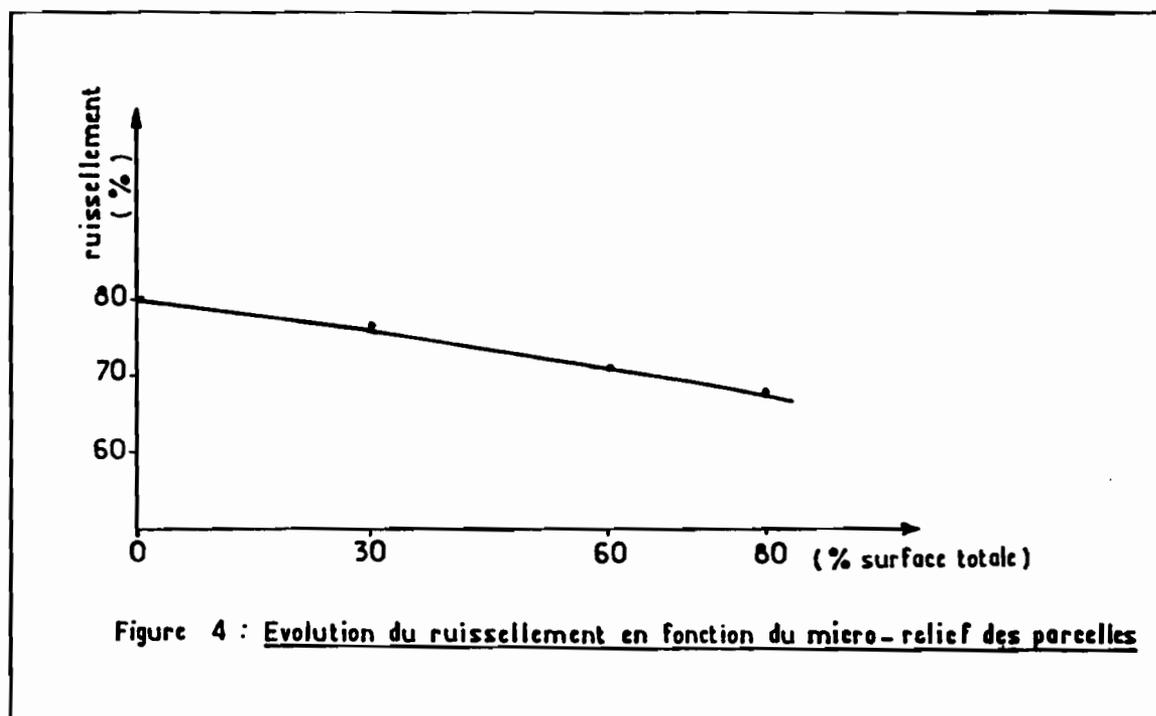
La parcelle non retravaillée a été choisie dans un champ surexploité, à un endroit où la surface du sol présentait de nombreuses zones glacées, une absence d'activité faunique et un micro-relief très atténué (état que l'on retrouve sur la parcelle après jachère non retravaillée après quelques pluies). Le ruissellement atteint 49% dès la première pluie, valeur beaucoup plus élevée que celle obtenue sur la parcelle analogue après jachère (3% sous la parcelle 22). Le labour n'améliore pas l'infiltration : après la-

bour le ruissellement obtenu à la première pluie est aussi élevé que sur la parcelle non retravaillée. Sur la parcelle labourée, le ruissellement s'élève à 84% lors de la deuxième pluie, soit l'ordre de grandeur obtenu sous jachère après 5 pluies (le ruissellement sur la parcelle non retravaillée n'a pu être calculé en raison d'erreurs de manipulation). Ce ruissellement est lié, comme l'observation de la surface du sol au cours des pluies nous l'a montré, à l'apparition particulièrement rapide de croûtes à la surface du sol, selon le mécanisme qui est détaillé dans le paragraphe 8.1.2.

3.1.3 Les parcelles labourées billonnées

Sur les parcelles billonnées la hauteur des pluies était beaucoup plus élevée que sur les parcelles que nous venons d'étudier, en raison de la structure des pluies en créneaux doubles (environ 120 mm contre 75 mm) : les valeurs de ruissellement ne sont donc pas comparables. Nous nous limiterons donc à la comparaison des parcelles 51 à 53.

Lors de la première pluie, la parcelle billonnée à 60% a ruisselé un peu moins que les autres (30% contre 38%). Pour les trois pluies suivantes, en revanche, les parcelles ruissent d'autant moins que la surface occupée par les billons est plus importante. La différence de ruissellement entre la parcelle 51 et la parcelle 53 est de l'ordre de 10 à 15%. Il est possible, en première approximation, de comparer les ruissellements obtenus lors de la 3^e pluie sur les parcelles 51 à 53 avec ceux obtenus sur les parcelles 41 et 42 lors de la 5^e pluie : la pluie avait la même structure (créneau double) et la somme des pluies précédentes était comparable (240 mm en 51 à 53, 300 mm en 41 et 42). Nous verrons que la parcelle 43 a, en revanche, un comportement différent car la répétition des pluies à 100 mm.h⁻¹ modifie l'infiltrabilité. Les résultats obtenus ont été reportés sur la figure 4. Pour des pluies de hauteur totale importante (120 mm, soit une pluie décennale) avec des intensités élevées (40 minutes à 100 mm.h⁻¹ et plus sur une pluie de 1 heure 30), le ruissellement diminue proportionnellement à la surface occupée par le micro-relief ($r=-0,996$, $n=4$).



3.2 INTERPRETATION

Sous forêt et sous labour protégé par un mulch d'herbe, la succession de 6 ou 7 pluies de 75 mm en moins de deux semaines n'a produit qu'un ruissellement négligeable. Après labour de ces parcelles, et sur toutes les autres parcelles, le ruissellement apparaît dès la première pluie, et peut atteindre, après quelques pluies, plus de 80% de la lame précipitée. L'infiltration de l'eau dans ces sols est donc sous la dépendance de l'organisation de la surface du sol. Il n'y a pas, en particulier, de diminution de l'infiltration liée à des phénomènes de saturation des horizons de sub-surface. Nous pourrions donc interpréter les résultats d'infiltration en fonction de l'organisation et de l'état hydrique de la surface du sol. Il s'agit là d'un phénomène azonal lié à la mise en culture : les études antérieures (HUMBEL, 1976; ROOSE, 1981) ont montré que sous végétation naturelle l'eau pénétrait facilement dans les sols ferrallitiques sous des climats comparables, et que l'infiltration était sous la dépendance de paramètres internes au sol (CASENAVE et al., 1982). Cette modification du fonctionnement hydrique résulte de la disparition du couvert végétal et de la diminution du taux de matière organique lors de la mise en culture.

En comparant les parcelles labourées aux parcelles du même site non labourées (parcelles 21 et 32 par rapport aux parcelles 22 et 31), on constate que le labour diminue considérablement l'infiltrabilité après quelques pluies, et que même lors de la première pluie le ruissellement n'est pas diminué par le labour (parcelle 32), quand il n'est pas augmenté (parcelle 21). Le labour ne permet donc pas d'assurer une meilleure pénétration de l'eau dans ces sols. Ce comportement s'oppose à ce qui est observé dans les sols riches en éléments grossiers (CASENAVE et VALENTIN, 1988), où le labour remonte des éléments grossiers en surface, lesquels protègent la surface du sol de l'impact des gouttes d'eau, et favorisent donc le maintien d'une infiltrabilité élevée.

En parcelles non retravaillées (11, 12, 22 et 31) le ruissellement augmente avec l'intensité d'exploitation du milieu. Cette augmentation est liée aux variations du taux de matière organique et de la stabilité structurale qui en découle (cf tableau 4), mais il n'existe aucune proportionnalité. Le rôle de la matière organique dans les phénomènes de ruissellement était déjà connu en régions tempérées, mais il est encore plus important dans les zones inter-tropicales.

Milieu	Forêt	Jachère	Champ.
Taux de matière organique	4,2	0,9	0,7
Indice d'instabilité structurale (IS)	0,2	1,5	1,9
Ruissellement à la première pluie (couvert végétal supprimé)	0,0	3,0	49,3

Tableau 4 : Taux de matière organique et indice d'instabilité structurale sur l'horizon 0-4 cm des 3 milieux étudiés, en liaison avec le ruissellement obtenu lors de la 1ère pluie de 75 mm.

La forêt est très nettement différente des deux autres milieux, non seulement au niveau des analyses physico-chimiques, mais également en ce qui concerne la structuration de l'horizon de surface : il présente une structure grumeleuse très fine (micro-peds) très résistante à l'action des gouttes de pluie, qui évolue peu au cours des pluies. Les résultats du Bénin prouvent que cet état structural favorable se dégrade en deux années lors de la mise en culture. La parcelle après jachère et dans le champ présentent des compositions granulométriques voisines et un même état hydrique initial : l'organisation de l'horizon de surface du sol doit être évoqué pour expliquer les différences de comportement mesurées, même si les deux parcelles semblent présenter un état structural voisin caractérisé par un glaçage généralisé de la surface du sol sur les zones les plus hautes et des dépôts sableux dans les dépressions.

Les résultats obtenus sur les parcelles billonnées montrent incontestablement que la présence d'un micro-relief important augmente la pénétration de l'eau dans le sol, ce qui est en accord avec les résultats obtenus au Burkina-Faso (ALBERGEL et al., 1985). Il est donc logique de tenter de comprendre en quoi la présence de micro-relief sur les parcelles naturelles peut intervenir pour expliquer les coefficients de ruissellement inférieurs à ceux obtenus sur les parcelles labourées. Cette démarche nécessite d'étudier les phénomènes pour chacune des intensités, ce qui sera abordée au chapitre 5. Il est étonnant que l'amélioration de l'infiltrabilité par billonnage ou création de buttes n'ait pas été retrouvé au Bénin sur l'ensemble de l'année (cf chapitre 1). Deux hypothèses peuvent être avancées : soit l'affaissement des billons, très rapide dans ces sols, a atténué très rapidement l'effet favorable du billonnage sur l'infiltration, soit l'intensité des pluies n'a pas été suffisante pour faire apparaître le phénomène, car nous verrons (cf paragraphe 5.4) qu'il est d'autant plus prononcé que l'intensité de la pluie est plus élevée.

3.4 CONCLUSION

La pénétration de l'eau dans les terres de Barre est conditionnée par des croûtes qui se forment au sommet de l'horizon de surface. Ces croûtes sont d'autant moins perméables que le milieu est plus intensément mis en valeur. Le labour ne permet pas d'améliorer durablement l'infiltrabilité : les parcelles labourées ruissellent, dès la première pluie, autant, sinon plus, que les parcelles non retravaillées. La présence d'un micro-relief important sur les parcelles augmente en revanche l'infiltration de l'eau dans le sol tant qu'il ne s'affaisse pas.

Pour appréhender les mécanismes, il est maintenant nécessaire d'étudier les pluies d'imbibition, ainsi que les intensités limites d'infiltration observées pour les différentes intensités, qui sont les deux facteurs qui déterminent le ruissellement total d'une pluie.

CHAPITRE 4

ETUDE DES PLUIES D'IMBIBITION

Comme les pluies n'avaient pas toutes la même intensité de départ, et que pour les parcelles 11 à 32 l'intensité variait, dès le début de la pluie, toutes les dix minutes, les comparaisons sont difficiles entre des parcelles de séries différentes. Nous commencerons par étudier les parcelles 41 à 53, où l'intensité du début de la pluie a été maintenue au moins jusqu'à l'apparition du ruissellement.

4.1 PARCELLES LABOUREES PLANEES SOUS PLUIES D'INTENSITES CONSTANTES (PARCELLES 41 A 43)

Lors de la première pluie, la hauteur de la pluie d'imbibition varie considérablement en fonction de l'intensité de la pluie (tableau 5) : une augmentation de l'intensité de 10 mm.h^{-1} produit une diminution de la pluie d'imbibition de 5 mm. Il est donc impossible, pour la première pluie, de comparer les parcelles sur lesquelles l'intensité de la pluie est différente. Lors des pluies suivantes, les pluies d'imbibition (hauteurs précipitées avant l'apparition du ruissellement) sont toujours d'autant plus faibles que l'intensité est plus forte, mais les valeurs sont beaucoup plus faibles.

Lors de la 6^e pluie, qui a été réalisée une semaine après la 5^e, la hauteur de la pluie d'imbibition reste très faible : elle dépend donc plus de l'effet de la réorganisation de la surface du sol que de l'état hydrique initial.

4.2 PARCELLES LABOUREES BILLONNEES (PARCELLES 51 A 53)

Toutes les pluies ont débuté sur ces parcelles par une intensité constante de 60 mm.h^{-1} , au moins jusqu'à l'apparition du ruissellement. Elles sont donc comparables entre elles, et avec la parcelle 42 (pluies d'intensité constante de 60 mm.h^{-1}).

Lors de la première pluie, la hauteur de la pluie d'imbibition varie de 10 mm entre les parcelles extrêmes, mais cette hauteur n'est pas proportionnelle au micro-relief (la pluie d'imbibition de la parcelle 53 est inférieure à celle de la parcelle 52). Il n'est donc pas apparu de liaison entre le micro-relief et la pluie d'imbibition au cours de cette expérimentation, mais ce résultat demande à être confirmé, car la dispersion des valeurs pourrait masquer un phénomène.

Toutes les pluies d'imbibition suivantes sont très faibles (environ 1 mm) : les différences de coefficients de ruissellement ne proviennent donc que des intensités limites d'infiltration.

Milieu	Forêt			Jachère			Champ	
n° parcelle	11	12	13	21	22	23	31	32
Type de parcelle	Naturelle	Naturelle	Mulch de feuilles retiré	Labourée planée	Non re-travaillée couvert supprimé	Labourée planée + mulch	Non re-travaillée couvert supprimé	Labourée planée
Pluie n° 1 créneau	> 75 mm	> 75 mm	14,8	15,5	17,4	17,0	11,0	12,2
Pluie n° 2 créneau	id	id	7,3	9,9	7,1	18,3	2,0	1,0
Pluie n° 3 créneau	17,4	id	> 75 mm	6,0	5,4	20,4		
Pluie n° 4 créneau	27,2	id	10,0	4,1	3,0	25,2		
Pluie n° 5 créneau	> 75 mm	id	17,1	2,5	2,1	13,2		
Pluie n° 6 créneau	17,3	id	19,7	2,1	1,5	14,0		
Pluie n° 7 créneau	-	-	-	2,6	1,5	52,7		
	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée
Pluie n° 7 ou 8	15,0	15,0	28,2	14,3	20,4	9,7		

Milieu	Jachère		
n° parcelle	41	42	43
Type de parcelle	Labourée planée 30 mm.h ⁻¹	Labourée planée 60 mm.h ⁻¹	Labourée planée 100 mm.h ⁻¹
Pluie n° 1 I = cst	51,2	31,8	13,6
Pluie n° 2 I = cst	7,5	3,0	1,5
Pluie n° 3 I = cst	4,5	2,8	1,6
Pluie n° 4 I = cst	6,0	1,5	1,6
Pluie n° 5 créneau double	1,0	1,0	0,9
Pluie n° 6 créneau double	3,2	1,0	1,9

Milieu	Jachère		
n° parcelle	51	52	53
Type de parcelle	Labourée + billons 30%	Labourée + billons 60%	Labourée + billons 80%
Pluie n° 1 créneau double	38,0	41,8	36,1
Pluie n° 2 créneau double	1,0	1,0	0,9
Pluie n° 3 créneau double	1,0	1,0	0,9
Pluie n° 4 créneau double	1,0	1,0	1,0

Tableau 5 : Hauteur des pluies d'imbibition (mm)

4.3 PARCELLES SOUS FORET

Lors des 6 premières pluies, les ruissellements étaient extrêmement faibles, du moins au début, et souvent liés à une petite flaque apparaissant à l'aval des parcelles, sans que l'ensemble de la parcelle participe au ruissellement : les valeurs de pluie d'imbibition sont donc imprécises et sans signification.

Lors de la 7^e pluie, la différence entre les parcelles 11 et 12 d'une part, et la parcelle 13 d'autre part, est considérable (15 mm en 11 et 12, 28 mm en 13), ce qui semble lié à une hétérogénéité du sol (cf paragraphe 5.2.1).

4.4 PARCELLES EN JACHERE ET CULTIVEES

L'interprétation des hauteurs de pluies d'imbibition est délicate car ces parcelles ont subi des pluies en créneau, avec des changements d'intensité toutes les 10 minutes. Les deux premières intensités étaient 30 mm.h⁻¹ et de 60 mm.h⁻¹. L'intensité passait ensuite à 140 mm.h⁻¹ après 20 minutes, soit après 15 mm de pluie. Or nous venons de voir, sur les parcelles 41 à 43, que les fortes intensités produisaient des pluies d'imbibition très faibles. Il n'est pas étonnant que de nombreux résultats soient de l'ordre de 15 mm (passage à 140 mm.h⁻¹).

Lorsque l'on compare, pour la première pluie, les parcelles labourées et non retravaillées (parcelles 21 et 22 d'une part, parcelles 31 et 32 d'autre part), on constate que le ruissellement apparaît pratiquement simultanément sur les deux types de parcelles : sur ce type de sol le labour ne permet même pas de retarder l'apparition du ruissellement.

Lors de la 8^e pluie, alors que le sol vient d'être labouré à l'état humide, on retrouve la variabilité constatée sous forêt. Cette forte variabilité masque la différence qui pourrait exister entre les deux milieux.

Pour l'ensemble du protocole, les pluies d'imbibition sont du même ordre de grandeur pour les 7 premières pluies sur la parcelle 21 et la parcelle 22 : les différences de ruissellement qui ont été constatées (cf tableau 3) ne sont donc pas liées aux pluies d'imbibition. Lorsque les hauteurs d'imbibition sont représentées en fonction du temps d'arrêt, de l'indice des pluies antérieures IK ou de l'humidité du sol mesurée à 15 cm, on constate que la pluie d'imbibition diminue à chaque pluie indépendamment de ces paramètres. Nous avons déjà constaté par ailleurs que la pluie d'imbibition ne variait que très peu après la première pluie sur les parcelles 41 à 43, même avec un temps d'arrêt d'une semaine. Contrairement à de nombreux sols (LAFFORGUE, 1977), la pluie d'imbibition n'est donc pas liée, dans les terres de Barre, à un état d'humectation, mais à l'organisation superficielle du sol qui résulte des pluies antérieures.

4.5 CONCLUSION

La hauteur de la pluie d'imbibition est fortement liée à l'intensité de la pluie. Pour obtenir une valeur permettant une comparaison entre les parcelles, il faut donc garder une intensité de pluie constante jusqu'à l'apparition du ruissellement. Une valeur de 60 mm.h⁻¹ semble un optimum. Elle est en effet supérieure aux intensités limites d'infiltration de la plupart des sols, mais suffisamment faible pour permettre d'obtenir des pluies d'imbibition assez différentes d'une parcelle à l'autre. Avec une intensité de 100 mm.h⁻¹, l'expérience montre que le ruissellement apparaît

généralement très rapidement quelles que soient les parcelles, et qu'il est donc difficile de mettre en évidence des différences entre les traitements.

Sur les terres de Barre, la première pluie d'imbibition n'est pas significativement différente sur sol labouré et sur sol non retravaillé sans végétation : nous verrons que la forte sensibilité du sol à l'impact des gouttes des pluie explique cette inefficacité du labour.

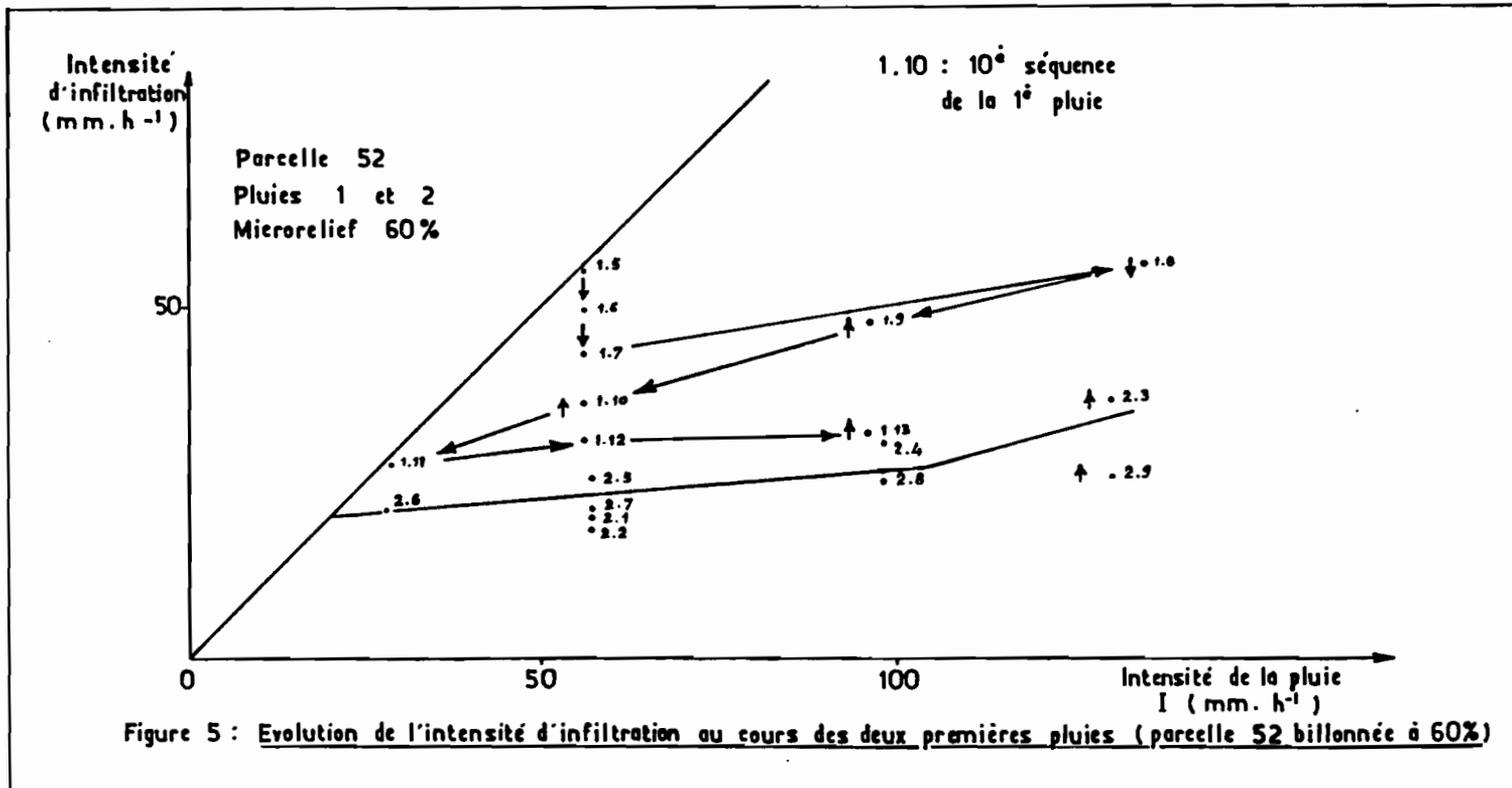
Comme les pluies d'imbibition sont très faibles (quelques millimètres) sur les parcelles 21 et 22 d'une part, et sur les parcelles 51 à 53 d'autre part, du moins à partir de la deuxième pluie, les différences entre les coefficients de ruissellement qui ont été constatées (cf paragraphe 3.1) proviennent des intensités d'infiltration : si les parcelles à fort micro-relief et la parcelle non retravaillée ruissellent moins que les parcelles planes labourées, cela ne provient pas d'un ruissellement plus tardif, mais de ce que, après le début du ruissellement, une plus grande quantité d'eau pénètre dans le sol. Il est donc nécessaire d'aborder l'étude des intensités d'infiltration.

CHAPITRE 5

ETUDE DES INTENSITES D'INFILTRATION5.1 REMARQUES METHODOLOGIQUES

5.1.1 Détermination de l'intensité d'infiltration lors de la première pluie

La valeur de l'intensité limite d'infiltration (F_n) est "la valeur minimale de l'intensité d'infiltration en régime permanent" (LAFFORGUE, 1977). Cette valeur est, en pratique, généralement prise égale à l'intensité d'infiltration obtenue à la fin du temps pendant lequel l'intensité de la pluie est restée constante ("séquence", d'une durée souvent égale à 10 minutes) : il n'y a donc aucune certitude que le régime permanent soit atteint. Ceci est particulièrement vrai lors des premières pluies, comme le montre bien l'exemple des deux premières pluies sur la parcelle 52 (figure 5).



Lors de la première pluie, une intensité constante I de pluie a été appliquée pendant 70 minutes, puis les intensités ont varié selon des créneaux de 10 minutes pendant 1 heure, et l'intensité de 56 mm.h^{-1} a encore été appliquée au cours de deux séquences supplémentaires. Lorsque l'on dépouille les intensités d'infiltration toutes les dix minutes, on constate une diminution de l'intensité d'infiltration pour $I=56 \text{ mm.h}^{-1}$ tout au long

de la pluie, une stabilisation n'apparaissant qu'au cours de la deuxième pluie. Au cours de cette phase, l'évolution de l'intensité d'infiltration a été considérable. Pour comparer des intensités d'infiltration, il est donc important de se placer dans des phases de régime permanent, mais la durée des séquences (10 minutes) rend souvent la vérification de cette hypothèse impossible. Dans notre cas les intensités d'infiltration se stabilisent généralement après 100 à 150 mm de pluie (intensités limites d'infiltration F_n). Nous ne parlerons d'intensité limite d'infiltration que lorsqu'un palier d'infiltration a effectivement été atteint, sinon nous parlerons d'intensité d'infiltration.

Lorsque la stabilité n'a pas été atteinte, les valeurs ont été marquées sur les graphes avec des flèches indiquant le sens de la variation.

5.1.2 Stabilité de l'intensité d'infiltration pour une intensité donnée au cours d'une pluie

Il était nécessaire, avant toute interprétation, de savoir si à une intensité de pluie donnée, au cours d'une averse, correspond toujours la même intensité d'infiltration. Nous allons donc étudier les intensités d'infiltration obtenues sous des intensités de 60 mm.h^{-1} au cours des pluies en créneau (à partir de la 2^e pluie sur les parcelles 51 à 53 pour obtenir une valeur stabilisée, tableau 6).

N° des parcelles	Numero des pluies	Temps d'arrêt (jours)	Temps depuis le début de la pluie			Phase d'intensités décroissantes	Phase d'intensités croissantes
			0-10 mn	10-20 mn	20-30 mn		
41	5	1	18	11	13	17	17
	6	7	55	45	32	37	26
42	5	1	14	10	10	14	11
	6	7	42	40	30	24	18
43	5	1	40	27	19	23	20
	6	7	49	44	31	32	20
51	2	1	20	20	-	23	17
	3	1	18	16	-	20	14
	4	1	14	13	-	16	12
52	2	1	20	18	-	25	20
	3	1	< 25	18	-	23	19
	4	1	< 21	17	-	23	19
53	2	1	< 27	24	-	26	< 21
	3	1	< 23	22	-	24	18
	4	1	< 25	< 20	-	< 21	16

Tableau 6 : Intensités d'infiltration observées sous une pluie d'intensité de 60 mm.h^{-1} au cours des pluies en créneau double.

Ce tableau met en évidence qu'il faut distinguer le cas d'une averse sur sol humide (temps d'arrêt d'un jour) de celui d'une averse sur sol bien ressuyé (temps d'arrêt 7 jours).

Dans le premier cas (5^e pluie des parcelles 41 à 43, ensemble des pluies des parcelles 51 à 53), les variations que l'on observe au cours d'une pluie sont de l'ordre de grandeur de la précision de l'expérimentation, exception faite parfois des premières 10 minutes, où l'intensité d'infiltration n'est

pas stabilisée. Il y a dans ce cas-là une bonne correspondance entre l'intensité de la pluie et l'intensité d'infiltration, quelle que soit l'intensité qui précède et quel que soit le traitement de la parcelle (labourée, planée ou billonnée).

Dans le deuxième cas (6° pluie des parcelles 41 à 43), l'intensité d'infiltration décroît au cours de la pluie d'une manière importante (25 à 37%), même après les 30 premières minutes et même en l'absence de modification visible de l'état de surface de la parcelle.

Pour une organisation du sol donnée (parcelles 41 à 43 après 5 pluies) l'intensité d'infiltration évolue donc considérablement au cours de la pluie si le sol était préalablement ressuyé, probablement sous l'effet d'un fort gradient de charge hydraulique : les valeurs d'infiltrabilité ne peuvent donc pas être reliées à des caractéristiques morphologiques dans ce cas. Lorsque le sol est humide, en revanche, les intensités d'infiltration restent constantes au cours d'une pluie pour une intensité d'averse donnée (nous sommes donc parvenus à une intensité limite d'infiltration) : il est donc possible, dans ce cas, d'interpréter l'infiltrabilité du sol en fonction de l'humidité initiale du sol et de son état de surface.

5.1.3 Influence des temps d'arrêt (T_a)

L'étude de l'influence des temps d'arrêt a été réalisée sur les parcelles 21 à 23, avec des temps d'arrêt de 1 à 3 jours, et sur les parcelles 41 à 43, avec un temps d'arrêt de 7 jours.

Sur les parcelles 21 à 23 l'influence du temps d'arrêt de 3 jours n'a pu être mis en évidence : ce temps d'arrêt séparait en effet les deux premières averses (tableau 1). Comme les variations de l'état de surface entre la première averse et le seconde ont été considérables, l'effet du temps d'arrêt a été masqué. Par contre le graphe d'évolution de l'intensité d'infiltration en fonction des pluies cumulées (SP, figure 6) montre que l'on assiste à une décroissance des intensités d'infiltration, que le temps d'arrêt soit de 1 ou 2 jours. Le temps d'arrêt n'est donc pas un facteur explicatif de l'intensité d'infiltration dans ce cas.

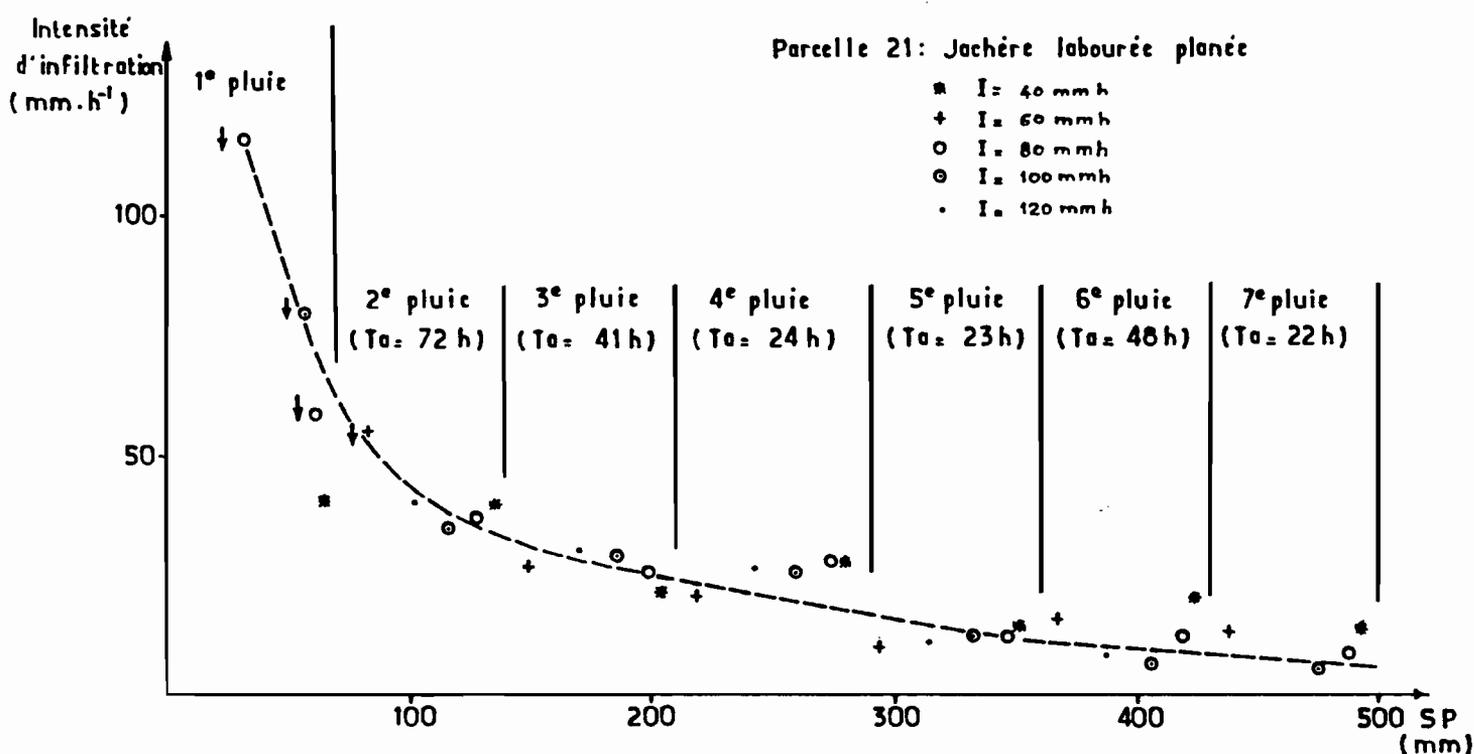


Figure 6: Evolution de l'intensité d'infiltration en fonction des pluies cumuléees S P

Lorsque le temps d'arrêt est porté à une semaine (6^e pluie des parcelles 41 à 43), les intensités d'infiltration sont considérablement augmentées : de l'ordre de 15 mm.h⁻¹ avec des averses rapprochées dans le temps, elles deviennent de l'ordre de 30 mm.h⁻¹ avec une semaine sans pluie. L'intensité d'infiltration diminue ensuite au cours de la pluie, comme nous venons de le voir au paragraphe précédent, mais elle reste supérieure à l'intensité d'infiltration du sol humide jusqu'à ce que la hauteur de l'averse atteigne 100 à 120 mm. Les pluies naturelles, d'une hauteur bien inférieure à cette valeur et espacées dans le temps, auront donc une infiltrabilité variable au cours de la pluie, et qui dépendra de l'humidité initiale. C'est ce phénomène qui rend compte de la sensibilité du coefficient de ruissellement à l'humidité du sol qui a été constatée au Bénin. L'évolution de l'intensité d'infiltration en fonction du temps d'arrêt est donc un problème important au niveau agronomique, qui mériterait d'être développé.

5.1.4 Conclusion

Après une ou deux averses, les intensités d'infiltration varient peu au cours d'une pluie pour une intensité de pluie donnée et ne sont pas affectées par les temps d'arrêt, tant que ceux-ci ne dépassent pas 3 jours. Il est donc possible, après une ou deux pluies, d'interpréter les intensités d'infiltration en fonction de l'intensité des pluies et du type de parcelle (ou du traitement qui y a été appliqué) si le temps d'arrêt entre deux averses consécutives n'excède pas 3 jours.

5.2 PARCELLES LABOUREES PLANEES

5.2.1 Parcelles sous forêt (parcelles 11 à 13)

Les parcelles sous forêt ont été labourées après 6 pluies de 75 mm environ rapprochées dans le temps, et la pluie sur le sol labouré a été effectuée le lendemain de la dernière pluie en sol non labouré : nous nous trouvons donc dans des conditions particulièrement humides. La pluie était elle-même d'une hauteur importante (tableau 1) : de 155 à 218 mm, avec un long palier à forte intensité à la fin, afin d'obtenir un palier d'infiltration (figures 7 et 8).

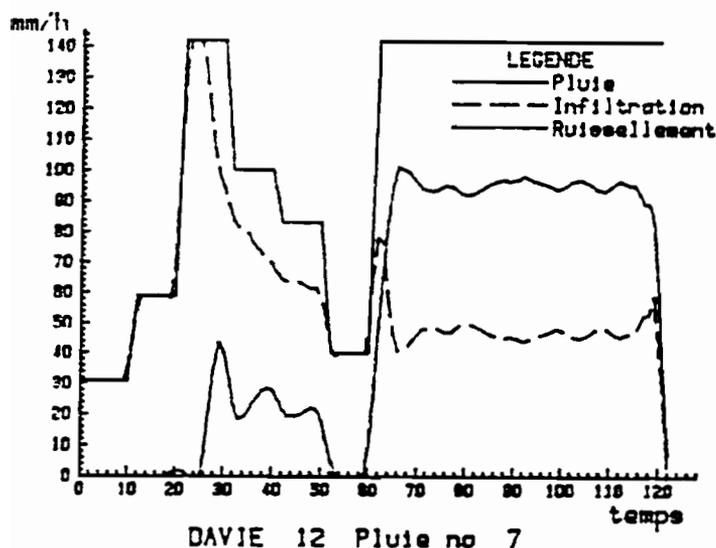


Figure 7 : Hyétogramme obtenu sous forêt après labour sous la parcelle 12

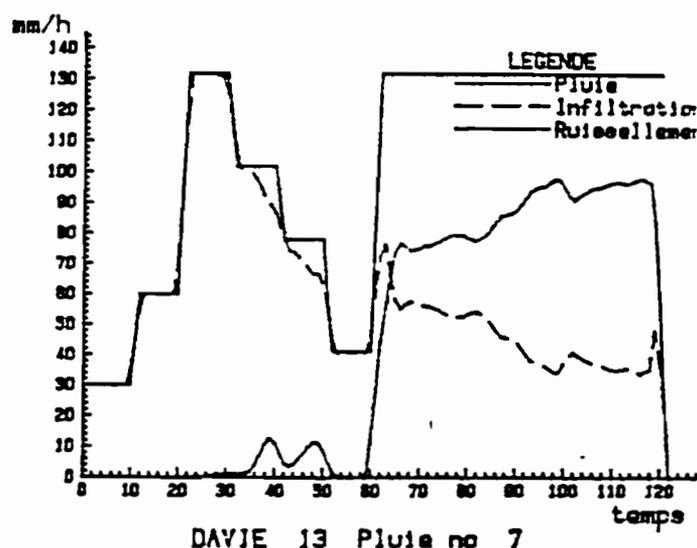


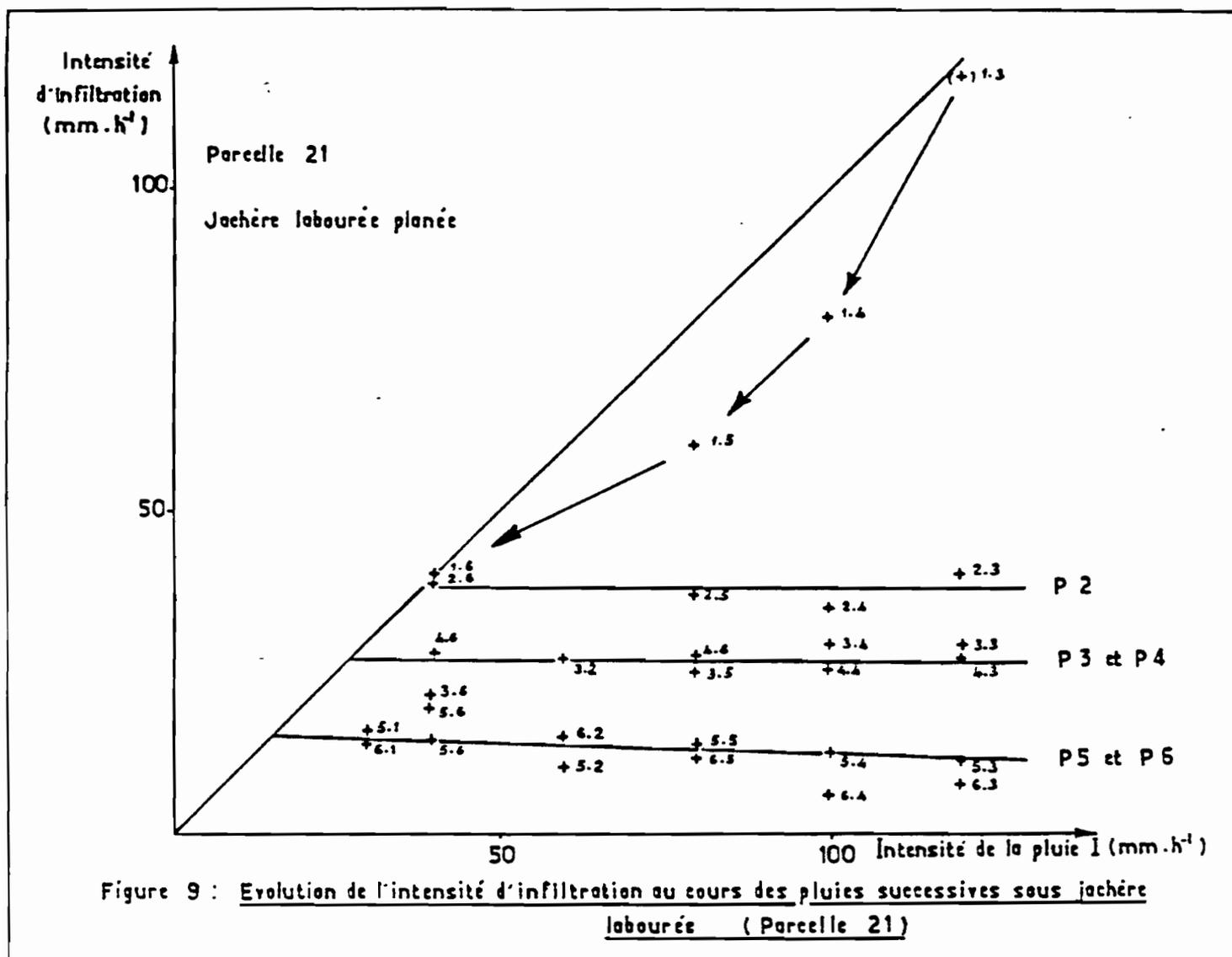
Figure 8 : Hyétogramme obtenu sous forêt après labour sous la parcelle 13

Sur les parcelles 11 et 12 un palier a effectivement été atteint (de l'ordre de 50 mm.h^{-1} sur la parcelle 12, de valeur inconnue sur la parcelle 11 par suite d'une incertitude sur l'intensité de la pluie). Par contre il n'a pas été possible d'atteindre un palier d'infiltration sur la parcelle 13 : nous verrons dans le chapitre 6 que l'érosion était telle sur cette parcelle en fin de pluie (turbidités de 30 à 40 g.l^{-1}) que l'état de surface devait évoluer en cours de pluie.

Les faibles coefficients de ruissellement qui ont été constatés (cf chapitre 3) en sol très humide proviennent donc d'une très forte infiltrabilité en début de pluie (figures 7 et 8), qui diminue ensuite, mais reste comprise entre 30 et 56 mm.h^{-1} même après une pluie de plus de 150 mm (supérieure à la pluie décennale). Nous verrons que cette intensité d'infiltration est la plus élevée de toutes les parcelles labourées planées, ce qui est conforme à ce qui a été vu pour les coefficients de ruissellement.

5.2.2 Parcelles après jachère (21) et en culture (32) avec pluies en créneau

La représentation des intensités d'infiltration en fonction des intensités I pour les différentes pluies appliquées sur une parcelle permet de visualiser facilement les phénomènes (figures 9 et 10).



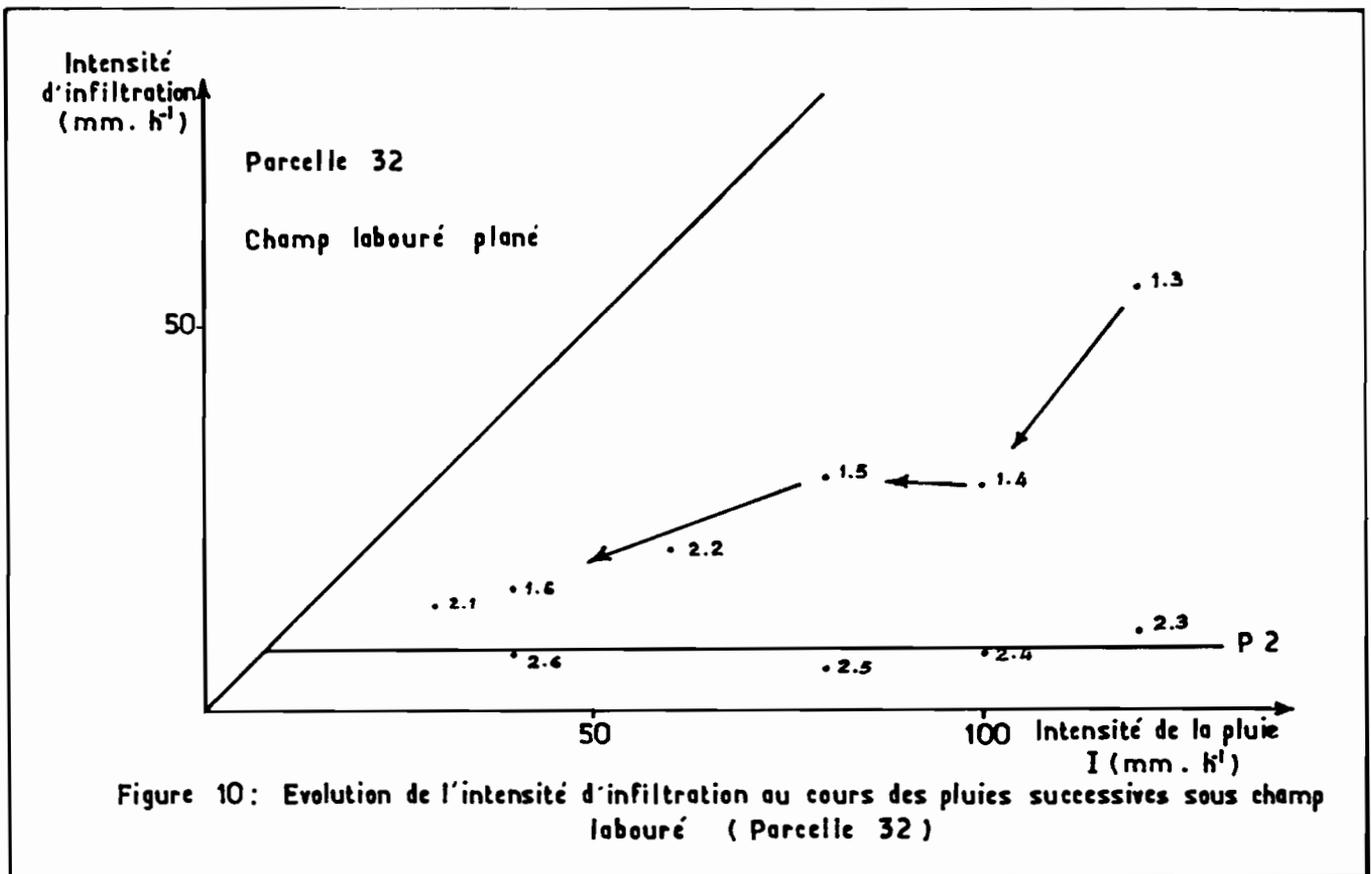


Figure 10: Evolution de l'intensité d'infiltration au cours des pluies successives sous champ labouré (Parcelle 32)

Après une phase transitoire, qui s'étend sur la première pluie pour la parcelle après jachère et jusqu'à la seconde séquence de la deuxième pluie sous le champ (point 2.2 de la figure 10), les intensités d'infiltration deviennent constantes (intensités limites d'infiltration F_n), aux erreurs expérimentales près, quelle que soit l'intensité de la pluie.

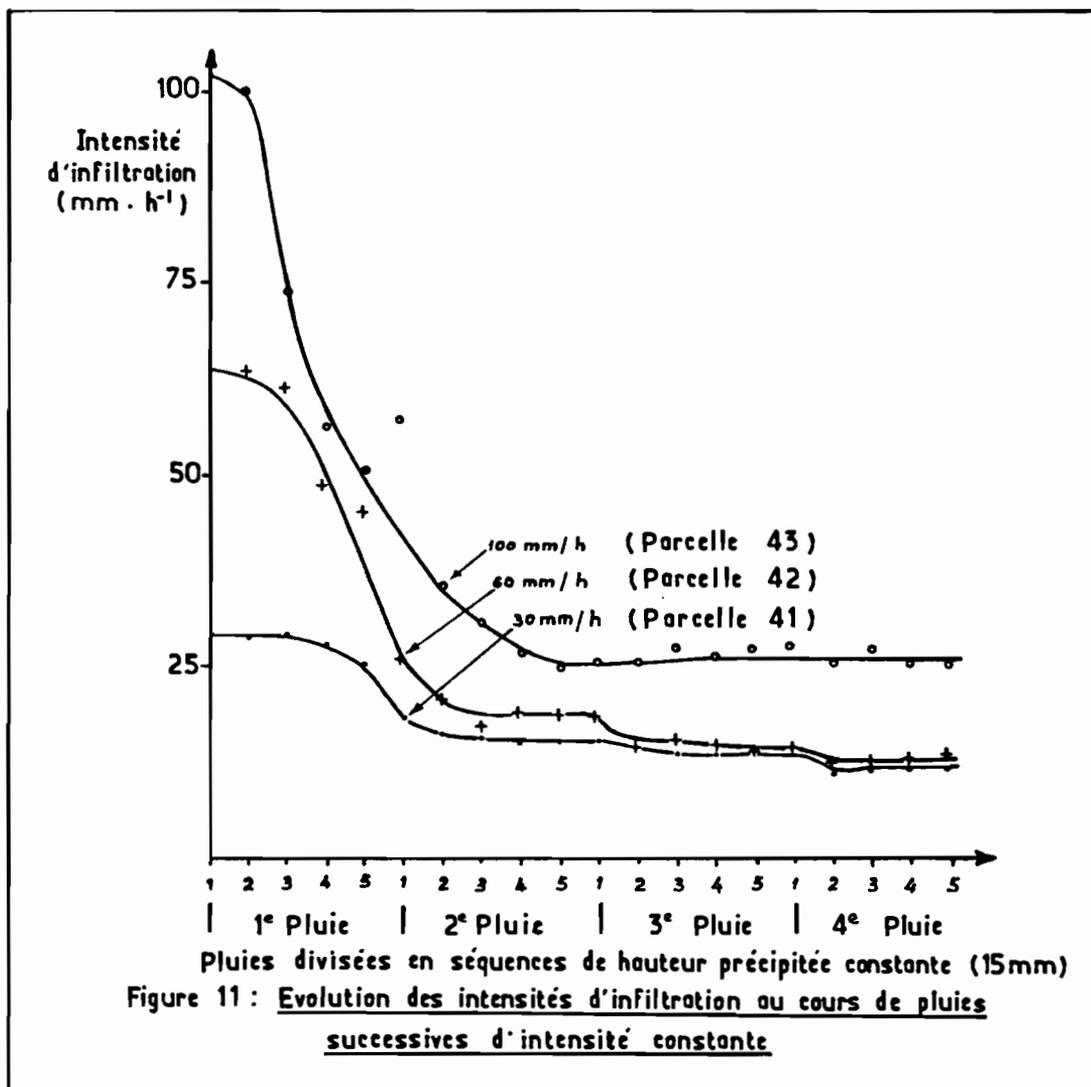
Sur la parcelle après jachère, où les pluies ont été nombreuses, l'intensité d'infiltration diminue d'une pluie à la suivante jusqu'à la cinquième pluie, où elle se stabilise.

Lorsque des pluies assez rapprochées sont appliquées à une parcelle labourée planée, on parvient donc après environ 75 mm de pluie à des intensités d'infiltration qui sont constantes (intensités limites d'infiltration F_n) quelle que soit l'intensité de la pluie pour une pluie donnée (du moins jusqu'à 120 mm.h⁻¹) et qui décroissent d'une pluie à l'autre. Les intensités limites d'infiltration observées sont de 10 à 15 mm.h⁻¹ après jachère et de 5 à 10 mm.h⁻¹ sous champ cultivé.

Comme nous avons vu que le temps d'arrêt ne permet pas d'expliquer les variations d'infiltrabilité observées (paragraphe 5.1.3), il faut savoir si la diminution de l'infiltrabilité résulte de la succession des pluies, quelles que soient leurs intensités, ou si cette évolution provient des variations d'intensités au cours des pluies. Répondre à cette question était l'objet principal de l'étude des parcelles 41 à 43.

5.2.3 Parcelles après jachère (41 à 43) avec pluies d'intensité constante, suivies de pluies en créneau

Les quatre pluies d'intensité constante (30 mm.h⁻¹ en 41, 60 mm.h⁻¹ en 42 et 100 mm.h⁻¹ en 43) totalisaient toutes la hauteur d'une pluie de fréquence annuelle (75 mm). Elles ont été divisées, pour le dépouillement, en 5 séquences de durées égales afin de faciliter les comparaisons entre pluies : chaque séquence correspond à une hauteur de pluie cumulée égale sur les différentes parcelles (figure 11).



La hauteur de pluie nécessaire pour obtenir une stabilisation de l'intensité d'infiltration est du même ordre de grandeur que celle observée lors des pluies en créneau : l'intensité d'infiltration se stabilise au cours de la 2^e pluie, soit après environ 100 mm. Il n'y a donc pas d'effet marqué de l'intensité de la pluie, ni des variations d'intensité sur la rapidité de la stabilisation de l'infiltration.

Au cours des deux premières pluies, les intensités d'infiltration sont fortement dépendantes de l'intensité de la pluie : à hauteur d'eau précipitée égale (même séquence), l'infiltrabilité reste d'autant plus élevée que l'intensité est plus forte. Au cours des deux pluies suivantes, la différence s'estompe entre les parcelles soumises à une intensité de 30 et de 60 mm.h⁻¹, mais reste élevée avec celle où l'intensité est de 100 mm.h⁻¹ : de l'ordre de 12 mm.h⁻¹ dans le premier cas, elle est de l'ordre de 25 mm.h⁻¹ dans le second.

La stabilité de l'intensité d'infiltration en cours de pluie pour une intensité donnée que nous avons constatée sous des pluies en créneau se retrouve ici avec des pluies d'intensité constante au cours des 3^e et 4^e pluies. Mais elle reste constante d'une pluie à l'autre lorsque l'intensité est de 100 mm.h⁻¹, alors qu'elle diminue à chaque pluie pour les deux autres intensités (tableau 7).

Numero des parcelles	Intensités (mm.h ⁻¹)	Numero des pluies			
		2	3	4	5
41	30	15	13	12	-
42	60	19	14	13	10*
43	100	24	26	25	-

* Valeur en fin de 2^e séquence (pluie en créneau)

Tableau 7 : Valeurs d'infiltrabilité (mm.h⁻¹) à la fin des pluies de 75 mm.

La diminution d'une pluie à l'autre est faible, mais les différences paraissent significatives car le phénomène est régulier d'une pluie à l'autre et d'une parcelle à l'autre. Les diminutions d'intensités d'infiltration d'une pluie à l'autre apparaissent donc également avec des pluies d'intensités constantes.

Les valeurs d'intensités d'infiltration peuvent être comparées à celles de la parcelle 21 étudiée sous pluie en créneau (figure 9), car il s'agit de la même jachère de longue durée. Il apparaît que l'infiltrabilité diminue beaucoup plus rapidement sous pluie d'intensité constante de 30 ou de 60 mm.h⁻¹ que sous les pluies en créneau : les valeurs obtenues à la fin de la deuxième pluie sous averse d'intensité constante (15-20 mm.h⁻¹) n'ont été observées qu'à partir de la cinquième pluie en créneau. Pendant les 4 premières pluies les intensités d'infiltration sont donc plus élevées sous des pluies en créneau que sous des pluies d'intensité constante. Ce résultat mériterait d'être confirmé, car il résulte de la comparaison de parcelles sur lesquelles il n'y a pas eu de pluie d'homogénéisation.

Les quatre premières pluies d'intensité constante sur les parcelles 41 à 43 ont été suivies d'une pluie en créneau double, avec des intensités comprises entre 30 et 140 mm.h⁻¹ (figures 12 à 14).

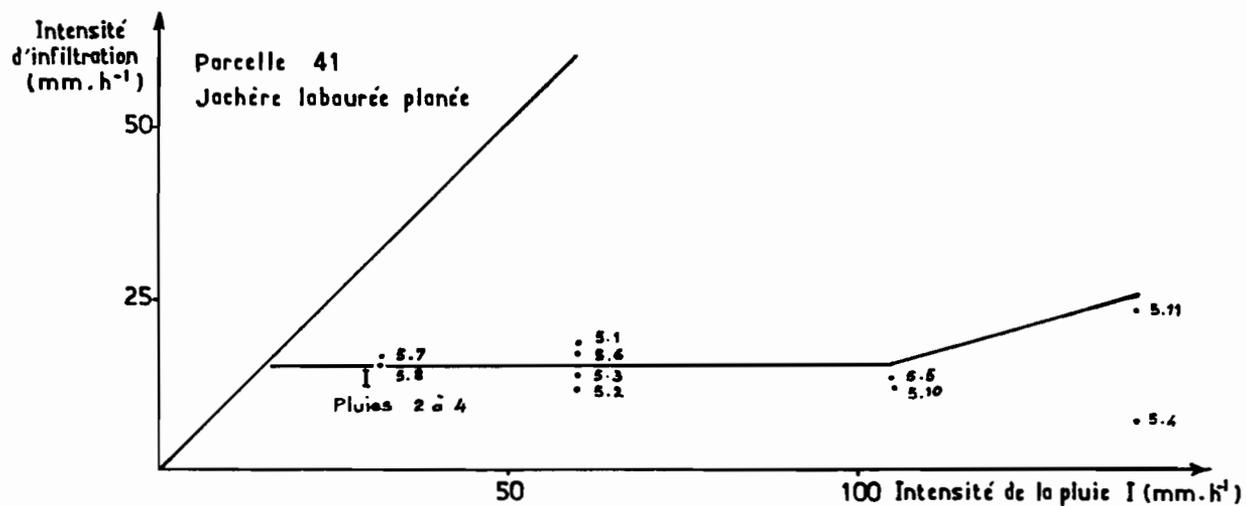


Figure 12: Intensités d'infiltration au cours de 3 pluies successives sur la parcelle 41

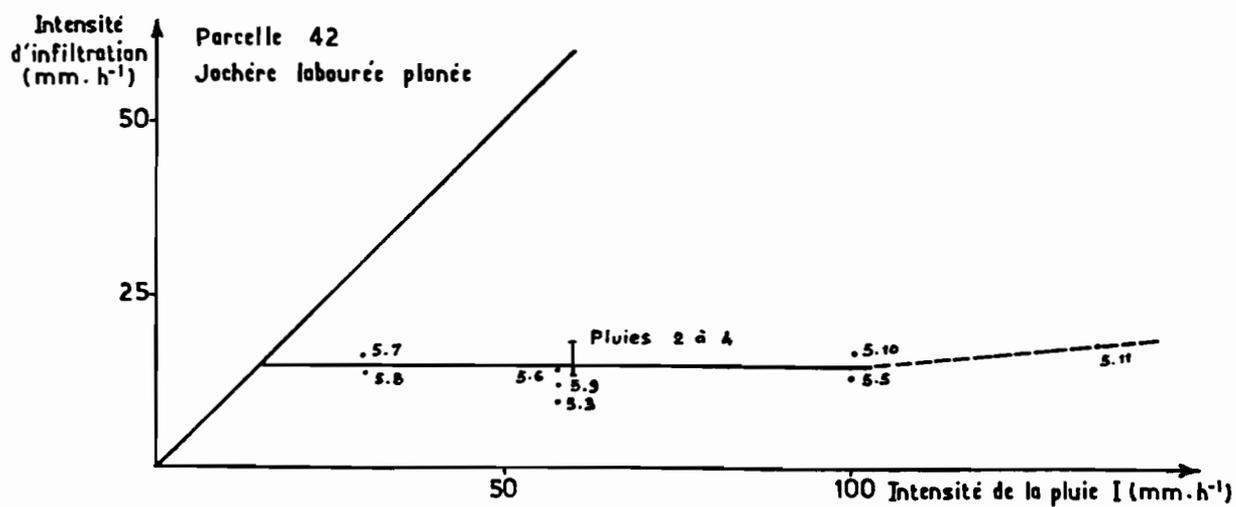
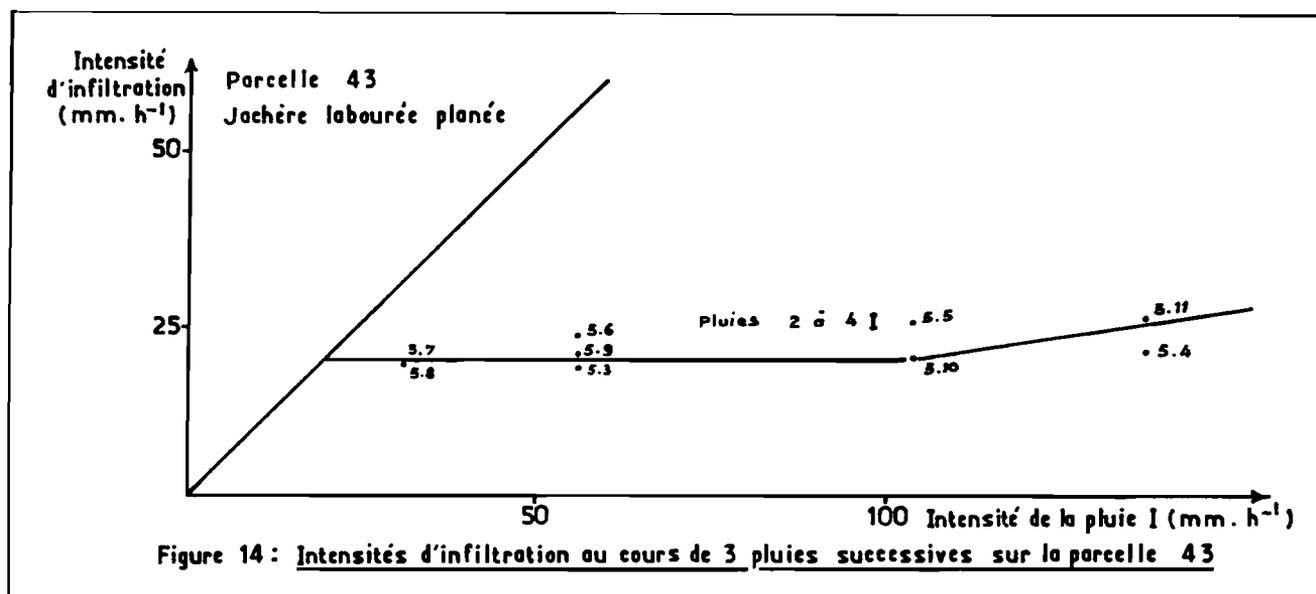


Figure 13: Intensités d'infiltration au cours de 3 pluies successives sur la parcelle 42



Si l'on ne considère que les intensités comprises entre 30 et 100 mm.h⁻¹, le passage de pluies d'intensités constantes à des pluies en créneau sur les parcelles 41 et 42 ne s'accompagne pas d'une modification significative de l'infiltrabilité, qui reste de l'ordre de 15 mm.h⁻¹ jusqu'à une intensité de 100 mm.h⁻¹. Pour la parcelle 43, précédemment soumise à une intensité de 100 mm.h⁻¹ et où les intensités d'infiltration étaient remarquablement constantes (24 à 28 mm.h⁻¹ pendant 3 pluies), le passage à une pluie en créneau s'est traduit par une diminution immédiate de l'intensité d'infiltration, qui s'est établie à une valeur de l'ordre de 20 mm.h⁻¹, soit juste un peu supérieure à celle observée sur les parcelles 41 et 42.

Pour l'intensité 140 mm.h⁻¹, une augmentation de F_n est systématique sur toutes les parcelles. Bien que l'imprécision sur l'intensité soit importante (cf paragraphe 2.1), ce qui explique les quelques points aberrants, les résultats sont trop systématiques pour n'être qu'un artefact. Cette augmentation peut être reliée à une modification rapide de la surface de la parcelle sous l'effet d'un ruissellement intense. L'importance pratique de ce phénomène ne doit pas être surestimée : d'une part les intensités de 140 mm.h⁻¹ sont extrêmement rares, d'autre part le ruissellement est déjà tellement important (par exemple 120 mm.h⁻¹ pour une infiltrabilité de 20 mm.h⁻¹) que la faible variation de l'intensité d'infiltration intervient peu au niveau du bilan.

5.2.4 Conclusion

Sur les parcelles labourées planées soumises à des pluies rapprochées dans le temps comprises entre 30 et 100 mm.h⁻¹, l'intensité d'infiltration reste plus élevée si l'intensité de la pluie est forte, et le phénomène apparaît dès le début de l'averse.

La diminution de l'infiltrabilité est beaucoup plus rapide sous des pluies d'intensité constante que sous des pluies en créneau, mais la valeur de stabilisation après quelques pluies reste constante (15 à 20 mm.h⁻¹).

Il semble donc qu'une intensité de 100 mm.h^{-1} permette de maintenir une meilleure infiltrabilité que les intensités plus faibles, et que la présence de fortes intensités lors des pluies en créneau retarde la diminution de l'infiltrabilité que l'on constate d'une pluie à l'autre.

L'infiltrabilité des parcelles labourées planées sur les terres de Barre évolue donc au cours des pluies en liaison avec la succession des intensités : il en résulte qu'il est nécessaire de standardiser le plus possible les protocoles pour obtenir des résultats comparables d'une parcelle à l'autre.

5.3 ETUDE DES PARCELLES EN SOL NON RETRAVAILLÉ (PARCELLES 22 ET 31)

La parcelle après jachère présente le comportement habituel des parcelles à micro-relief prononcé (LAFFORGUE, 1977; VALENTIN, 1981; CASENAVE, 1982): l'intensité d'infiltration augmente lorsque l'intensité de la pluie augmente (figures 15).

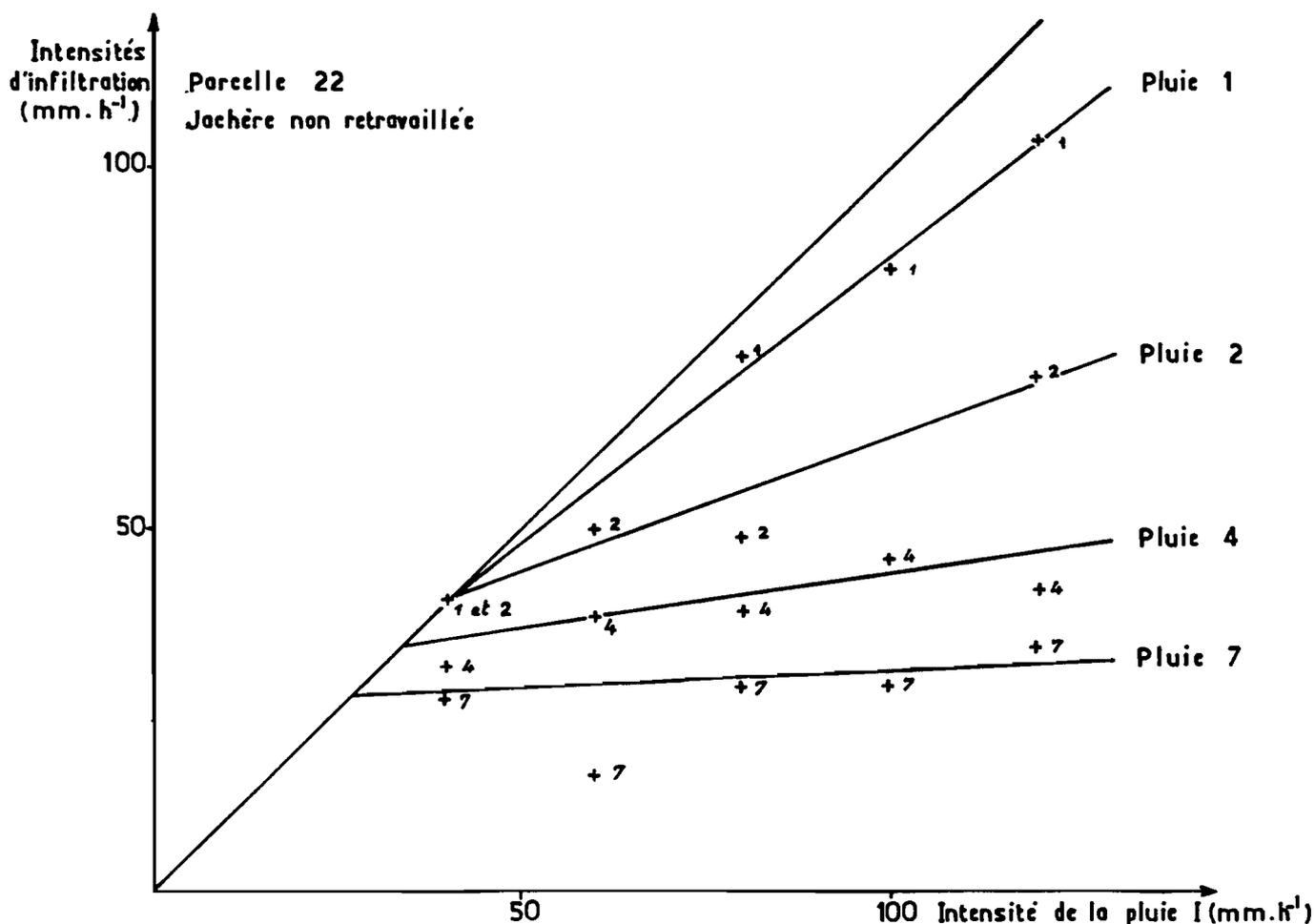


Figure 15: Evolution de l'intensité d'infiltration au cours de 7 pluies successives sous jachère non retravaillée (Parcelle 22)

Le phénomène est très marqué sur la parcelle 21 lors des premières pluies, et il s'atténue ensuite : à l'issue des 7 pluies consécutives, l'intensité d'infiltration ne varie pratiquement plus en fonction de l'intensité. On

retrouve donc, après 7 pluies qui ont estompé le micro-relief, le comportement des parcelles labourées planées.

Sur la parcelle du lac Elia (BADER, 1985; cf tableau 3), les courbes présentent le même type de forme (figure 16) jusqu'à la quatrième pluie, mais l'intensité d'infiltration devient constante ensuite, soit un peu plus rapidement que sur la parcelle étudiée. Un micro-relief moins marqué peut être invoqué, mais les descriptions des parcelles ne sont pas assez précises pour en apporter la preuve.

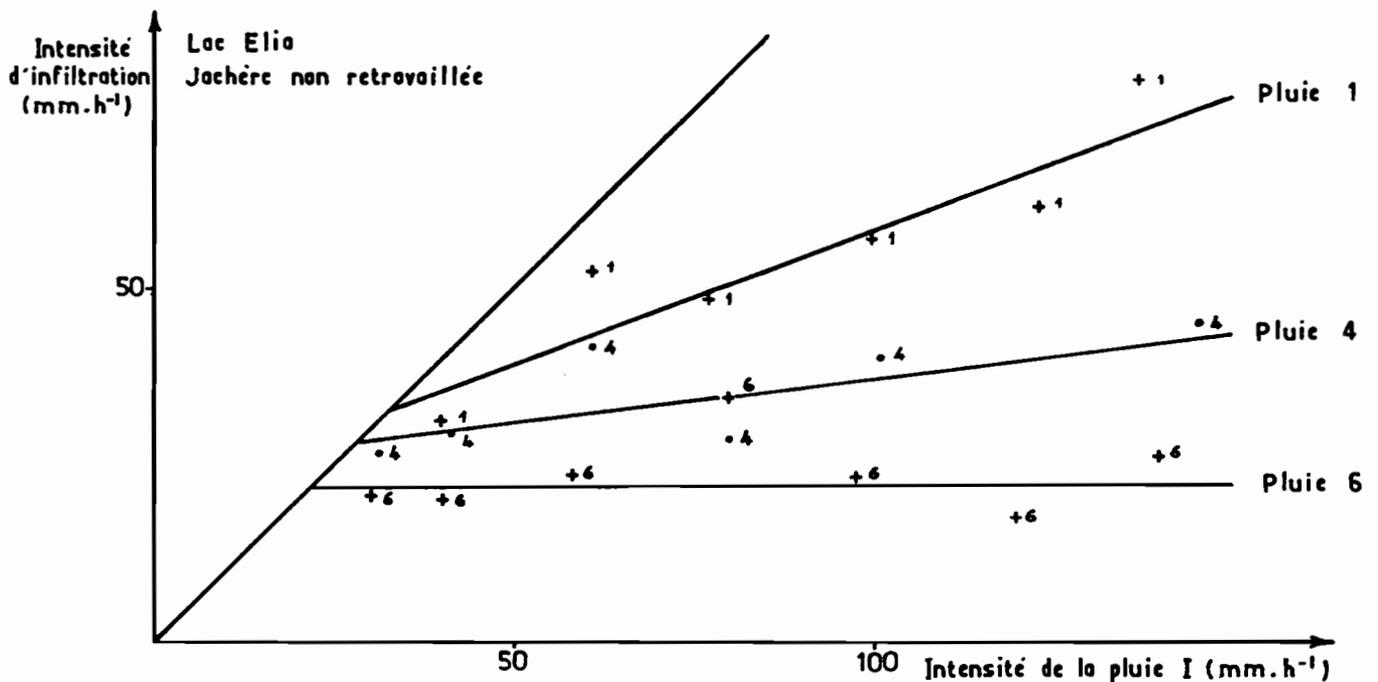


Figure 16: Evolution de l'intensité d'infiltration au cours de 6 pluies successives sous jachère non travaillée du lac Elia

La parcelle cultivée (parcelle 31, figure 17) présente un micro-relief peu prononcé (différence de hauteur entre les zones les plus hautes et les zones les plus basses de 4 cm). On retrouve la tendance à une augmentation de l'intensité d'infiltration avec l'intensité de la pluie, mais le phénomène est beaucoup moins net que sur les parcelles précédentes.

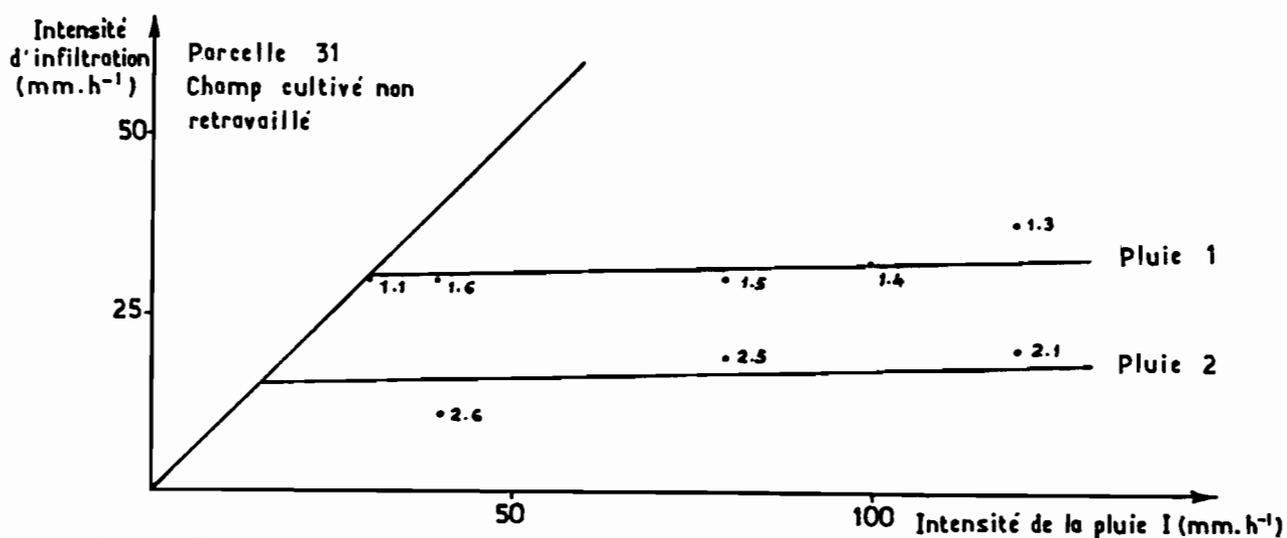


Figure 17 : Evolution de l'intensité d'infiltration sous deux pluies consécutives et en fonction de l'intensité de l'averse sous culture (Parcelle 31)

Sur les parcelles présentant un micro-relief, l'intensité d'infiltration augmente donc avec l'intensité de la pluie, contrairement aux parcelles labourées planées, et cette augmentation semble d'autant plus importante que le micro-relief est plus prononcé. L'étude de ce phénomène faisait l'objet de l'expérimentation sur les parcelles 51 à 53.

5.4 ETUDE DES PARCELLES SUR SOL LABOURE BILLONNE (PARCELLES 51 À 53)

Au cours de la première pluie (pluie en créneau double de 145 mm) l'intensité d'infiltration diminue, comme nous l'avons vu au paragraphe 5.1.1. Mais il est remarquable que, même lors de cette phase transitoire, une augmentation de l'intensité produit une augmentation de l'intensité d'infiltration (séquences 1.8 et 1.9 sur la figure 18).

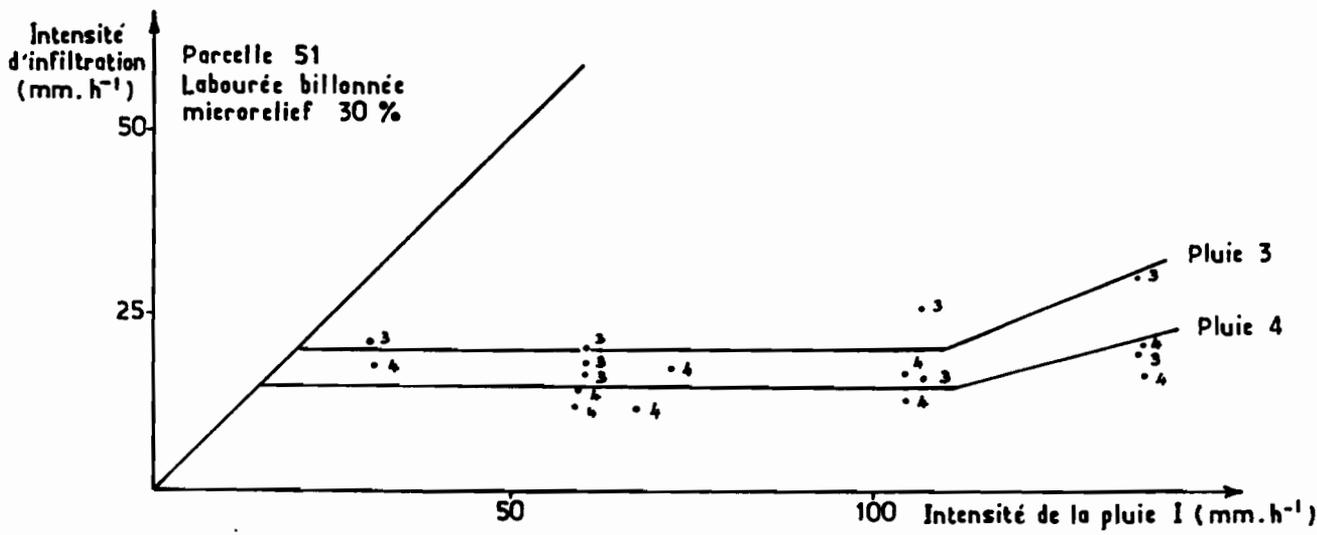


Figure 19 : Evolution de l'intensité d'infiltration sous deux pluies consécutives sous parcelle billonnée à 30 %

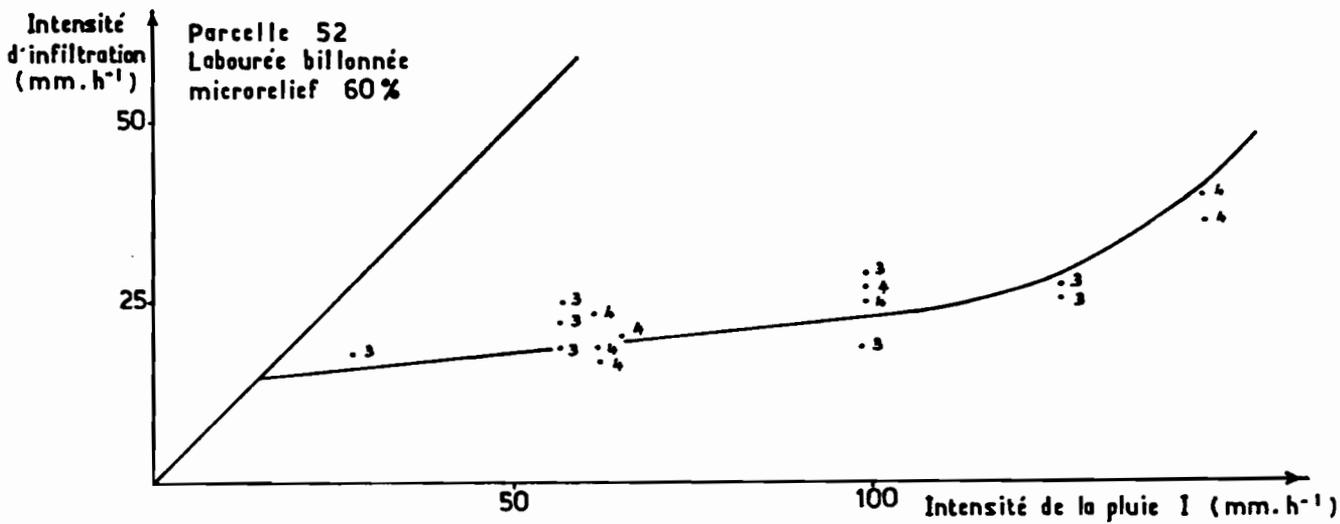


Figure 20 : Evolution de l'intensité d'infiltration en fonction de l'intensité de la pluie sous parcelle billonnée à 60 %

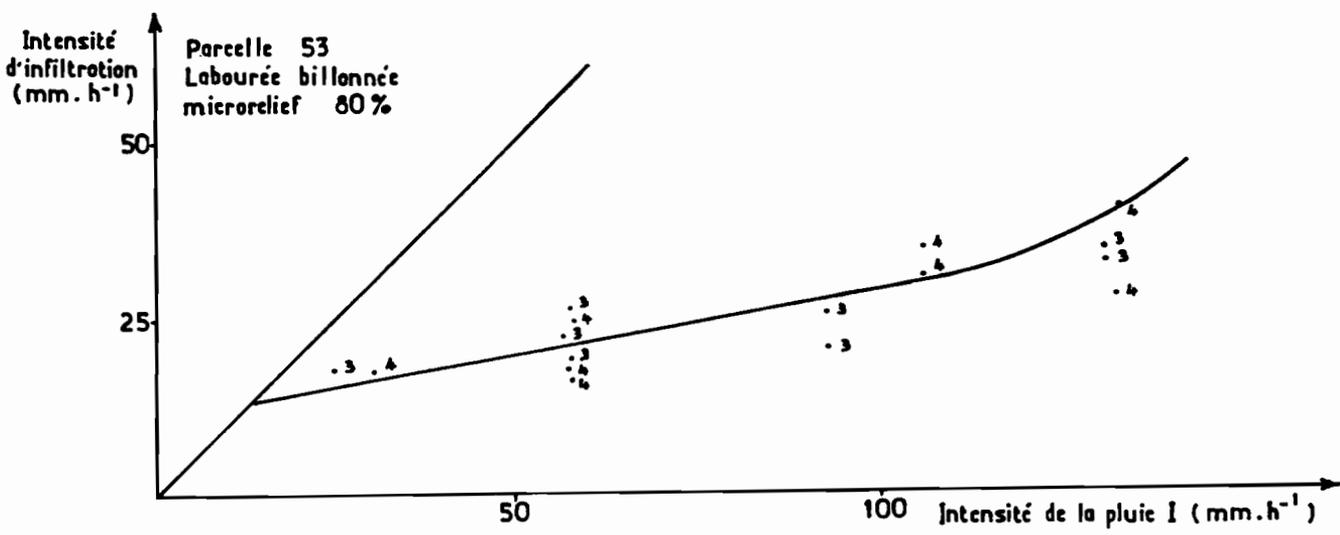


Figure 21 : Evolution de l'intensité d'infiltration en fonction de l'intensité de la pluie sous parcelle billonnée à 80 %

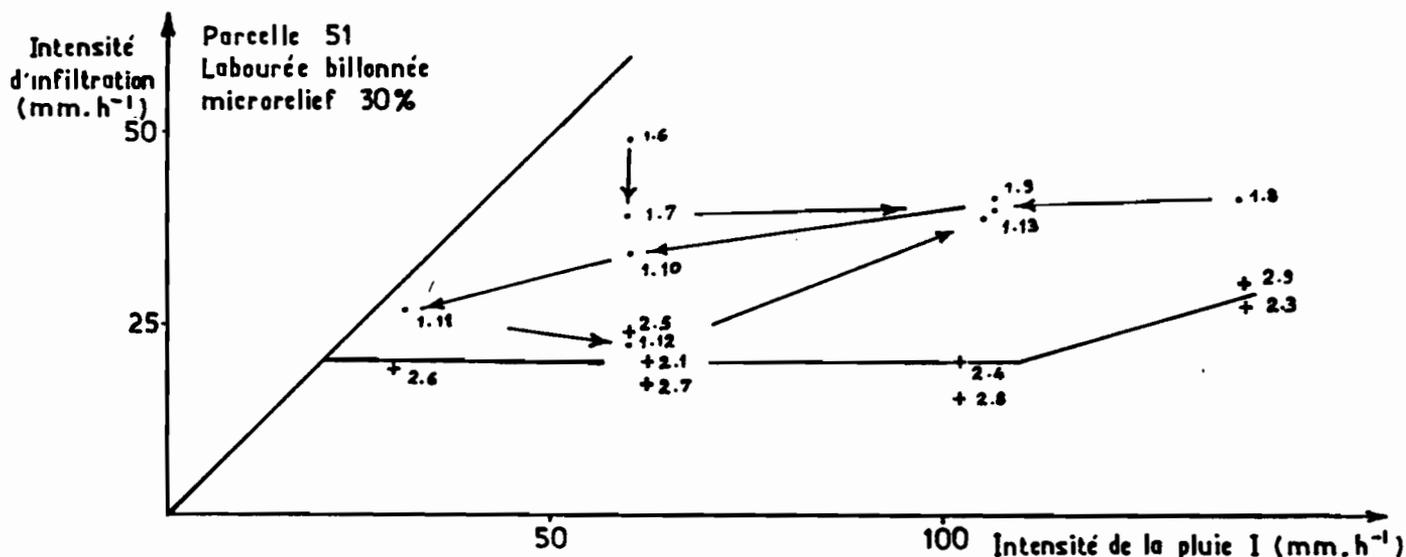


Figure 18 : Evolution de l'intensité d'infiltration en fonction de l'intensité au cours des deux premières pluies sous parcelle labourée billonnée (Parcelle 51)

Pour les trois pluies suivantes (figures 19 à 21), il faut distinguer la parcelle à micro-relief de 30% (parcelle 51) des deux autres. Sur la parcelle 51, l'intensité d'infiltration reste constante jusqu'à 100 mm.h⁻¹, puis augmente ensuite pour une intensité de 140 mm.h⁻¹. Le palier d'intensité limite d'infiltration F_n est de 20 mm.h⁻¹ pour la deuxième et la troisième pluie, et de 15 mm.h⁻¹ pour la quatrième : cette parcelle se comporte donc comme les parcelles labourées planées.

Sur les parcelles où le micro-relief est plus important, l'intensité d'infiltration croît approximativement linéairement avec l'intensité I de la pluie jusqu'à $I=100$ mm.h⁻¹. Cette augmentation reste constante au cours des pluies (hauteur totale : 600 mm), et elle est d'autant plus marquée que le micro-relief est plus important. L'augmentation est de l'ordre de 8 mm.h⁻¹ pour une augmentation de I de 100 mm.h⁻¹ avec 60% de micro-relief, et de 18 mm.h⁻¹ pour une parcelle avec 80% de micro-relief. L'intensité limite de ruissellement I_l (intersection des courbes avec la première bissectrice) reste en revanche très voisine des valeurs observées sur les parcelles planées (environ 20 mm.h⁻¹) : le ruissellement apparaît donc pour des intensités d'averses très voisines.

5.5 CONCLUSION

L'étude des intensités d'infiltration soulève des difficultés méthodologiques importantes, parmi lesquelles se trouve celle de l'influence des temps d'arrêt sur la valeur de l'infiltrabilité (infiltrabilité peu variable si T_a inférieur à 3 jours, mais très différente si $T_a=7$ jours), et celle de la durée de la phase transitoire.

En sol plat ou avec micro-relief faible, l'infiltrabilité est constante en sol humide après quelques pluies, et de l'ordre de 15-20 mm.h⁻¹ jusqu'à une intensité de la pluie de 100 mm.h⁻¹. L'intensité de la pluie semble jouer un rôle important sur la rapidité à laquelle ce palier est atteint, des pluies à intensité forte favorisant le maintien d'une bonne infiltrabilité. Le micro-relief produit une augmentation de l'intensité d'infiltration en fonc-

tion de l'intensité de la pluie d'autant plus importante que le micro-relief est plus prononcé : sur la parcelle avec 80% de micro-relief, l'infiltrabilité double pratiquement entre une pluie de 30 mm.h⁻¹ et une pluie de 100 mm.h⁻¹.

Les ruissellements plus faibles observés sur les parcelles présentant un micro-relief (cf chapitre 3) ne sont donc liés ni à une apparition plus tardive du ruissellement (puisque les pluies d'imbibition sont peu différentes), ni à une meilleure infiltration sur l'ensemble de la gamme des intensités (puisque les intensités limites de ruissellement Il sont très proches), mais à une augmentation de l'intensité d'infiltration avec l'intensité de la pluie.

CHAPITRE 6

ETUDE DE LA DETACHABILITE

Des parcelles de 1 m² ne permettent pas de mesurer la sensibilité du sol à l'érosion, l'important facteur de la longueur de la pente n'étant pas pris en compte. C'est pourquoi nous appellerons détachabilité (VALENTIN, 1981) la quantité de terre entraînée hors de la parcelle au cours des pluies. Cette valeur permet d'évaluer "l'aptitude d'un sol à être fractionné en particules susceptibles d'être transportées".

6.1 DETACHABILITE TOTALE DE CHAQUE PLUIE

Comme nous l'avons fait pour le ruissellement, nous allons considérer la détachabilité au niveau de la parcelle dans son ensemble (tableau 8), qui permet de comparer les traitements lorsque les pluies sont identiques sur les différentes parcelles (il n'est donc pas possible de comparer les parcelles 41 à 43 au cours des trois premières pluies).

6.1.1 Parcelles sous forêt

La détachabilité des parcelles sous forêt (parcelles 11 à 13) au cours de la 7^e pluie est hétérogène d'une parcelle à l'autre, et nous verrons que cette hétérogénéité est générale. Les valeurs sont élevées car les pluies étaient particulièrement fortes (140 mm.h⁻¹), et ceci pendant une heure, pour obtenir le palier de l'intensité d'infiltration (intensité limite d'infiltration). L'ordre de grandeur de ces valeurs n'est donc pas comparable aux résultats des autres parcelles, pour lesquelles les intensités des pluies étaient beaucoup plus faibles.

6.1.2 Parcelles après jachère et cultivées avec pluies en créneau

La parcelle labourée planée (parcelle 21), sur laquelle la détachabilité a été mesurée au cours des 8 pluies successives servira de point de comparaison pour les autres. La forte variabilité des résultats pour des pluies successives de même structure, et où le coefficient de ruissellement était comparable, montre qu'il est impossible d'effectuer des interprétations très fines de ces résultats. Nous en resterons donc au niveau des ordres de grandeur.

Sur la parcelle non retravaillée après jachère (parcelle 22), les mesures de détachabilité n'ont débuté qu'à la quatrième pluie (nous craignons initialement de rendre les limnigrammes inutilisables lorsque des prélèvements d'échantillons d'eau en cours de pluie étaient effectués). Au cours des 4^e et 5^e pluies, la détachabilité est deux fois plus élevée sur cette parcelle que sur la parcelle labourée, mais elle devient comparable lors des deux dernières pluies.

La parcelle labourée planée cultivée (parcelle 32) présente une détachabilité plus importante que la parcelle labourée planée en jachère.

Au cours de la pluie d'homogénéisation qui suit le labour des parcelles 21 à 23 (8^e pluie), la détachabilité n'est pas augmentée par rapport à ce

Milieu	Forêt			Jachère			Champ	
n° parcelle	11	12	13	21	22	23	31	32
Type de parcelle	Naturelle	Naturelle	Mulch de feuilles retiré	Labourée planée	Non re-travaillée couvert supprimé	Labourée planée + mulch	Non re-travaillée couvert supprimé	Labourée planée
Pluie n° 1 créneau	0	0	0	1 535	-	0	1 829	2 931
Pluie n° 2 créneau	0	0	0	875	-	0	-	5 059
Pluie n° 3 créneau	0	0	0	691	-	0		
Pluie n° 4 créneau	0	0	0	1 284	4 807	0		
Pluie n° 5 créneau	0	0	0	886	2 019	0		
Pluie n° 6 créneau	0	0	0	1 624	1 355	0		
Pluie n° 7 créneau	-	-	-	1 543	1 498	0		
	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée	Labourée planée
Pluie n° 7 ou 8	8 377	9 437	12 637	904	1 128*	1 009		

* terre de la goulotte perdue (200 à 350 kg)

Milieu	Jachère		
n° parcelle	41	42	43
Type de parcelle	Labourée planée 30 mm.h ⁻¹	Labourée planée 60 mm.h ⁻¹	Labourée planée 100 mm.h ⁻¹
Pluie n° 1 I = cst	214	227	1 330
Pluie n° 2 I = cst	1 217	624	3 130
Pluie n° 3 I = cst	1 342	649	5 224
Pluie n° 4 I = cst	1 486	996	5 941
Pluie n° 5 créneau double	7 765	3 833	7 549
Pluie n° 6 créneau double	9 478	5 417	6 954

Milieu	Jachère		
n° parcelle	51	52	53
Type de parcelles	Labourée + billons 30%	Labourée + billons 60%	Labourée + billons 80%
Pluie n° 1 créneau double	8 683	7 299	5 732
Pluie n° 2 créneau double	14 686	14 384	16 681
Pluie n° 3 créneau double	20 379	16 560	23 078
Pluie n° 4 créneau double	14 354	14 837	21 206

Tableau 8 : Détachabilité (kg/ha)

qu'elle était avant labour : le labour en sol humide ne favorise donc pas la détachabilité dans ce type de sol.

6.1.3 Parcelles labourées planées après pluies d'intensités constantes (parcelles 41 à 43)

Au cours des 5^e et 6^e pluies sur les parcelles labourées planées ayant déjà subi 4 pluies d'intensités constantes, la variabilité des résultats d'une pluie à l'autre sur la même parcelle se retrouve, mais il s'y ajoute un comportement étonnant sur la parcelle 42 : ayant reçu des averses d'intensité comprise entre celles des parcelles 41 et 43, il aurait été logique que les résultats soient intermédiaires, ce qui n'est pas le cas. Ni la morphologie de la parcelle, ni les propriétés physico-chimiques (tableau 9) ne permettent d'expliquer ce phénomène.

Numero des parcelles	41	42	43
Taux d'argile (%)	8,7	10,3	10,0
Taux de matière organique (%)	1,2	1,2	1,2
Is	0,7	0,9	0,9

Tableau 9 : Quelques propriétés physico-chimiques de l'horizon de surface des parcelles 41 à 43.

Les résultats sont toutefois du même ordre de grandeur. Sur ces parcelles, l'arrêt des pluies pendant une semaine entre la 5^e et la 6^e pluie n'a pas significativement modifié la détachabilité.

La densité apparente de la surface du sol étant d'environ 1 g.cm⁻³, un départ de matière de 1000 kg.ha⁻¹ correspond à une abrasion moyenne de la surface du sol d'un dixième de millimètre. L'abrasion sur les parcelles 21 et 22 n'est donc que de quelques dixièmes de millimètres : la forte diminution du micro-relief observée sur la parcelle 22 entre la 4^e et la 7^e pluie résulte donc de redistributions de matière à l'intérieur même de la parcelle.

6.1.4 Parcelles billonnées

Par rapport aux parcelles précédentes, la détachabilité est multipliée par un facteur de l'ordre de 3 (6,6 t.ha⁻¹ en moyenne en sol plat, contre 17 t.ha⁻¹ en sol billonné). Ce résultat est conforme à ce qui est connu sur l'effet érosif des billons dans le sens de la pente, et recoupe les mesures réalisées sur les parcelles du Bénin (cf chapitre 1). La quantité de matière emportée à chaque pluie correspond à une abrasion moyenne de 1 à 2 mm sur la parcelle.

6.1.5 Conclusion

Le labour à plat semble diminuer la détachabilité par rapport au sol non retravaillé, et en tout cas il ne l'augmente pas. Le billonnage accroît en

revanche considérablement la détachabilité. Il n'est pas possible d'invoquer seulement une augmentation du ruissellement pour expliquer ces comportements. En effet, si cette explication s'applique bien aux différences observées entre parcelles labourées planées après jachère et cultivées, elle n'est pas valable pour rendre compte de la différence entre sol non retravaillé et sol labouré plané d'une part, et de la différence entre sol labouré plané et sol billonné d'autre part, car il s'agit dans les deux cas de parcelles qui ruissellent plus et ont des détachabilités moindres. Pour comprendre ce comportement, il faut analyser la turbidité de l'eau entraînée en fonction du ruissellement au cours des différentes pluies et du micro-relief de la parcelle.

6.2 RELATIONS ENTRE LA TURBIDITE, LE RUISSELLEMENT ET LE MICRO-RELIEF

6.2.1 Problèmes méthodologiques

Comme nous l'avons fait pour l'intensité d'infiltration en fonction de l'intensité de la pluie, il faut savoir si à un ruissellement donné correspond toujours la même turbidité pour un état de surface identique. Il faut distinguer entre les turbidités de la première pluie (ou de la première mesure de turbidité d'une pluie donnée) et les turbidités obtenues en régime permanent.

L'étude de la turbidité de la première pluie est délicate avec le dispositif utilisé, car les ruissellements débutent souvent de manière progressive, surtout sur les parcelles qui ruissellent peu, ce qui interdit d'effectuer des prélèvements, sous peine de rendre le limnigramme inutilisable. Les premiers chiffres obtenus sont donc souvent décalés de plusieurs minutes par rapport au début du ruissellement. D'autre part, pour chaque séquence de pluie d'environ 10 minutes, deux ou trois prélèvements seulement ont été effectués : il n'est donc pas possible d'effectuer une analyse fine de la turbidité dans le temps.

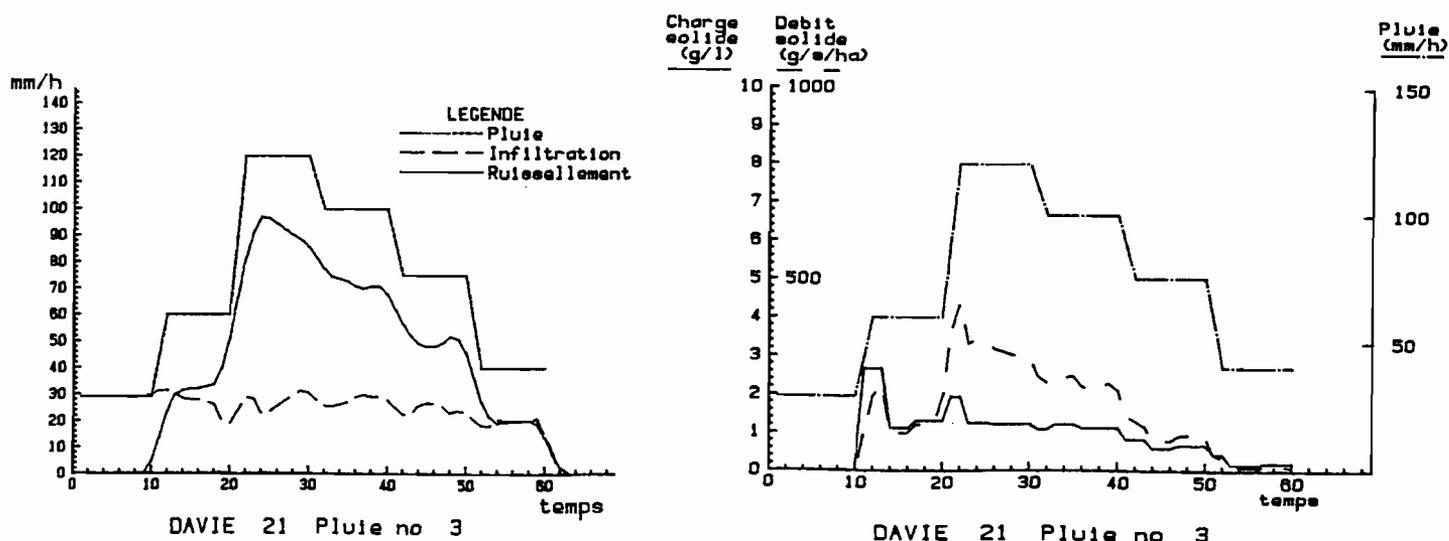


Figure 22 : Exemple de hyétogramme et de turbidigramme

L'exemple de la troisième pluie de la parcelle 21 est un exemple typique des résultats obtenus (figure 22) : lors de l'apparition du ruissellement, les eaux sont plus chargées qu'ensuite. Mais ce phénomène n'est ni général, ni très marqué. Sur l'ensemble des pluies réalisées, il n'a été observé que 9 fois. La turbidité est généralement moins de deux fois plus forte que le niveau auquel elle s'établit ensuite, la différence semblant d'autant plus marquée que le ruissellement est plus intense. Dès le deuxième prélèvement de turbidité, soit moins de 5 minutes plus tard, la charge solide des eaux de ruissellement est généralement stabilisée à une valeur que l'on retrouve ensuite pendant toutes les pluies pour une intensité de ruissellement donnée. Sur ce type de sol, le pic de turbidité en début de pluie est donc peu marqué et n'intervient que très faiblement sur la détachabilité totale obtenue au cours d'une pluie donnée.

Lorsque la même intensité de pluie est maintenue pendant longtemps, la turbidité reste généralement constante, mais des irrégularités comme celle observée à la fin de la 8^e pluie sur la parcelle 22 ne sont pas rares (figure 23) : un pic de turbidité apparaît pendant une durée variable, généralement inférieure à 10 minutes, puis la turbidité s'établit à nouveau à la valeur antérieure. Ces irrégularités, probablement liés à la rupture de micro-seuils sur la parcelle dans les zones d'écoulement de l'eau, sont généralement faciles à identifier.

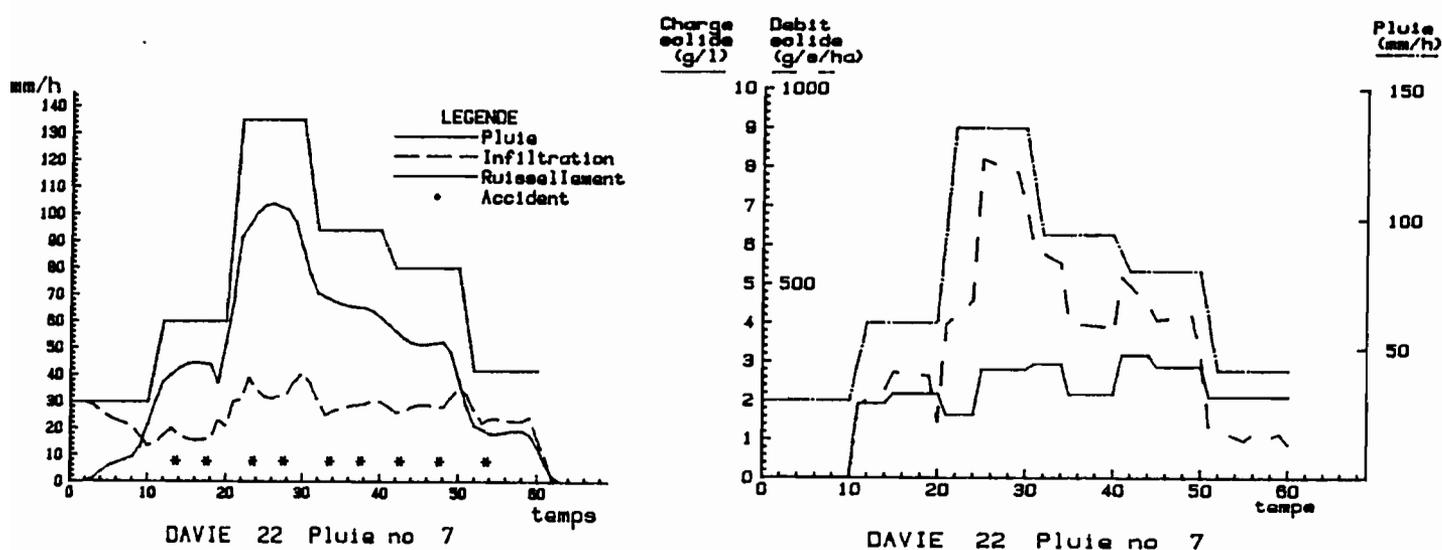


Figure 23 : Exemple de turbidigramme présentant un pic de turbidité pour une intensité de pluie constante

Le cas le plus général est celui observé lors de la 2^e pluie sur la parcelle 21 (figure 24) : pour chaque intensité de pluie, à laquelle correspond une intensité de ruissellement (cf chapitre 5), la turbidité s'établit à une valeur assez peu variable.

Si l'on élimine les turbidités obtenues en début de pluie et les accidents apparaissant lors des longues séquences à intensité constante, il est donc possible d'analyser la turbidité moyenne obtenue au cours d'une séquence en fonction de l'intensité du ruissellement et du traitement appliqué à la parcelle.

Planche 1

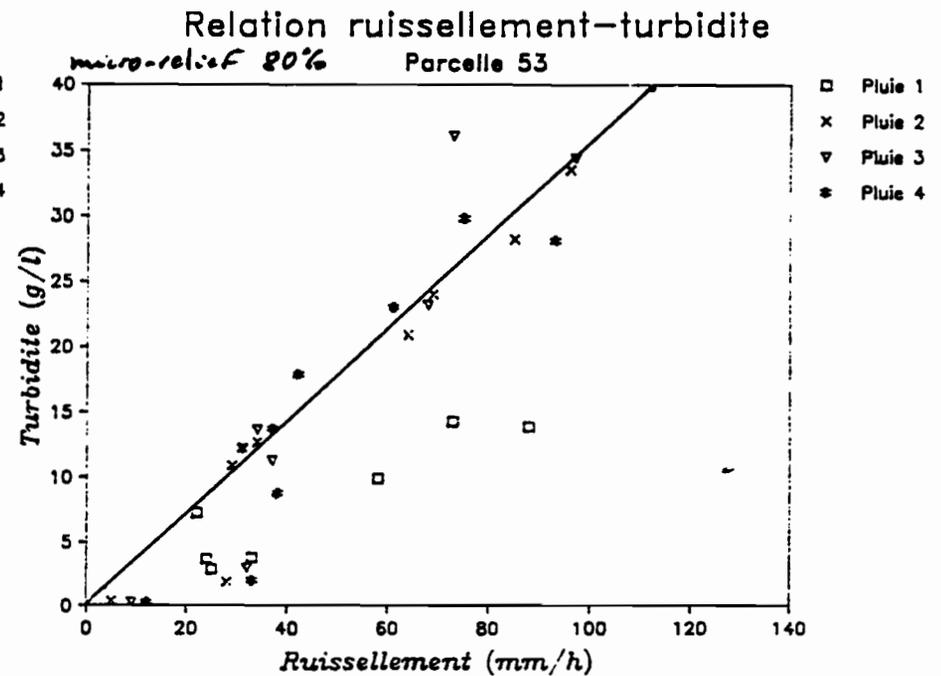
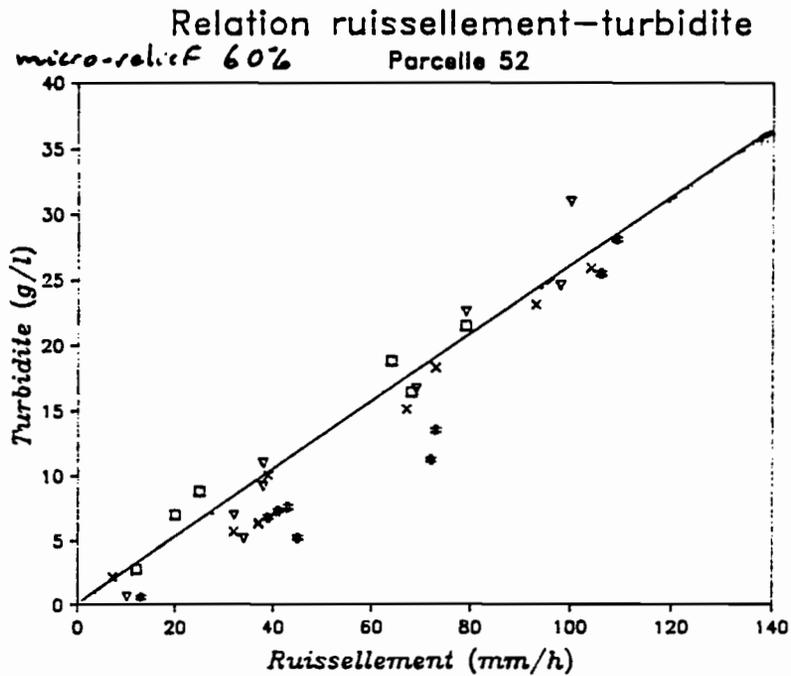
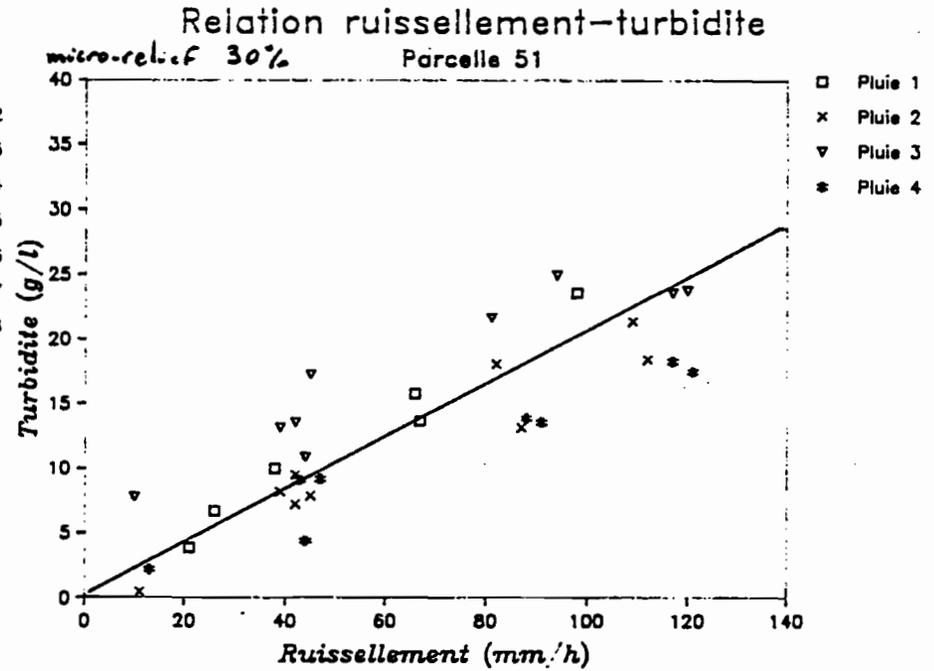
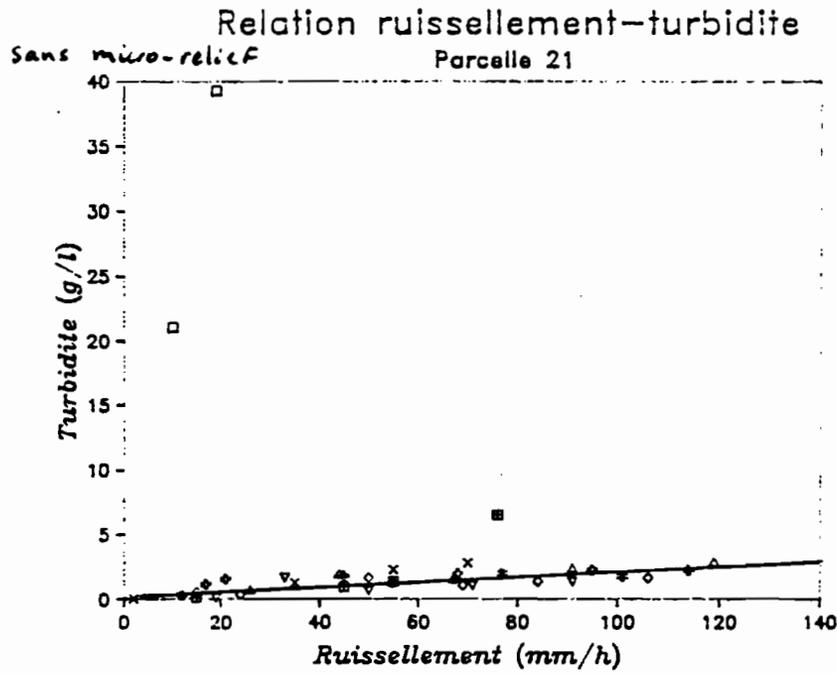


Planche 1: Relation entre ruissellement et turbidite pour des parcelles de microrelief croissant 44

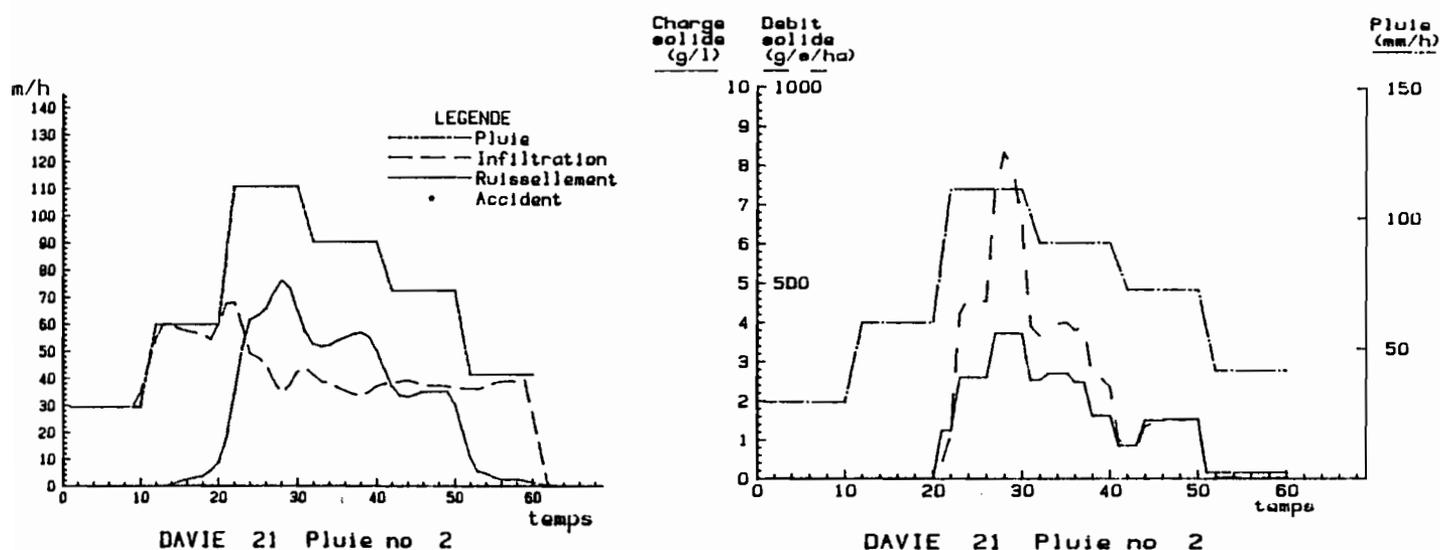


Figure 24 : Exemple de turbidigramme pour lequel la charge solide est liée à l'intensité de la pluie

6.2.2 Résultats et discussion

La planche 1 représente les principaux résultats obtenus. Sur l'ensemble des parcelles, il apparaît une forte liaison entre la turbidité et le ruissellement, conformément à ce qui a déjà été trouvé dans la zone sub-désertique (VALENTIN, 1981). Sur la parcelle 21, comme d'ailleurs sur toutes les parcelles labourées planées, la turbidité reste faible (moins de 5 g.l^{-1}), alors qu'elle peut atteindre 30 g.l^{-1} lorsque le micro-relief est prononcé, la détachabilité pour une intensité de ruissellement donnée étant d'autant plus forte que la proportion de la surface occupée par les billons est plus importante. La parcelle après jachère non retravaillée présente un comportement intermédiaire entre celui de la parcelle labourée planée (parcelle 21) et celui de la parcelle billonnée à 30% (parcelle 51), ce qui est en accord avec l'intensité du micro-relief sur cette parcelle.

Les facteurs ruissellement et micro-relief intervenant tous les deux comme facteur explicatif de la turbidité, nous avons calculé la matrice de corrélation pour faire la part de chacun (tableau 10).

	Ruissellement	Micro-relief
Turbidité	0,58	0,54

Tableau 10 : Matrice de corrélation entre ruissellement, turbidité et micro-relief (126 observations).

Pour les parcelles étudiées, le micro-relief est donc un facteur explicatif des turbidités aussi important que le ruissellement. La présence de micro-relief sur les parcelles accroît donc considérablement la détachabilité du sol.

Pour expliquer ce phénomène, deux processus complémentaires peuvent être invoqués : l'action de dispersion du sol sous l'effet des gouttes d'eau et d'abrasion par le ruissellement sur les zones émergées au cours des pluies (effet splash) et l'effet de cisaillement et d'entraînement lié à la circulation de l'eau à la surface de la parcelle. En effet le billonnage accroît les zones émergées, mais canalise également l'écoulement, et donc l'accélère.

Si l'on compare la parcelle labourée planée (parcelle 21) et la parcelle billonnée à 30% (parcelle 51), l'effet de canalisation de l'écoulement par le billonnage est peu sensible sur la parcelle 51 car la zone planée est étendue. D'autre part la parcelle 21 est couverte en permanence d'une lame d'eau qui atténue l'énergie cinétique des gouttes d'eau, lame d'eau que l'on retrouve sur la partie plane de la parcelle 51. La différence de turbidité considérable observée (de l'ordre de 1 à 10) doit être principalement imputée à l'effet du rejaillissement et du ruissellement sur les zones émergées. La comparaison entre les parcelles 52 et 53 corrobore cette interprétation. En effet sur ces deux parcelles qui comportaient 3 billons, les interbillons étaient peu différents, pour une turbidité beaucoup plus forte sur la parcelle où le micro-relief est plus prononcé.

6.3 CONCLUSION

Pour un même milieu (jachère de longue durée), la turbidité des eaux de ruissellement sur les terres de Barre est fonction de l'intensité du ruissellement et du micro-relief. Sur les parcelles planées la détachabilité est faible, même après labour, l'abrasion de la surface du sol au cours d'une pluie étant de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres. Sur les parcelles billonnées, en revanche, les turbidités atteignent des valeurs élevées, ce qui produit une abrasion de la surface de l'ordre du millimètre au cours d'une pluie. Cette importante turbidité semble principalement liée à l'action de l'impact des gouttes de pluie et au ruissellement sur les zones émergées, et se traduit morphologiquement par un affaissement des billons au cours des pluies et un déchaussement des herbes ou la formation de micro-cheminées de fées. La création d'un micro-relief permet donc une meilleure pénétration de l'eau dans le sol (cf paragraphe 5.4), mais accroît également les risques d'érosion.

Ces résultats obtenus sur des parcelles de 1 m² ne doivent pas être transposés directement à l'échelle du champ. Une surface de sol glacé crée en effet un écoulement en nappe, qui peut se concentrer en ravines lorsque la pente devient plus longue, ce qui peut provoquer des érosions catastrophiques. D'autre part nous n'avons étudié ici que l'influence d'un micro-relief qui ne s'oppose pas à l'écoulement, d'où les entraînements de matière considérables observés. Lorsque le micro-relief crée une succession de micro-cuvettes, ou mieux encore des billons isohypses, la détachabilité des zones émergées demeure, mais la terre entraînée est piégée dans les dépressions. Il y a fonte sur place du micro-relief, mais très faible entraînement latéral de matière. Les parcelles du Bénin (cf chapitre 1) ont montré la grande efficacité du billonnage isohypse pour lutter contre l'érosion, dans cette zone climatique où les pluies sont généralement insuffisantes pour rompre les billons.

CHAPITRE 7

ETUDE DE LA GRANULOMETRIE DES MATERIAUX ENTRAINES

L'étude des matériaux érodés réalisée au Bénin avait montré un entraînement sélectif de la matière organique et des éléments minéraux et, curieusement mais de manière constante, un rapport entre les sables grossiers et les sables fins (SG/SF) plus important dans les particules entraînées que dans le sol en place. Il convenait donc d'étudier ce problème de près à Davié, afin de pouvoir proposer une interprétation.

7.1 PROBLEMES METHODOLOGIQUES

L'analyse granulométrique a été réalisée sur les deux types de matériaux récoltés à l'exutoire de la parcelle : la terre en suspension dans l'eau recueillie lors des mesures de turbidité, et la terre piégée dans le canal de sortie de la parcelle (goulotte), qui était prélevée après chaque pluie.

Comme il est indispensable de disposer d'au moins 5 grammes de terre pour réaliser l'analyse granulométrique, il était impossible de connaître la granulométrie de chaque prélèvement de turbidité, et donc de connaître l'évolution de la composition de la terre entraînée au cours d'une pluie. Les différents échantillons correspondant à une pluie ont donc été mélangés, et l'analyse effectuée sur l'échantillon résultant. Cette méthode est inexacte au cas où la composition de la terre entraînée varie selon le ruissellement, chaque échantillon ayant un poids égal au sein de l'échantillon moyen, indépendamment de l'intensité du ruissellement au moment où il a été prélevé. Il existe cependant une certaine compensation, car nous avons vu que la turbidité est plus élevée avec des ruissellements forts, donc la quantité de terre récoltée est plus importante et donne un poids plus fort aux échantillons récoltés lors d'écoulements importants.

La granulométrie de la terre de la goulotte pose également un problème de représentativité non résolu, car il est probable que les dépôts dans la goulotte ne s'effectuent pas de la même manière pour les différentes intensités de ruissellement.

Pour obtenir la granulométrie de la terre entraînée, nous avons effectué une péréquation en fonction de la quantité de terre en suspension (généralement la fraction dominante) et de la quantité de terre dans la goulotte (entre 200 et 400 kg.ha⁻¹). Une étude plus fine de la granulométrie des matériaux entraînés nécessiterait une modification du dispositif expérimental, afin de donner à la goulotte une pente plus importante pour diminuer, sinon supprimer, les dépôts.

En ce qui concerne la comparaison du rapport SG/SF dans le sol avec celui des matériaux entraînés, il est nécessaire de connaître la granulométrie des sables de la terre en place (figure 25).

Parcelle 21 : Jachère labourée planée

	Sol parcelle		Numero de la pluie					
	0-4 cm	4-10 cm	3	4	5	6	7	8
m.o.	0,91	0,92	2,86	1,69	2,01	1,49	1,77	6,87
A	9	10	11	8	7	9	8	17
LF	3	3	10	5	9	6	6	19
LG	4	5	5	3	3	3	3	4
SF	31	31	22	17	11	16	12	11
SG	51	50	51	66	67	64	71	41

Parcelles 31 et 32 : Champ labouré et non retravaillé (31)

	Sol parcelle		Numero de la pluie			
	0-4 cm	4-10 cm	31-1	31-2	32-1	32-2
m.o.	0,72	0,80	2,15	1,39	1,67	0,94
A	10	11	9	7	12	7
LF	4	4	12	8	13	6
LG	6	6	6	4	5	3
SF	31	29	19	22	15	14
SG	48	50	53	58	54	70

Parcelle 42 : Jachère labourée planée ($I = 60 \text{ mm.h}^{-1}$)

	Sol parcel	Numero de la pluie					
		1	2	3	4	5	6
m.o.	1,2	3,2	4,8	1,8	0,9	1,3	1,2
A	10	12	13	7	4	4	4
LF	3	2	1	7	3	6	6
LG	5	2	7	3	2	2	2
SF	34	20	18	8	17	9	27
SG	47	61	64	71	73	78	62

Parcelle 22 : Jachère non retravaillée
couvert herbacé supprimé

	Sol parcelle		Numero de la pluie				
	0-4 cm	4-10 cm	4	5	6	7	8*
m.o.	0,91	0,92	1,13	2,77	4,95	3,11	~ 3
A	9	10	5	10	13	11	~ 9
LF	3	3	3	8	13	6	~ 10
LG	4	5	2	5	7	4	~ 4
SF	31	31	20	22	21	18	~ 17
SG	51	50	69	53	41	59	~ 58

*Goulotte
perdueParcelle 41 : Jachère labourée planée ($I = 30 \text{ mm.h}^{-1}$)

	Sol parcel.	Numero de la pluie					
		1*	2	3	4	5	6
m.o.	1,1	(1,9)	2,1	1,4	0,8	1,1	1,3
A	9	(8)	6	3	3	3	2
LF	2	(2)	3	2	2	3	4
LG	2	(3)	1	1	1	2	3
SF	33	(22)	8	9	14	20	29
SG	54	(64)	80	76	78	70	60

*Uniquement
goulotteParcelle 43 : Jachère labourée planée ($I = 100 \text{ mm.h}^{-1}$)

	Sol parcel.	Numero de la pluie					
		1	2	3	4	5	6
m.o.	1,2	4,6	2,1	-	-	1,0	1,1
A	10	10	8	6	6	5	6
LF	3	5	4	6	5	4	8
LG	5	3	2	3	2	2	3
SF	32	18	17	31	28	31	30
SG	49	62	67	53	52	52	56

Parcelle 51 : Jachère labourée billonnée 30%

	Sol parcel.	Numero de la pluie			
		1	2	3	4
m.o.	1,0	1,3	0,9	0,8	0,8
A	9	7	7	6	7
LF	2	2	2	2	2
LG	4	2	2	3	3
SF	32	20	24	31	29
SG	52	69	65	59	59

Parcelle 52 : Jachère labourée billonnée 60%

	Sol parcel.	Numero de la pluie			
		1	2	3	4
m.o.	1,1	0,5	1,3	1,1	1,3
A	9	9	8	8	9
LF	2	2	3	2	4
LG	4	2	3	3	4
SF	31	17	26	27	25
SG	52	69	59	58	57

Parcelle 53 : Jachère lab.bil. 80%

	Sol Parcel.	Numero de la pluie			
		1	2	3	4
m.o.	1,0	1,8	1,0	0,8	0,9
A	8	9	7	6	6
LF	2	3	2	2	2
LG	4	2	2	2	3
SF	31	16	18	28	34
SG	53	68	71	62	54

TABLEAU 11 : Evolution de la granulométrie de la terre entraînée au cours des pluies successives.

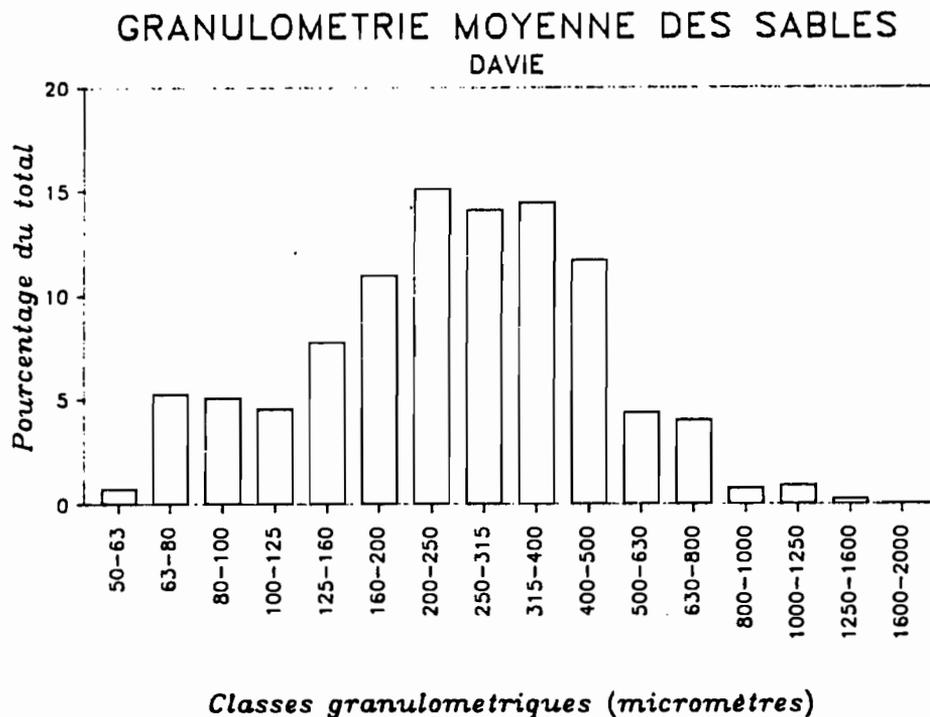


Figure 25 : Granulométrie des sables du sol en place

Il apparaît que la limite entre les sables fins et les sables grossiers (200 micromètres) correspond à l'une des classes granulométriques les plus abondantes de ces sols : de faibles erreurs de pipetage lors de l'analyse granulométrique peuvent donc entraîner des variations de plusieurs pour cents sur les résultats. Il convient d'être prudent au niveau de l'interprétation.

7.2 PARCELLES LABOUREES PLANEES

Sur toutes les parcelles labourées planées (parcelles 21 et 32, et 41 à 43), les résultats sont cohérents (tabl. 11), et nous nous appuyerons surtout sur les parcelles 41 à 43, car les granulométries des deux premières pluies de la parcelle 21 manquent (quantité de terre prélevée insuffisante pour l'analyse).

7.2.1 Matière organique

Au cours des premières pluies, le taux de matière organique dans les matériaux entraînés est toujours très supérieur à celui du sol en place (souvent trois fois plus élevé lors de la première pluie). Lors des dernières pluies ce taux diminue et devient comparable à celui du sol en place. Il y a donc un très net entraînement sélectif de la matière organique : le processus pourrait être simplement une remontée de la matière organique à la surface du sol sous l'effet de l'impact des gouttes d'eau en raison d'une densité plus faible que celle du sol, qui prépare un entraînement sélectif lorsque le ruissellement débute.

7.2.2 Argile

Lors de la première pluie, le taux est voisin dans le matériau entraîné et dans le sol. A partir de la 2^e pluie sur les parcelles 41 et 43, de la 3^e pluie sur la parcelle 42, le taux diminue progressivement pour s'établir à 2-3% sur la parcelle 41, 4% sur la parcelle 42 et 6% sur la parcelle 43. Sur la parcelle 21 le phénomène est moins net (probablement en raison des variations dans l'intensité de la pluie), mais il n'y a jamais de concentration d'argile dans les matériaux entraînés. Ce résultat mériterait d'être confirmé, car il tend à prouver que le ruissellement enrichit le sol en argile sur les terres de Barre par départ sélectif des sables, ce qui est contraire aux théories habituelles. Le dispositif de mesure adopté au Bénin ne permet malheureusement pas de trancher ce problème fondamental.

7.2.3 Limons fins

Comme dans tous les sols qui ont subi une longue évolution ferrallitique, le taux de limons fins est faible dans le sol (2 à 3%). On constate des variations dans la terre entraînée par rapport au sol en place (LF de 0,5 à 10,5%) sans tendance nette.

7.2.4 Limons grossiers

Les limons grossiers sont moins abondants dans les matériaux entraînés, et ceci généralement dès la première pluie. Cette différence persiste ensuite au cours des pluies suivantes, le taux dans les matériaux érodés étant environ deux fois plus faible que dans le sol en place. Comme le taux dans le sol en place est de l'ordre de 5%, ce phénomène n'est pas très important quantitativement, mais nous verrons que ce comportement est identique à celui des sables fins, et qu'il relève de la même dynamique.

7.2.5 Sables fins et sables grossiers

Les deux classes granulométriques de sables sont traitées simultanément toute variation du taux de l'une des classes s'accompagnant d'une variation en sens opposé de l'autre : en effet, les sables représentent 80 à 85% de la masse du sol et les autres fractions granulométriques varient peu.

Le taux de sables fins dans la terre entraînée est considérablement plus faible que celui du sol en place (30 à 50% de moins) dès la première pluie, et pour toutes les parcelles. Cette évolution s'accroît ensuite lors de la 2^e pluie, surtout sur les parcelles 41 et 42 (SG/SF de 1,7 dans le sol sur la parcelle 41, de 9,8 dans la terre entraînée). Pour les 3^e, 4^e et 5^e pluies des parcelles 41 à 43, le taux de sables fins remonte : pour les parcelles 41 et 42 cette remontée est progressive, le taux restant toujours inférieur à celui du sol en place, alors qu'elle est brutale sur la parcelle 43, avec un taux voisin de celui du sol en place.

Au cours de la 6^e pluie sur les parcelles 41 à 43 (pluie en créneau double), le taux de sables fins dans la terre entraînée est comparable à celui du sol en place : la granulométrie des matériaux entraînés dépend donc du temps d'arrêt, ce dont nous discuterons dans l'interprétation morphologique.

7.3 PARCELLES BILLONNEES

Les variations de composition granulométrique sont beaucoup plus limitées. Pour le taux de matière organique et le taux de limons fins, il n'apparaît aucune variation significative. Par contre, dans ce cas également, les limons grossiers et les sables fins sont moins abondants dans la terre entraînée lors de la première pluie (40 à 50 % de moins), avec une remontée progressive lors des pluies suivantes, le taux de la terre en place étant atteint au cours de la 3^e pluie.

7.4 CONCLUSION

En accord avec les résultats du Bénin, on constate dans tous les cas une diminution considérable du taux de limons grossiers et de sables fins dans les matériaux entraînés lors des premières pluies, avec une remontée plus ou moins progressive ensuite : lorsque l'érosion n'est pas trop sévère (parcelles 21 et 41 à 43), le taux de sables fins reste inférieur à celui du sol en place, alors qu'il est comparable à celui du sol en place en cas d'érosion intense (parcelles 51 à 53).

Sur les parcelles labourées planées, les taux d'argile et de matière organique sont très différents dans le sol en place et dans les matériaux entraînés. La matière organique est entraînée préférentiellement lors des premières pluies, probablement sous l'effet d'un tri densimétrique lié à sa densité plus faible que celle des particules minérales. Le taux d'argile, d'abord proche de celui du sol en place au cours de la première pluie, diminue ensuite dans la terre érodée pour atteindre une valeur égale à environ la moitié de la valeur initiale (ce taux semblant d'ailleurs d'autant plus faible que l'intensité de la pluie est moindre, cf parcelles 41 à 43). Sur les parcelles billonnées, les taux de matière organique et d'argile ne sont pas significativement différents entre le sol et les matériaux entraînés (ce qui est conforme aux résultats obtenus sur billons au Bénin en 1968).

Ces discordances entre la granulométrie de la terre en place et la granulométrie de la terre entraînée prouve que l'érosion n'est pas une simple abrasion de la surface du sol, mais qu'elle est en relation étroite avec la réorganisation des différentes classes granulométriques au sein des organisations pelliculaires superficielles. L'interprétation doit donc être fondée sur la morphologie de ces organisations et de leur évolution au cours des pluies.

CHAPITRE 8

EVOLUTION DE L'ETAT DE SURFACE DU SOL AU COURS DES PLUIES
SIMULEES8.1 EVOLUTION DE L'ETAT DE SURFACE DES PARCELLES LABOUREES
PLANEES

8.1.1 Etat initial



Photo 2 : Parcelle 32 après labour et planage

Toutes les parcelles ont initialement été labourées à l'état sec (fin de saison sèche), sur une profondeur de 5 à 15 cm. Ce labour a été suivi d'un planage à l'aide d'une règle en bois de 1 mètre de longueur, qui a été déplacée sur la parcelle pour assurer une planéité aussi bonne que possible. Après planage, la surface du sol est composée d'une juxtaposition de zones motteuses et de zones où les mottes sont peu nombreuses (photo 2). La dimension des mottes est comprise entre 1,5 et 3 cm. Elles sont de forme arrondie à polyédrique-subanguleuse (photo 3) et friables à l'état sec (elles se cassent facilement entre les doigts). Dans les zones où les mottes sont peu nombreuses (environ 10% de la surface), la surface du sol est constituée principalement de sables déliés, juxtaposés à quelques micro-agrégats de 1 mm environ.



Photo 3 : Détail des mottes créées par le labour

8.1.2 Phase d'imbibition

La phase d'imbibition est l'intervalle compris entre le début de la pluie et le début du ruissellement.

L'aspect le plus spectaculaire de l'évolution de la surface du sol au cours de cette phase est la disparition des mottes. Elle résulte de l'effet mécanique de l'impact des gouttes d'eau sur des agrégats faiblement argileux (8 à 10% d'argile). Les phénomènes d'éclatement sont probablement négligeables en raison de la faible teneur du sol en argile et en limons (environ 6%). La rapidité du phénomène est fonction de l'intensité de la pluie : avec une intensité de 30 mm.h⁻¹ (parcelle 41), les mottes disparaissent en une heure et demie, alors qu'il faut moins d'une demi-heure avec une intensité de 100 mm.h⁻¹. Aussi, après la première pluie, les mottes ne représentent que quelques pour cents de la surface du sol, même avec les intensités les plus faibles. C'est cette sensibilité des agrégats à l'impact des gouttes de pluie qui explique l'inefficacité du labour pour améliorer la pénétration de l'eau dans le sol.

Dans les zones sans mottes, et dans les zones où les mottes ont déjà été dispersées, l'impact des gouttes de pluie provoque des petits cratères d'environ 1,5 cm de diamètre et 5 mm de profondeur, en même temps qu'un

important rejaillissement (effet splash) qui projette les particules du sol à plus de 10 cm du point d'impact de la goutte d'eau. Un prélèvement micromorphologique de ces cratères montre qu'à la base, à quelques millimètres sous la surface du sol, s'individualise un micro-horizon plasmique, au-dessus d'une zone tassée sous l'effet de l'impact des gouttes d'eau. Les coiffes décrites par VALENTIN (1981) dans un matériau plus sableux et une argile plus dispersable (argile 2/1 alors qu'il s'agit ici de kaolinite) ne sont pas présentes. Il y a donc apparition, dès le stade initial de la pluie, d'une croûte structurale à deux micro-horizons, pour reprendre la terminologie récemment introduite par CASENAVE et VALENTIN (1988) : un horizon plasmique surmonté d'un micro-horizon sableux granulométriquement non classé, fortement mobile sous l'effet des gouttes d'eau. Un accroissement de la durée de la phase d'imbibition (lié, par exemple, à de faibles intensités de pluie) ne peut que favoriser une meilleure individualisation de cette micro-organisation.

Après un temps variable selon l'intensité de la pluie (75 minutes avec 30 mm.h⁻¹, 15 minutes avec 100 mm.h⁻¹), les zones les plus basses de la parcelle deviennent luisantes. La surface du sol se liquéfie, et l'évolution ultérieure est entièrement modifiée. En effet la présence de boue en surface amortit l'énergie cinétique des gouttes d'eau et diminue donc le rejaillissement. Nous ne disposons pas de prélèvement de micromorphologie dans ces zones, il n'est donc pas possible d'en suivre l'évolution. Les zones luisantes s'étendent, puis se transforment en flaques et le ruissellement apparaît.

A ce stade, la parcelle se présente comme une juxtaposition de zones émergées présentant une croûte structurale à deux micro-horizons et de zones boueuses ou à flaques, avec des mottes dont l'abondance dépend de l'intensité de la pluie.

8.1.3 Evolution en présence de ruissellement au cours de la première pluie

Les zones luisantes s'étendent progressivement sur la parcelle, alors que les flaques prennent une extension qui est fonction, pour une parcelle donnée, de l'intensité de la pluie. L'observation visuelle en cours de pluie ne révèle pas d'autre évolution, car la lame d'eau masque tout.

A la fin de la pluie, la parcelle présente la juxtaposition des deux principaux types d'organisations superficielles. Les zones qui étaient émergées présentent une morphologie typique de croûte d'érosion : une pellicule plasmique très fine, sans porosité vésiculaire, moule la surface du sol, d'où émergent des grains de sable quartzeux parfaitement lavés. Cette croûte est recouverte par endroits de sables déliés dont l'abondance dépend de l'intensité du ruissellement au cours de la pluie : lorsque le ruissellement est intense les sables sont pratiquement absents.

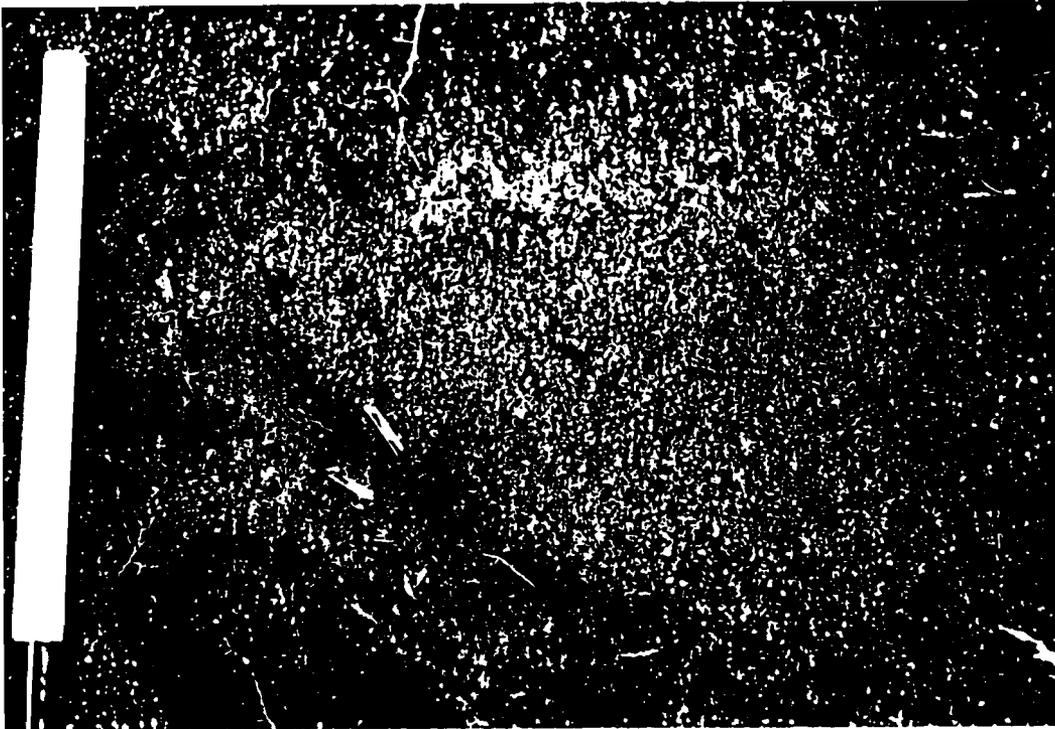


Photo 4 : Granoclassement dans les dépressions

Les zones qui étaient submergées présentent un granoclassement latéral marqué des particules (photo 4). Sur la périphérie des dépressions se trouvent une zone à sables fins, agglomérés entre eux, à laquelle succède brutalement une zone à sables grossiers déliés, qui passe progressivement à un matériau où les débris organiques sont abondants. Ce granoclassement se retrouve également verticalement à l'observation visuelle et en lames minces : au dessus de l'horizon plasmique hérité de la phase d'imbibition (croûte structurale) se trouve un micro-horizon à sables fins surmonté d'un horizon à sables grossiers qui ne présente aucune porosité vésiculaire.

Compte-tenu de l'absence de prélèvements micromorphologiques en cours de pluie, on ne peut qu'avancer des hypothèses sur la mise en place de ces deux types d'organisation. La croûte d'érosion dérive très probablement de la croûte structurale à deux micro-horizons apparue au cours de la phase d'imbibition, par entraînement du micro-horizon superficiel sous l'effet du ruissellement, qui met à l'affleurement la pellicule plasmique et ne laisse en place que quelques sables lavés dans certaines zones légèrement déprimées. Le granoclassement dans les zones submergées au cours des pluies, qui est un phénomène très général sur les sols sableux, est plus difficile à expliquer car il est contraire au classement sédimentaire habituel, qui voudrait que les éléments les plus grossiers soient situés à la base et les plus fins au sommet. Un classement lié à une différence de densité des matériaux en milieu boueux peut expliquer la position des éléments organiques, mais pas celle des différentes classes de sables, tous constitués de quartz. VALENTIN (1981) invoque les différents régimes d'écoulement (turbulent ou laminaire) pour expliquer ce phénomène, mais le mécanisme exact reste encore à déterminer.

A l'issue de la première pluie, la surface des parcelles labourées planées est constituée de la juxtaposition d'une croûte d'érosion avec quelques sables déliés par places dans les zones émergées en cours de pluie, et

d'une croûte de ruissellement en cours d'élaboration présentant une pellicule plasmique à la base dans les zones immergées (photo 5).

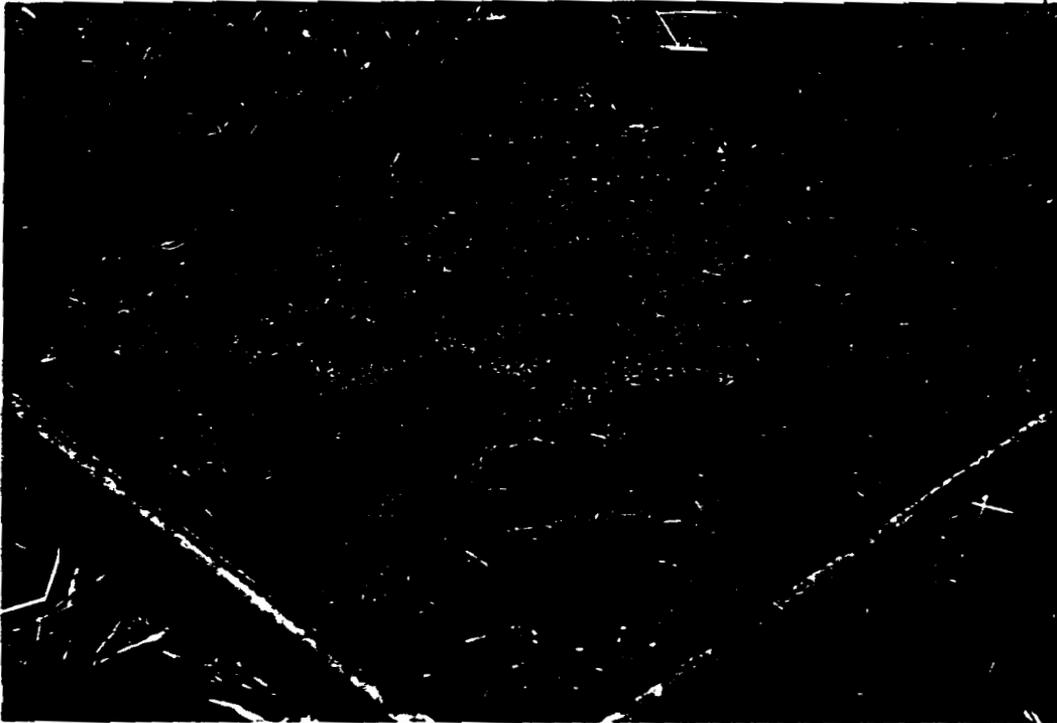


Photo 5 : Juxtaposition d'une croûte d'érosion et d'une croûte de ruissellement après la première pluie

8.1.4 Evolution au cours des pluies successives

Au cours des pluies successives la croûte d'érosion évolue peu. Si les intensités des averses sont suffisantes pour que le sol soit couvert par une lame d'eau, les phénomènes de ruissellement dominant et les sables déliés sont plus ou moins complètement déblayés. Si la lame d'eau due au ruissellement devient très mince ou disparaît, des cratères d'impact de gouttes d'eau apparaissent (phénomène très bien observé à la suite d'une pluie naturelle sur une parcelle). A la base des cratères la pellicule plasmique se reforme immédiatement, et les sables libérés se répandent à la surface du sol. Ils sont prêts à être repris par l'érosion dès que le ruissellement redevient compétent.

L'évolution des croûtes de ruissellement est dépendante des intensités des averses successives. Si les averses présentent des intensités faibles, le ruissellement apporte de nouveaux micro-horizons sableux. Ceux-ci recouvrent les précédents, sans individualisation nette de nouvelles pellicules plasmiques au sein du matériau sableux dans les lames que nous avons prélevées. Par contre c'est dans ce type de croûte que nous avons observé les seules porosités vésiculaires trouvées sur parcelles labourées planées.

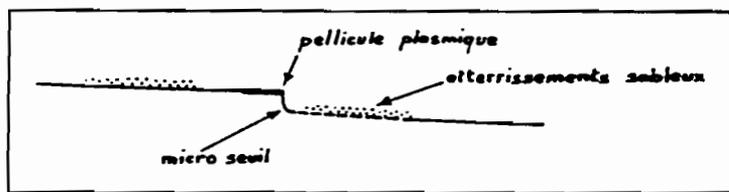
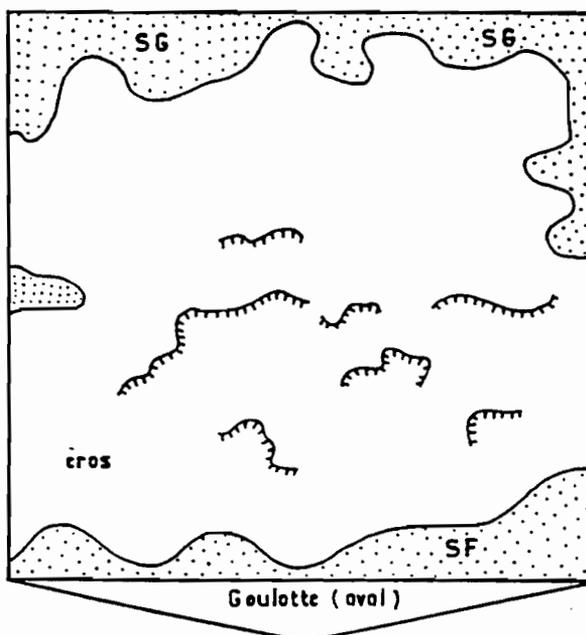


Figure 26 : Schéma de l'organisation d'un micro-seuil

Figure 27 : Parcelle 41 (Jachère labourée planée)
après la 6^e pluie



Si l'intensité de l'averse est plus importante, les sables sont entraînés, et le phénomène est particulièrement visible lorsque l'intensité est montée à 140 mm.h^{-1} : les sables semblent balayés à partir des zones amont vers les zones aval. La pellicule plasmique formée lors de la phase d'imbibition est alors ramenée en surface du sol, et elle est souvent assez résistante pour bloquer l'érosion à son niveau. Mais dans les zones de canalisation de l'écoulement, ou pour les fortes intensités, cette croûte elle-même est cisailée et il se crée un micro-seuil de 2 à 6 mm de hauteur (photo 6 et figure 26) dont l'évolution va ensuite conditionner l'entraînement des dépôts sableux situés à l'amont, car il agit comme un véritable seuil rocheux sur une rivière, bloquant l'érosion régressive. A l'aval de ce seuil, la pellicule plasmique se reforme, mais il semble qu'elle reste discontinue tant que les gouttes d'eau ne frappent pas directement la surface du sol.

La parcelle 41 après la 6^e pluie (figure 27) est un exemple du résultat obtenu à la fin des pluies : la plus grande partie de la parcelle est constituée par la croûte d'érosion (éros), de laquelle tous les sables ont été balayés par le ruissellement. Des sables grossiers subsistent à l'amont, où le ruissellement est insuffisant pour les entraîner. Une zone de sables fins est toujours présente au contact de l'aval du cadre : les trous d'évacuation forment un seuil derrière lequel les sables sont bloqués.

L'extension de la zone à sables fins dépend beaucoup de la pente et de la forme du micro bassin-versant à l'intérieur de la parcelle : des versants à forme légèrement convexe à pente de l'ordre de 5% présentent une zone de sables fins à l'aval moins étendue qu'un versant de forme concave avec une pente moyenne de 3%.

8.2 EVOLUTION DE L'ETAT DE SURFACE DES PARCELLES BILLONNEES

8.2.1 Etat initial

Les billons qui ont été formés avaient une hauteur de l'ordre de 7 cm, afin de ne pas dépasser la hauteur du cadre et donc de poser facilement la tôle pour la pluie de contrôle. Les interbillons ont été modelés à l'aide d'une règle en bois pour leur donner une forme initiale la plus rectiligne possible. Les parcelles comportaient la même juxtaposition de zones motteuses et de zones à mottes plus rares que celle des parcelles labourées planées (photo 7).

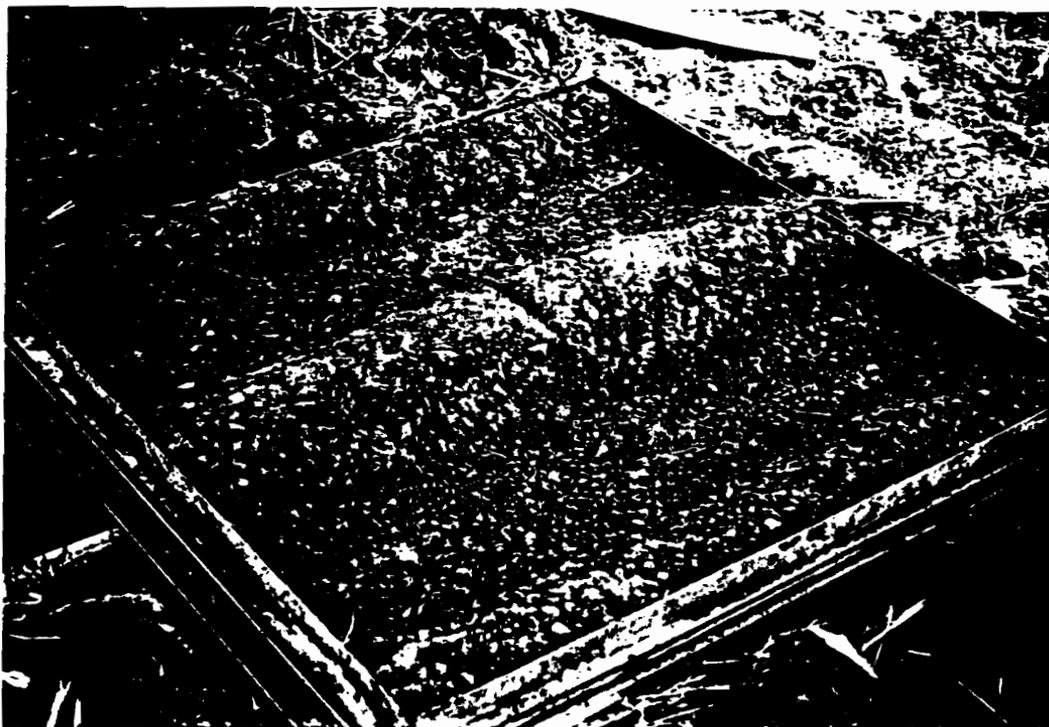


Photo 7 : Parcelle 52 après labour et billonnage sur 60% de la surface

8.2.2 Phase d'imbibition

Cette phase est très comparable à ce qu'elle est sur les parcelles labourées planées : disparition plus ou moins rapide des mottes, formation de cratères à l'impact des gouttes de pluie et apparition de plages luisantes dans la partie aval de l'interbillon. La différence provient de la présence des versants des billons : lors de l'impact des gouttes d'eau, il n'y a plus redistribution aléatoire des particules soulevées par rejaillissement autour du cratère, mais globalement apport de matière dans les zones déprimées et départ dans les zones hautes. La croûte structurale s'individualise donc plus difficilement sur les versants, car l'entraînement est important, alors que dans l'interbillon il y a apport constant de matériau nouveau.

8.2.3 Evolution en présence de ruissellement au cours de la première pluie

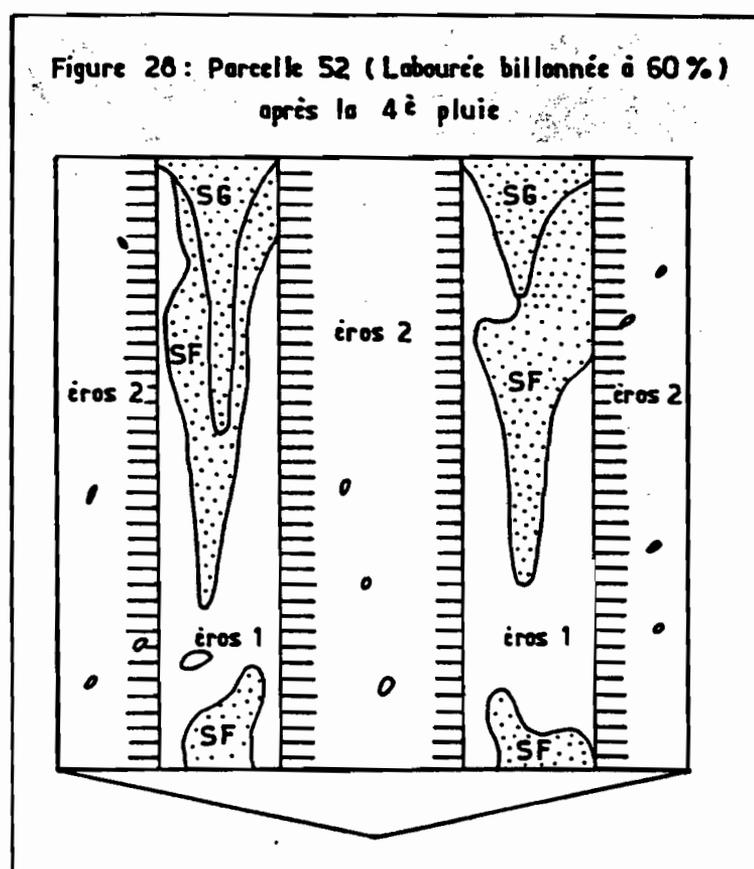
L'interbillon évolue comme les zones basses des parcelles planées, avec ségrégation latérale des sables, les sables fins adossés aux billons et les sables grossiers au centre de l'interbillon et à l'amont de la parcelle.

La forme des billons évolue considérablement au cours de la première pluie : la hauteur diminue de l'ordre de 1 cm, et la largeur augmente à la base, au contact de l'interbillon. La diminution de hauteur provient probablement en partie d'un tassement du matériau sous l'effet de l'humectation et de l'impact des gouttes de pluie, mais le phénomène d'érosion intervient également de manière considérable : sur le versant des billons apparaissent des "micro cheminées de fée" constituées d'un débris végétal ou de charbon de bois surmontant une petite colonne de terre qu'il a protégé de l'impact des gouttes de pluie. La surface des billons présente une croûte d'érosion généralisée sur laquelle les sables déliés sont rares. La pellicule plasmique est bien individualisée sur les sommets, mais elle est discontinue sur les versants, dont le profil est irrégulier. Elle présente de nombreuses traces d'impact de gouttes d'eau.

8.2.4 Evolution au cours des pluies successives

L'évolution des billons consiste principalement en un tassement du sommet (diminution de la hauteur d'environ 1,5 cm en moyenne pour les 4 pluies) et une érosion des versants. Sur les versants, la pellicule plasmique n'atteint jamais la continuité notée sur les parcelles planées.

Dans l'interbillon on constate une évolution comparable à celle des zones immergées des parcelles planées : les sables sont progressivement entraînés, d'abord les sables grossiers, puis les sables fins, avec mise à l'affleurement de la pellicule plasmique. Les micro-seuils n'apparaissent que sur la parcelle billonnée à 30% (deux billons séparés par une zone plane), ce qui est curieux car on aurait pu penser que la concentration du ruissellement sur les deux autres parcelles favoriserait leur apparition. Il est possible que la forte turbidité des eaux de ruissellement (jusqu'à 40 g.l⁻¹) ait diminué la force érosive de l'eau.



La parcelle initialement billonnée à 60% fournit un exemple du résultat obtenu après la 4^e pluie (figure 28). Les billons sont tassés et couverts d'une croûte d'érosion à pellicule plasmique discontinue (éros 2). Les interbillons sont constitués de l'aval à l'amont par un dépôt de sables fins bloqués au niveau des trous du cadre, auquel succède une zone de croûte d'érosion résultant de la mise à l'affleurement de la pellicule plasmique formée en début de pluie (éros1), et une zone sableuse (croûte de ruissellement) où les sables fins sont en bordure et les sables grossiers au centre.

8.3 EVOLUTION DE L'ETAT DE SURFACE DES PARCELLES NON RETRA- VAILLEES (JACHERE 22 ET CHAMP 31)

8.3.1 Etat initial

Initialement ces parcelles présentaient un état comparable à celui des parcelles labourées planées après la première pluie, exception faite du micro-relief (ici de 6-7 cm après jachère et 4 cm dans le champ, contre 1 à 2 cm sur les parcelles labourées planées après une pluie). La surface des zones les plus hautes présentaient une croûte d'érosion, avec de nombreuses traces d'impact de gouttes d'eau (profondeur 1 à 5 mm, diamètre 0,5 à 1,5 cm). Dans le champ la pellicule plasmique surmontait un micro-horizon à porosité vésiculaire. Les zones déprimées étaient couvertes d'un dépôt sableux de sables déliés, d'une épaisseur pouvant atteindre 3 mm. Les zones sableuses représentaient 70% de la parcelle après jachère et 30% sur le champ. Ces zones ne présentaient ni structure vésiculaire, ni structure litée, ni ségrégation latérale des sables.

Nous avons donc la classique juxtaposition de croûte d'érosion à pellicule plasmique (à porosité vésiculaire peu développée dans le cas du champ) et de croûte de ruissellement sableuse.

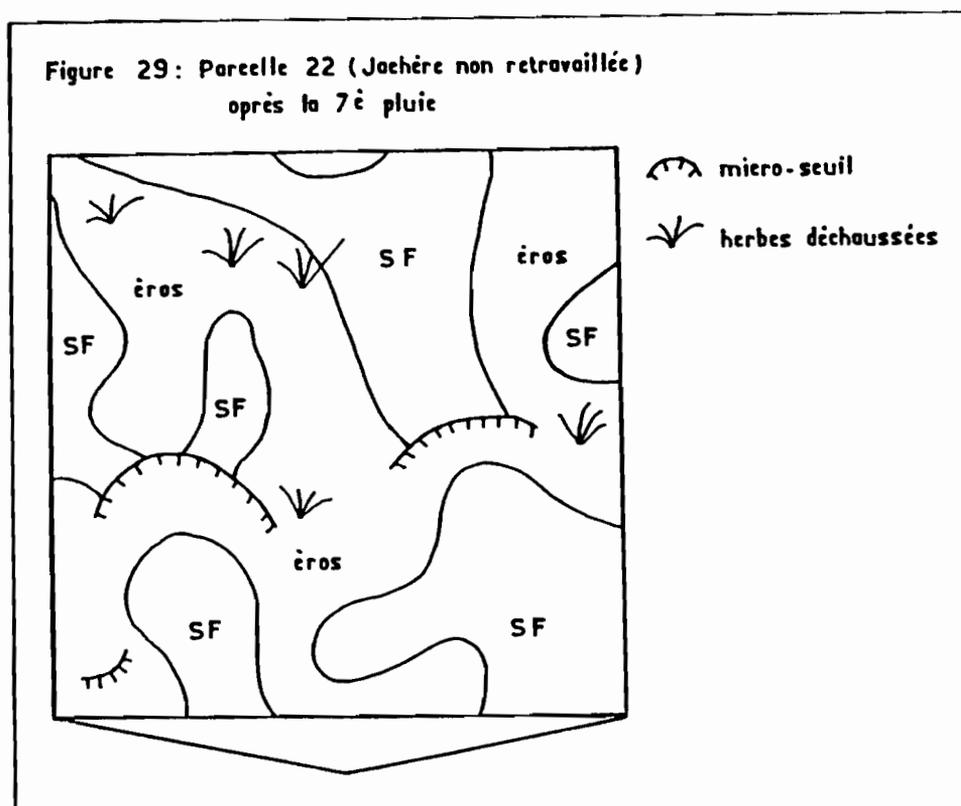
8.3.2 Evolution au cours des pluies

L'évolution des zones à croûte d'érosion est intermédiaire entre celle des parcelles planées et des parcelles billonnées : la pellicule plasmique présente une continuité comparable à celle observée sur les parcelles planées, mais l'atténuation du micro-relief est importante. La différence de hauteur entre les zones les plus hautes et les zones les plus basses est passée de 6-7 cm à 3 cm sur la parcelle après jachère, ce qui est confirmé par le déchaussement des herbes (photo 8). Cette fonte du micro-relief est le résultat de l'impact des gouttes de pluie, dont il reste de nombreuses traces. Elle fait apparaître un chevelu racinaire en surface du sol, qui doit contribuer à protéger le sol de l'érosion. Il n'y a pas de porosité vésiculaire : la porosité vésiculaire initiale de la parcelle du champ est donc probablement liée à des alternances d'humectation et de dessiccation, selon le mécanisme décrit par EVENARI et al. (1974).



Photo 8 : Déchaussement des herbes après 7 pluies (Parcelle 22)

Au cours des pluies, les zones sableuses évoluent d'une manière comparable à ce qui a été décrit aussi bien en sol plané qu'en sol billonné : ségrégation latérale puis entraînement des sables, apparition des micro-seuils. Comme les averses simulées sont d'une intensité supérieure à celle des pluies habituelles, la proportion occupée par les zones sableuses a diminué au cours de l'expérimentation au profit des croûtes d'érosion (figure 29).



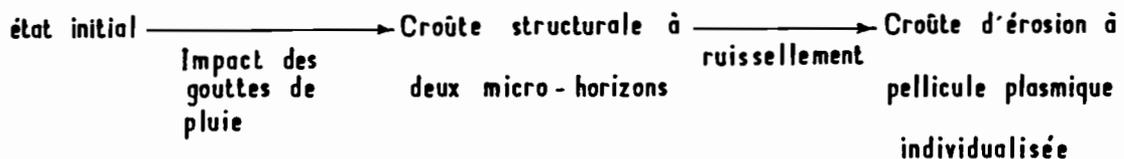
8.4 CONCLUSION

Les parcelles étudiées présentent la juxtaposition d'états de surface contrastés. Sur les zones émergées au cours des pluies les croûtes d'érosion dominent. Elles comportent une pellicule plasmique plus ou moins continue suivant l'intensité de l'érosion. Dans les dépressions, la première pluie forme une croûte de ruissellement sableuse, qui évolue ensuite au cours des averses successives. Si l'érosion est faible, elle se maintient, et elle apparaît constituée, en fin de protocole, d'une superposition de micro-horizons sableux. Si elle est forte, les sables sont entraînés (en commençant par les sables grossiers qui se trouvent en surface et au centre des dépressions), ce qui aboutit à la mise en surface du sol de la pellicule plasmique formée au cours de la phase d'imbibition. Cette pellicule peut elle-même être détruite lorsque le ruissellement est intense ou concentré, ce qui donne naissance à des micro-seuils, qui gouvernent alors l'érosion régressive sur le micro-bassin versant situé à l'amont.

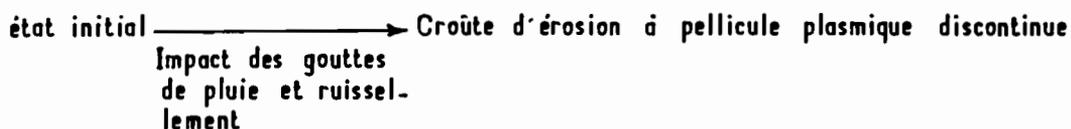
L'évolution des états de surface peut être représentée comme suit :

Zones émergées

Parcelles labourées planées



Parcelles billonnées



Dépressions



Schéma de l'évolution des états de surface

CHAPITRE 9

INTERPRETATION DES RESULTATS HYDRODYNAMIQUES EN FONCTION DE LA DYNAMIQUE DES ETATS DE SURFACE

9.1 PARCELLES LABOUREES PLANEES

Nous avons vu, lors de l'étude du ruissellement, en comparant les parcelles labourées planées avec et sans mulch d'herbe (parcelles 23 et 21), qu'en l'absence d'organisations pelliculaires superficielles il n'y avait aucun ruissellement, même sous les pluies les plus fortes. Le ruissellement peut donc être interprété, sur les autres parcelles qui ne diffèrent que par la présence de ces organisations, en termes de propriétés hydrodynamiques des croûtes : la conductivité hydraulique, fonction de l'état hydrique et de l'organisation morphologique, et le gradient de charge hydraulique, également lié à l'état hydrique.

Au cours de la phase d'imbibition, nous avons constaté que l'infiltrabilité du sol diminuait progressivement : le ruissellement apparaît lorsqu'elle devient inférieure à l'intensité de la pluie. Cette diminution résulte d'une évolution simultanée du gradient de charge et de la conductivité hydraulique de la surface du sol. Au début de la pluie le gradient de charge est très élevé entre le sol sec et la surface du sol qui s'humecte, ce qui favorise l'entrée de l'eau dans le sol. Au cours de la pluie il se rapproche ensuite d'un gradient unitaire, étant donné qu'il n'y a pas de blocage du drainage dans le sol. L'état de surface du sol évolue rapidement par destruction mécanique des mottes et formation de la croûte structurale à deux micro-horizons. Les pores du sol, qui débouchaient initialement à la surface du sol, sont donc progressivement colmatés, à mesure que la pellicule plasmique s'individualise, ce qui produit une diminution de la conductivité hydraulique de la surface du sol.

Lorsque le ruissellement apparaît, les zones déprimées sont progressivement recouvertes de matériau sableux, et la pellicule plasmique formée lors de la phase d'imbibition n'évolue plus. Par contre la pellicule plasmique des zones émergées se consolide jusqu'à ce que la lame d'eau qui transite à la surface du sol devienne suffisamment épaisse pour amortir l'énergie cinétique des gouttes. Nous avons vu qu'au cours des pluies il peut se produire une nouvelle évolution de la pellicule plasmique sous l'effet des gouttes d'eau lorsque le sol n'est pas couvert par une lame d'eau.

Quelles sont les conductivités hydrauliques des deux types d'état de surface, la croûte d'érosion et la croûte de ruissellement ? Ne disposant pas de mesures ponctuelles sur chaque type de surface, il est nécessaire de recourir à des arguments indirects. Lorsque la pluie débute, les zones recouvertes de croûte d'érosion deviennent luisantes, en sol humide, moins d'une minute après le début de l'averse, et ceci quelle que soit l'histoire antérieure de la parcelle. Les croûtes de ruissellement, en revanche, ne deviennent luisantes que plus tard, alors même qu'elles reçoivent, en plus de la pluie, l'apport de l'impluvium des croûtes d'érosion. D'autre part, dans leur étude sur l'influence des états de surface sur l'infiltration dans la zone sahélienne, CASENAVE et VALENTIN (1988) ont noté pour les croûtes d'érosion des infiltrabilités parmi les plus faibles de tous les états de

surface, beaucoup plus faibles que celles des surfaces élémentaires comportant des croûtes de ruissellement. Il paraît donc acquis que la conductivité hydraulique des zones à croûte d'érosion est beaucoup plus faible que celle des croûtes de ruissellement. Dans les croûtes de ruissellement, l'observation micromorphologique de la porosité suggère que le niveau le moins perméable est la pellicule plasmique située à la base, qui commanderait donc l'infiltration. Nous nous trouvons donc dans un système où les zones émergées infiltrent moins que les zones immergées dans lesquelles l'eau de ruissellement est collectée. Il s'agit donc typiquement de ce que LAFFORGUE (1977) a appelé une parcelle de type "perméable aval".

Au cours des pluies successives, la morphologie de la croûte d'érosion n'évolue pas : il est donc probable que sa conductivité hydraulique varie peu. Par contre la pellicule de ruissellement peut être partiellement érodée par entraînement des sables sous l'effet du ruissellement. Il est frappant de constater, pour une pluie donnée, la constance de l'infiltration quelle que soit l'intensité de la pluie et donc le ruissellement. Par contre l'infiltration diminue d'une pluie à l'autre. Il est donc possible d'avancer une interprétation prenant en compte la dynamique des états de surface : si l'infiltration dans les croûtes sableuses est commandée par la pellicule plasmique située à sa base, il est logique que l'entraînement des sables modifie peu la conductivité hydraulique, même lorsque la pellicule plasmique apparaît en surface. La pellicule est en effet protégée de l'impact des gouttes d'eau par la lame d'eau qui ruisselle. Au début de la pluie suivante, en revanche, la pellicule est soumise à l'impact direct des gouttes d'eau, qui la consolide très rapidement (lorsque la pellicule est supprimée par grattage, elle se reforme presque instantanément). Il en résulte la diminution d'infiltrabilité qui a été constatée.

L'action de la pellicule plasmique située à la base de la croûte de ruissellement permet également d'expliquer la meilleure infiltrabilité constatée sur les parcelles où l'intensité initiale de la pluie est plus élevée. Nous avons vu en effet qu'elle s'individualise au cours de la phase d'imbibition, et qu'elle se trouve ensuite enfouie sous les apports sableux du début du ruissellement. Elle s'individualise donc d'autant mieux que la pluie d'imbibition durera plus longtemps, ce qui correspond aux intensités les plus faibles. C'est donc la formation de la pellicule plasmique au tout début de la pluie qui pourrait expliquer les valeurs de l'infiltrabilité de la surface du sol, jusqu'à ce que l'érosion des sables de la croûte de ruissellement ramène la pellicule plasmique à la surface du sol, ce qui détermine une nouvelle évolution.

La dynamique des états de surface permet également d'expliquer la granulométrie de la terre entraînée. Au début du ruissellement, les matériaux mobilisés par le rejaillissement, peu différents du sol initial, sont entraînés vers les zones déprimées où s'effectue, selon un processus non élucidé dont nous avons discuté au paragraphe 8.1.3, un granoclassement qui aboutit à la mise en surface des sables grossiers. Ceux-ci sont donc préférentiellement entraînés vers l'exutoire, accompagnés par la matière organique remontée en surface du fait de sa densité plus faible. Ainsi s'expliquerait la diminution, dès la première pluie, du taux de sables fins dans la terre entraînée. Lors des pluies suivantes, la croûte d'érosion des zones émergées est peu sensible à l'érosion : les mesures dont nous disposons ne sont pas assez précises pour suivre les variations de niveau de cette croûte, mais le développement fréquent dans la nature de tissus algues à son niveau prouve que cette organisation évolue peu dans le temps. Nous avons constaté, en revanche, que les sables des croûtes de ruissellement étaient entraînés par le ruissellement. Il en résulte le déficit en argile constaté, ainsi que la richesse initiale des sédiments en sables grossiers, qui s'atténue ensuite lorsque l'érosion attaque les ni-

veaux profonds plus riches en sables fins. Lorsque tous les sables ont été entraînés, la granulométrie des matériaux érodés se rapproche à nouveau de celle du sol en place.

Après une phase de ressuyage d'une semaine, l'infiltration de l'eau dans le sol est durablement améliorée par rapport au sol humide : comme le ruissellement est alors plus faible, l'effet de l'impact des gouttes de pluie sur la surface du sol est plus important que dans le cas d'un sol humide. La terre des cratères d'impact est mobilisée et la granulométrie de la terre entraînée devient voisine de celle de la terre en place (6° pluie des parcelles 41 à 43).

9.2 PARCELLES BILLONNEES

La différence fondamentale de comportement hydrodynamique entre les parcelles billonnées et les parcelles cultivées à plat est l'augmentation nette de l'infiltrabilité avec l'intensité de la pluie, d'autant plus prononcée que le billonnage est plus important.

L'explication de ce phénomène important, car il touche la plupart des parcelles non retravaillées étudiées en simulation de pluie, peut également être expliquée par la dynamique des états de surface. Nous avons vu que, sur les flancs des billons, la croûte d'érosion est discontinue, car l'érosion intense sous l'effet des gouttes d'eau et du ruissellement empêchait une évolution comparable à celle des parcelles planées. Il en résulte une meilleure ouverture de la porosité à la surface du sol, visible sur les lames minces. Il est donc logique que l'augmentation de l'intensité de la pluie, qui augmente considérablement l'érosion, favorise l'entrée de l'eau dans le sol, d'autant plus que le micro-relief est plus prononcé.

La granulométrie des matériaux entraînés, du fait d'une érosion qui s'attaque préférentiellement aux versants des billons, est donc naturellement beaucoup plus proche de celle du sol en place. Seul le taux de sables grossiers est plus élevé pendant les premières pluies, car le tri des sables s'effectue également dans les pellicules de ruissellement de l'interbillon.

9.3 CONCLUSION

La dynamique des états de surface permet de rendre compte de l'évolution, dans le temps et pour les différentes intensités des pluies, de l'infiltration de l'eau dans le sol. Elle permet également d'expliquer les différences de granulométrie observées entre la terre entraînée et la terre en place.

Cette interprétation repose sur des mesures et des observations destinées à caractériser les comportements et non les mécanismes. Des études hydrodynamiques plus fines au niveau de chaque état de surface seront donc nécessaires pour préciser la validité de l'interprétation qui a été avancée.

CONCLUSION GENERALE

Le ruissellement et la détachabilité sur les terres de Barre sont directement liés à l'intensité de la mise en valeur : nuls sous forêt, ils atteignent des valeurs élevées dans les champs cultivés intensément. Ceci résulte uniquement des propriétés hydrodynamiques des premiers millimètres du sol : des micro-agrégats très stables permettent sous forêt le maintien d'une bonne conductivité hydraulique de surface, alors qu'il se forme des croûtes d'érosion et de ruissellement lorsque le couvert forestier est supprimé. Ces organisations ralentissent la pénétration de l'eau dans le sol, donc augmentent le ruissellement et l'érosion.

L'étude morphologique et micromorphologique de la dynamique des états de surface permet de rendre compte des comportements hydrodynamiques observés. Des croûtes d'érosion apparaissent dès la première pluie dans les zones soumises à l'action directe des gouttes de pluie. Elles diminuent considérablement la conductivité hydraulique de la surface du sol. Lorsque le micro-relief de la parcelle est prononcé, ces croûtes sont peu individualisées car elles ont tendance à être érodées en même temps qu'elles se forment. Dans ce cas l'infiltrabilité reste donc plus élevée pour les intensités fortes que dans le cas des parcelles planes, mais c'est au prix d'une érosion considérable. Les croûtes de ruissellement qui se forment dans les zones déprimées présentent une conductivité hydraulique plus élevée, car la pellicule plasmique située à la base est généralement mal individualisée. Lors de sa formation, il se crée un tri granulométrique des sables, qui est la cause d'un entraînement préférentiel des sables grossiers par le ruissellement. Lorsque le ruissellement est intense, les dépôts sableux sont entraînés et la pellicule plasmique ramenée en surface, ce qui produit une diminution de l'infiltrabilité de la parcelle.

Comme il avait déjà été montré sur les parcelles d'érosion au Bénin, le paillage de la surface du sol est un bon moyen de lutte contre le ruissellement, car il empêche la formation des croûtes en dissipant l'énergie cinétique des gouttes d'eau. Mais il n'est guère envisageable à grande échelle, en raison des problèmes de main-d'oeuvre et de maladies cryptogamiques qu'il entraîne. Comme nous l'avons vu, la création d'un micro-relief favorise la pénétration de l'eau dans le sol. Les intensités des pluies naturelles au sud-Togo n'étant pas très élevées, des billons isohypes peuvent constituer une solution efficace pour lutter contre l'érosion, mais cette solution est potentiellement dangereuse car des billons mal réalisés peuvent devenir catastrophiques en raison des turbidités élevées des eaux de ruissellement sur les parcelles billonnées : une rupture des billons entraînera des dépôts de matière bien supérieurs à ceux d'une parcelle cultivée à plat. La meilleure solution semble de chercher à

assurer la meilleure couverture végétale au sol, par l'usage de plantes de couverture et de cultures associées.

Ces résultats permettent également d'aborder les problèmes de pédogénèse. En effet, comme le sud du Togo était couvert jusqu'à une époque récente d'un couvert forestier sous lequel le ruissellement est nul, le gradient textural des sols (environ 10% d'argile en surface contre 35% en profondeur) ne peut en aucun cas résulter d'un entraînement sélectif d'argile par ruissellement : seul des processus internes au sol peuvent être invoqués. Même lorsque le sol est cultivé, nos résultats montrent que le taux d'argile n'est pas plus élevé dans les matériaux entraînés que dans le sol en place, et qu'il a même tendance à être plus faible. Ces résultats demandent à être confirmés, et des mesures complémentaires devraient être réalisées au Bénin sur des parcelles plus grandes pour vérifier qu'il ne s'agit pas là d'un facteur d'échelle.

L'étude de l'évolution des états de surface sous simulation de pluie semble donc une voie prometteuse pour comprendre les mécanismes qui régissent l'entrée de l'eau dans le sol dans les zones où les réorganisations superficielles sont importantes.

REMERCIEMENTS

Ce travail repose en grande partie sur celui réalisé au laboratoire d'analyse du centre ORSTOM de Lomé sous la direction de Jean LARVY-DELARIVIERE, et sur celui du laboratoire de minéralogie-pétrographie du centre ORSTOM d'Adiopodoumé sous la direction de Claude HANRION.

BIBLIOGRAPHIE

- AALDERS (H.W.), 1977.- Douze années de mesures d'érosion sur terre de Barre dans le sud-Bénin. Rapp. CENAP-FAO (Bénin), 48 p., multigr.
- ALBERGEL (J.), RIBSTEIN (P.), VALENTIN (C.), 1985.- L'infiltration : quels facteurs explicatifs ? In Journ. Hydro. ORSTOM à Montpellier. Coll. Sém., ORSTOM (Paris), pp. 25-48.
- ASSELIN (J.), VALENTIN (C.), 1978.- Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. Cah. ORSTOM (sér. Hydrol.), 15(4) : 321-349.
- AZONTONDE (A.), ADEGBIDI (H.), 1987.- Etude de l'érosion sur terre de Barre dans le sud-Bénin. Commun. Com. Bénino-Togolaise Fertil. Sols. Lomé (15-17 décembre).
- BADER (J.C.), 1985.- Etude du ruissellement sous pluie simulée sur les bassins versants du lac Elia et de la Dayes à Dzobégan. Togo. Rapp. ORSTOM (Lomé), 60 p., multigr.
- BERTRAND (A.R.), KAMIL (S.), 1962.- The effects of rainfall intensity on soil structure and migration of colloïdal materials in soils. Soil Sci. Soc. of Amer. Proc., 26 : 297-300.
- BRUNET-MORET (Y.), 1967.- Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale. République du Dahomey. Rapp. ORSTOM-CIEH, 20 p., multigr.
- CASENAVE (A.), 1982.- Le mini-simulateur de pluie. Conditions d'utilisation et principes d'interprétation des mesures. Cah. ORSTOM (sér. Hydrol.), 19(4) : 207-227.
- CASENAVE (A.), GUIGEN (N.), SIMON (J.M.), 1982.- Etude des crues décennales des petits bassins versants forestiers en Afrique Tropicale. Cah. ORSTOM (sér. Hydrol.), 19(4) : 229-252.
- CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1988.- Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. Rapp. CEE-ORSTOM, 202 p., multigr.
- EVENARI (M.), YAALON (D.H.), GUTTERMAN (Y.), 1974.- Note on soils with vesicular structure in deserts. Z. Geomorph. N.F., 18(2) : 163-172.
- HUMBEL (F.X.), 1976.- L'espace poral des sols ferrallitiques du Cameroun. Trav. Doc. n°54, ORSTOM (Paris), 310 p.
- LAFFORGUE (A.), 1977.- Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. Cah. ORSTOM (sér. Hydrol.), 14(4) : 299-344.

- ROOSE (E.), 1981.- 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. Trav. Doc. n°130, ORSTOM (Paris), 569 p.
- VALENTIN (C.), 1981.- Organisations superficielles de quelques sols de région sub-désertique (Agadez-Niger). Dynamique de formation et conséquences sur l'économie de l'eau. Thèse 3è cycle, Univ. Paris VII, Etudes et thèses, ORSTOM, 1985, 259 p.
- VERNEY (R.), VIENNOT (M.), GBAGUDI (C.), 1970.- Etude de l'érosion sur "terres de Barre". Erosion sous culture de maïs et coton (année 1969). Rapp. ORSTOM (Cotonou), 14 p., multigr.
- VERNEY (R.), VOLKOFF (B.), 1967.- Etude de l'érosion sur "terres de Barre". Erosion sous culture du maïs : maïs sans fumure minérale (année 1966). Rapp. ORSTOM (Cotonou), 18 p., multigr.
- VERNEY (R.), VOLKOFF (B.), 1968.- Etude de l'érosion sur "terres de Barre". Erosion sous culture du maïs : maïs avec fumure minérale (année 1967). Rapp. ORSTOM (Cotonou), 21 p., multigr.
- VERNEY (R.), VOLKOFF (B.), 1969.- Etude de l'érosion sur "terres de Barre". Erosion sous culture d'arachide (année 1968). Rapp. ORSTOM (Cotonou), 19 p., multigr.
- VERNEY (R.), VOLKOFF (B.), WILLAIME (P.), 1967.- Etude de l'érosion sur "terres de Barre". Comparaison de l'érosion en sol nu et sous jachère arbustive naturelle (année 1965). Rapp. ORSTOM (Cotonou), 14 p., multigr.

ORSTOM

B. P. 375 LOME - Togo

I R A T

B. P. 1163 LOME - Togo

DIRECTION DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

B. P. 2318 LOME - Togo